

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

JAQUELINE VICENTE MATSUOKA

GEOCARTOGRAFIA E MÉTODOS ESTATÍSTICOS APLICADOS À
ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE TENDÊNCIA DOS EXTREMOS
PLUVIOMÉTRICOS EM MINAS GERAIS - BRASIL

UBERLÂNDIA

2024

JAQUELINE VICENTE MATSUOKA

GEOCARTOGRAFIA E MÉTODOS ESTATÍSTICOS APLICADOS À ANÁLISE
ESPAÇO-TEMPORAL DE TENDÊNCIA DOS EXTREMOS PLUVIOMÉTRICOS
EM MINAS GERAIS - BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Geografia – PPGEO – UFU,
como requisito parcial para obtenção do
título de Doutora em Geografia
Orientador: Prof. Dr. Vanderlei de Oliveira
Ferreira
Co-orientador: Prof. Dr. Vinicius
Francisco Rofatto

Área de concentração: Dinâmicas
Territoriais e Estudos Ambientais

Linha de Pesquisa: Estudos Ambientais e
Geotecnologias

UBERLÂNDIA

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M434 Matsuoka, Jaqueline Vicente, 1980-
2024 GEOCARTOGRAFIA E MÉTODOS ESTATÍSTICOS APLICADOS À
ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE TENDÊNCIA DOS EXTREMOS
PLUVIOMÉTRICOS EM MINAS GERAIS - BRASIL [recurso
eletrônico] / Jaqueline Vicente Matsuoka. - 2024.

Orientador: Vanderlei de Oliveira Ferreira.
Coorientador: Vinícius Francisco Rofatto.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Geografia.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.709>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Geografia. I. Ferreira, Vanderlei de Oliveira, 1967-
, (Orient.). II. Rofatto, Vinícius Francisco, 1986-,
(Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.
Pós-graduação em Geografia. IV. Título.

CDU: 910.1

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geografia
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1H, Sala 1H35 - Bairro Santa Monica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4381/3291-6304 - www.ppgeo.ig.ufu.br - posgeo@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	GEOGRAFIA				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, Número 276 , PPGGEO				
Data:	21 de outubro de 2024	Hora de início:	14h:00min.	Hora de encerramento:	17h:30min.
Matrícula do Discente:	12213GEO007				
Nome do Discente:	JAQUELINE VICENTE MATSUOKA				
Título do Trabalho:	GEOCARTOGRAFIA E MÉTODOS ESTATÍSTICOS APLICADOS À ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE TENDÊNCIA DOS EXTREMOS PLUVIOMÉTRICOS EM MINAS GERAIS - BRASIL				
Área de concentração:	DINÂMICAS TERRITORIAIS E ESTUDOS AMBIENTAIS				
Linha de pesquisa:	ESTUDOS AMBIENTAIS E GEOTECNOLOGIAS				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Cenários pretéritos e prospectivos de variáveis hidroclimáticas em Minas Gerais				

Reuniu-se no Campus Santa Mônica (Online - conferenciaweb.rnp.br), no Instituto de Geografia, Geociências e Saúde Coletiva (IGESC) da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em **GEOGRAFIA**, assim composta: Professores Doutores: Cássia de Castro Martins Ferreira - UFJF; Sandro Laudares - PUC-Minas; Cludsonor Ribeiro da Silva - IGESC-UFU; Rildo Aparecido Costa - IGESC-UFU e Vanderlei de Oliveira Ferreira - IGESC-UFU (orientador da candidata). Os membros participaram de forma remota.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Professor Vanderlei de Oliveira Ferreira - IGESC-UFU, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta ocorreram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **Doutora**.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalho. Foi lavrada a presente Ata que após lida foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Vanderlei de Oliveira Ferreira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/10/2024, às 17:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudionor Ribeiro da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/10/2024, às 17:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rildo Aparecido Costa, Usuário Externo**, em 21/10/2024, às 17:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cássia de Castro Martins Ferreira, Usuário Externo**, em 21/10/2024, às 17:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sandro Laudares, Usuário Externo**, em 22/10/2024, às 10:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5805737** e o código CRC **87A5F0C8**.

Referência: Processo nº 23117.071533/2024-40

SEI nº 5805737

JAQUELINE VICENTE MATSUOKA

**GEOCARTOGRAFIA E MÉTODOS ESTATÍSTICOS APLICADOS À
ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DE TENDÊNCIA DOS EXTREMOS
PLUVIOMÉTRICOS EM MINAS GERAIS - BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Geografia – PPGEO – UFU, como requisito
parcial para obtenção do título de Doutora em
Geografia. Área de concentração: Dinâmicas
Territoriais e Estudos Ambientais. Linha de
Pesquisa: Estudos Ambientais e Geotecnologias.

Prof. Dr. Vanderlei de Oliveira Ferreira
Orientador

Profa. Dra. Cássia de Castro Martins
Examinador

Prof. Dr. Sandro Laudares
Examinador

Prof. Dr. Claudionor Ribeiro da Silva
Examinador

Prof. Dr. Rildo Aparecido Costa
Examinador

AGRADECIMENTOS

Este não é apenas um espaço de agradecimentos, mas também uma reflexão sobre a minha trajetória de vida. Minha caminhada acadêmica não seguiu o rumo "convencional" de graduação, iniciação científica, mestrado e doutorado. No meu caso, o percurso foi: graduação, iniciação científica, mestrado, CASAMENTO, FILHOS, TRABALHO NA INICIATIVA PRIVADA, e então o doutorado, conciliando trabalho, casa e filhos. Mas nada disso aconteceu por acaso, foi uma escolha consciente. Optei por ter meus filhos, por trabalhar na iniciativa privada, e até por desistir de dois doutorados no meio do caminho por questões financeiras. A vida é feita de escolhas, e não me arrependo de nenhuma delas. Meus filhos foram sempre o combustível da minha vida. O Matheus, meu companheiro de muitos dias chuvosos no sul dentro do apartamento, era minha força e alegria. Depois o Lucas, que com sua energia, continuou a me dar motivos para lutar nos momentos em que me sentia desanimada. Assim, deixo uma mensagem para todas as MULHERES: a vida é dura para todos, mas para nós é um pouco mais, independentemente de nossas escolhas e circunstâncias. Não desistam. Muitas vezes me revoltei, mas hoje entendo que DEUS estava apenas me preparando e amadurecendo para este momento. Essa tese foi idealizada por muito tempo dentro de mim e, embora eu a defenda agora, sei que a pesquisa continuará por muitos anos, buscando contribuir de alguma forma com o momento que o mundo vive.

Agora sim, os agradecimentos:

A DEUS, por me preparar, lapidar e amadurecer para me tornar a Dra. Jaqueline que Ele sabia que eu poderia ser. Aos meus filhos, Matheus e Lucas, por me fazerem mãe (não a melhor, mas a melhor que pude ser) e por estarem sempre ao meu lado. Eles me ensinam mais do que eu ensino a eles, e me tornam uma pessoa melhor a cada dia. Ao meu marido, Marcelo Tomio, que conheci ainda na faculdade e, apesar de inúmeras dificuldades e tribulações, passamos por todas sempre juntos. Ao meu sogro, Cláudio Takeshi Matsuoka, por ser não apenas um sogro, mas também um segundo pai, avô, amigo e um grande apoio, especialmente para o Lucas (e para todos nós). Sua presença e compreensão foram essenciais nesta etapa, e não tenho palavras para expressar minha gratidão. Ao meu pai (in memoriam) José Vicente Filho, que se foi há trinta anos, deixando um grande vazio, mas também os maiores e melhores exemplos que um ser humano poderia deixar. À minha mãe, Virginie Davoli Vicente, que praticamente me criou sozinha e que, hoje, como mãe, reconheço o quanto desafiador foi, para que sempre pudesse me dar o suporte que necessário. Ao meu irmão Luiz Eduardo Vicente, que sempre foi meu exemplo para seguir estudando e batalhando em busca de algo melhor, pois na nossa vida nada nunca caiu do céu. Por último, ao meu amigo Byron, um Lhasa Apso que me acompanhou por mais de 16 anos, sendo apoio incondicional sem nunca me dizer um só palavra, apenas estando ao meu lado (literalmente) e que hoje não pode estar fisicamente comigo, mas sabe o quanto foi importante.

Aos meus alunos da UNIFUCAMP (2015-atual), por me ensinarem a arte da docência, por me mostrarem a importância da empatia e por me ensinarem tanto quanto eu os ensinei. Em especial à V Turma de Engenharia Civil da UNIFUCAMP, que apesar de pequena, tem o meu coração pelo apoio que me deram desde o início dessa caminhada no doutorado.

Em especial aos meus orientadores, Vanderlei de Oliveira Ferreira e Vinicius Francisco Rofatto, pela amizade, por toda ajuda, pelas discussões e trocas de ideias ao longo deste período, por sua empatia em muitos momentos e por todo o suporte fornecido.

Por fim, mas não menos importante, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro a esta pesquisa; à Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica e Monte Carmelo, por oferecer os locais e ferramentas necessários para a pesquisa; e à Agência Nacional de Águas (ANA) pelos dados disponibilizados.

"Mas os que esperam no Senhor renovarão as suas forças. Voarão alto como águias; correrão e não ficarão exaustos, caminharão e não se cansarão." (Isaías 40:31)

"Não fui eu que lhe ordenei? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar." (Josué 1:9)

RESUMO

As mudanças climáticas têm impactado significativamente a frequência e intensidade dos eventos extremos de precipitação, tornando-se um desafio para regiões como o estado de Minas Gerais, Brasil. Nesta tese, foi realizada uma análise detalhada e metodologicamente rigorosa para compreender esses impactos, utilizando dados brutos de precipitação de 232 estações pluviométricas distribuídas por Minas Gerais ao longo de 44 anos (1977-2021), sem preenchimento de falhas. A escolha de trabalhar com dados brutos assegurou a integridade e autenticidade das informações coletadas, permitindo uma análise precisa e confiável dos extremos de precipitação e seus padrões ao longo do tempo. Diferentemente de outras abordagens que realizam análises por estações do ano, a tese adotou uma abordagem mensal, possibilitando a identificação de padrões sazonais e tendências específicas de cada mês. Esta abordagem capturou variações temporais mais sutis e detalhadas, oferecendo percepções sobre como os eventos extremos ocorrem ao longo do ano, evidenciando nuances que poderiam ser perdidas em análises sazonais mais amplas. A aplicação do *downscaling* estatístico foi um destaque metodológico que permitiu adaptar projeções climáticas globais para uma escala mais local e detalhada. Essa técnica foi essencial para compreender como as mudanças climáticas influenciam os padrões de precipitação extrema em diferentes regiões de Minas Gerais, fornecendo uma visão precisa da variabilidade e dos extremos de precipitação em nível regional. Ao utilizar dados de estações pluviométricas locais, o estudo conseguiu identificar padrões que poderiam ser mascarados em análises com menor resolução, oferecendo um quadro mais completo da distribuição dos eventos extremos no estado. Os resultados evidenciaram uma tendência de diminuição nos extremos de precipitação durante o mês de janeiro em todo o estado, enquanto os meses de fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro apresentaram um aumento significativo desses eventos. A análise espacial revelou que a região central de Minas Gerais apresenta maior estabilidade nos padrões de precipitação extrema, enquanto as regiões leste e nordeste demonstraram maior variabilidade e tendências de diminuição dos extremos. Estes achados refletem a influência de processos climáticos locais e globais, indicando que as mudanças climáticas estão impactando de maneira diferenciada a distribuição e a intensidade dos eventos extremos em diferentes regiões do estado. A utilização de testes estatísticos como ADF (*Augmented Dickey-Fuller*), KPSS (*Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin*), Mann-Kendall e Mann-Kendall Modificado permitiu identificar e confirmar as tendências e os padrões não estacionários nas séries temporais de precipitação. A combinação desses testes reforçou a robustez da análise, garantindo a identificação precisa das tendências associadas às mudanças climáticas. Esta pesquisa é particularmente relevante no contexto das mudanças climáticas, pois oferece uma compreensão detalhada da variabilidade e das tendências dos eventos extremos de precipitação em escala local. A decomposição das séries temporais de algumas das estações com tendência significativa, tanto de aumento quanto de diminuição, principalmente as que mostraram comportamentos não estacionários, mostrou que houve mudança nos padrões da precipitação local, sugerindo que isso possa ocorrer por fenômenos climáticos sazonais, mas principalmente pelas mudanças climáticas globais. Os resultados obtidos são essenciais para aprimorar as previsões climáticas regionais e desenvolver estratégias eficazes de adaptação e mitigação mais localizadas em Minas Gerais. Ao fornecer informações detalhadas sobre a influência das mudanças climáticas nos padrões de precipitação extrema, a tese contribui significativamente para a elaboração de políticas públicas voltadas à gestão de recursos hídricos, planejamento urbano, agricultura e prevenção de desastres naturais. Em conclusão, a pesquisa representa uma contribuição significativa para a compreensão da variabilidade climática em Minas Gerais e reforça a necessidade de utilizar dados brutos, análises mensais e técnicas como o *downscaling* estatístico para entender os impactos das mudanças climáticas em nível regional. As informações geradas por esta tese oferecem subsídios valiosos para aprimorar as previsões climáticas locais e enfrentar os desafios associados aos eventos extremos de precipitação no estado de Minas Gerais.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, precipitação extrema, *downscaling* estatístico, séries temporais, tendências climáticas, variabilidade climática, previsões locais.

ABSTRACT

Climate change has significantly impacted the frequency and intensity of extreme precipitation events, posing a challenge for regions such as the state of Minas Gerais, Brazil. In this thesis, a detailed and methodologically rigorous analysis was conducted to understand these impacts, using raw precipitation data from 232 rain gauge stations distributed across Minas Gerais over 44 years (1977-2021), without data imputation. The decision to work with raw data ensured the integrity and authenticity of the collected information, allowing for an accurate and reliable analysis of precipitation extremes and their patterns over time. Unlike other approaches that analyze seasonal data, this thesis adopted a monthly approach, enabling the identification of seasonal patterns and trends specific to each month. This approach captured more subtle and detailed temporal variations, offering insights into how extreme events occur throughout the year, highlighting nuances that could be overlooked in broader seasonal analyses. The application of statistical downscaling was a methodological highlight, allowing the adaptation of global climate projections to a more local and detailed scale. This technique was essential for understanding how climate change influences extreme precipitation patterns in different regions of Minas Gerais, providing an accurate view of precipitation variability and extremes at the regional level. By using data from local rain gauge stations, the study was able to identify patterns that might be masked in analyses with lower resolution, offering a more complete picture of the distribution of extreme events in the state. The results showed a trend of decreasing precipitation extremes during January across the state, while the months of February, March, October, November, and December showed a significant increase in such events. Spatial analysis revealed that the central region of Minas Gerais exhibits greater stability in extreme precipitation patterns, while the eastern and northeastern regions demonstrated greater variability and trends of decreasing extremes. These findings reflect the influence of local and global climate processes, indicating that climate change is differentially impacting the distribution and intensity of extreme events across the state. The use of statistical tests such as ADF (Augmented Dickey-Fuller), KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin), Mann-Kendall, and Modified Mann-Kendall allowed for the identification and confirmation of trends and non-stationary patterns in precipitation time series. The combination of these tests strengthened the robustness of the analysis, ensuring the precise identification of trends associated with climate change. This research is particularly relevant in the context of climate change, as it offers a detailed understanding of the variability and trends of extreme precipitation events at the local scale. The decomposition of the time series from some stations with significant trends, both of increase and decrease, especially those that showed non-stationary behaviors, revealed that there has been a shift in local precipitation patterns. This suggests that such changes may be driven by seasonal climate phenomena, but mainly by global climate change. The results are crucial for improving regional climate predictions and developing more localized adaptation and mitigation strategies in Minas Gerais. By providing detailed information on the influence of climate change on extreme precipitation patterns, the thesis makes a significant contribution to the development of public policies aimed at water resource management, urban planning, agriculture, and natural disaster prevention. In conclusion, the research represents a significant contribution to understanding climate variability in Minas Gerais and underscores the need to use raw data, monthly analyses, and techniques such as statistical downscaling to understand the impacts of climate change at the regional level. The information generated by this thesis offers valuable insights to enhance local climate forecasts and address the challenges associated with extreme precipitation events in the state of Minas Gerais.

Keywords: Climate change, extreme precipitation, statistical downscaling, time series, climate trends, climate variability, local forecasts.

Sumário

CAPÍTULO 1 - ÁREA DE ESTUDOS E BASE DE DADOS	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA	13
1. 2 O ESTADO DE MINAS GERAIS	17
1.3 BASE DE DADOS.....	21
1.4 ESTRUTURA DA TESE	22
REFERÊNCIAS	25
CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DOS EXTREMOS PLUVIOMÉRICOS EM MINAS GERAIS: UMA ABORDAGEM BASEADA NOS MÉTODOS DE BLOCK MAXIMA E PERCENTIS CONVENCIONAIS	29
2.1 INTRODUÇÃO	30
2.2 MATERIAL E MÉTODO	31
2.2.1 BLOCK MÁXIMA E PERCENTIS	31
2.2.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
2.2.1 ANÁLISE TEMPORAL DA FREQUÊNCIA E INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO EXTREMA EM MINAS GERAIS.....	35
2.2.1.1 Análise temporal dos extremos pluviométricos diários.....	35
2.2.1.2 Análise temporal dos extremos pluviométricos por Block Maxima	52
2.2.2 ANÁLISE ESPACIAL DA FREQUÊNCIA E INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO EXTREMA EM MINAS GERAIS.....	73
2.2.2.1 Análise da distribuição espacial dos extremos pluviométricos: abordagem dos percentis convencional	73
2.2.2.2 Análise da distribuição espacial dos extremos pluviométricos: abordagem Block Maxima.....	82
CONCLUSÕES	87
REFERÊNCIAS	90
3.1. INTRODUÇÃO	97
3.1.1. OBJETIVOS DO CAPÍTULO.....	99
3.1.1.1 Objetivo Geral	99
3.1.1.2 Objetivos Específicos	100
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	100
3.2.1. TESTES DE ESTACIONARIEDADE E TENDÊNCIA.....	100
0	10
3.2.1.1 Dickey-Fuller (ADF)	101
3.2.1.3. Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS)	102
3.2.1.4. Mann Kendall (MK)	103
3.2.1.5. Mann Kendall Modificado (MK_m)	104
3.2.2. SEN'S SLOPE OU ESTIMADOR DE THEIL-SEM	105
3.2.3 TESTES DE AUTOCORRELAÇÃO	107

3.2.3.1. <i>Teste Ljung Box</i>	107
3.2.3. FAC (Função de Autocorrelação) e FACP (Função de Autocorrelação Parcial)	109
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	110
3.3.1 ESTACIONARIDADE, TENDÊNCIAS E MAGNITUDES NAS SÉRIES TEMPORAIS DE EXTREMOS PLUVIOMÉTRICOS.....	111
3.4 CONCLUSÕES	145
CAPÍTULO 4 - DECOMPOSIÇÃO E ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS	153
4.1. INTRODUÇÃO	154
4.1.1 OBJETIVOS DO CAPÍTULO.....	155
4.1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	155
4.1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	155
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	155
4.2.1 DECOMPOSIÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS.....	155
4.2.2.1 Método Clássico (Média Móvel).....	157
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	158
4.3.1 ANÁLISES DA DECOMPOSIÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS COM TENDÊNCIAS SIGNIFICATIVAS DE DIMINUIÇÃO NO P95	158
4.3.3 ANÁLISES DA DECOMPOSIÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS COM TENDÊNCIAS SIGNIFICATIVAS DE DIMINUIÇÃO NO P99	179
4.3.4 ANÁLISES DA DECOMPOSIÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS COM TENDÊNCIAS SIGNIFICATIVAS DE AUMENTO NO P99	191
4.4 CONCLUSÕES	207
REFERÊNCIAS	210
CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS	212
Perspectivas futuras	213

CAPÍTULO 1 - ÁREA DE ESTUDOS E BASE DE DADOS

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

O sistema climático terrestre é regido pela interação entre seus componentes principais: atmosfera, hidrosfera, criosfera, biosfera e litosfera IPCC (2007). Perturbações em qualquer um desses componentes geram consequências que afetam todo o sistema, podendo ser causadas por fatores naturais ou antrópicos. Em escala global, os fatores antrópicos são representados principalmente pelas mudanças na composição química da atmosfera, notadamente a liberação de gases de efeito estufa, que vêm aumentando consideravelmente nos últimos dois séculos, e de maneira ainda mais acentuada nas últimas décadas (Reboita *et al.*, 2018).

O relatório do IPCC (2022) confirma que as mudanças climáticas atuais são reais, causadas por atividades humanas, e têm se tornado cada vez mais intensas nos últimos 2 mil anos. Essas mudanças trazem consequências muito graves para a população e o planeta, incluindo a intensificação de tempestades, secas severas e ondas de calor extremo. Desde 1950, a frequência e a intensidade desses eventos climáticos extremos aumentaram em grande parte dos continentes e devem se agravar nas próximas décadas, proporcionalmente ao aquecimento global. Caso a temperatura média do planeta aumente 4,0°C em relação ao período de 1850-1900 antes de 2100, o número de eventos climáticos extremos pode se tornar significativamente maior em algumas regiões. O que as caracteriza é a significância da alteração sofrida pelo sistema climático. A Mudança climática (MC) é uma variação estatisticamente significativa nas condições médias do clima ou em sua variabilidade, persistente por um longo período de tempo

O grau de refinamento das análises sobre as mudanças climáticas e das projeções para o futuro aumentou consideravelmente nos últimos anos. A diferença entre as análises realizadas no AR5 (IPCC, 2013) e no AR6 (IPCC, 2022) ilustra esse progresso. Enquanto o AR5 relatava ser "extremamente provável" a influência humana como a causa principal do aquecimento observado desde meados do século XX, o AR6 utiliza o termo "inequívoco" para descrever essa influência, acrescentando mais certeza e contundência ao fato.

Segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2003) os eventos climáticos extremos são os causadores das principais catástrofes naturais atuais; essa organização classifica os eventos extremos em duas categorias: eventos simples, definidos a partir de variações estatísticas, como temperaturas muito elevadas ou muito baixas; e eventos complexos, como secas, inundações e furacões. Para (Barbosa & Rosa, 2004) os eventos extremos são aqueles cujos valores têm magnitudes muito superior ou inferior ao valor médio,

indo além da variabilidade normal. SAREWITZ & PIELKE (2001) afirmam que esses eventos são caracterizados como ocorrências que apresentam uma incidência rara, distanciando-se da média e, variando em sua magnitude.

Os desastres climáticos representaram metade de todos os desastres ambientais entre 1970 e 2019, concentrando 45% de todas as mortes reportadas e 74% de todas as perdas econômicas (WMO, 2024). Entre os principais desastres, as secas foram as mais mortais, causando 650 mil mortes, seguidas por tempestades (577,2 mil mortes), inundações (58,7 mil mortes) e eventos de temperaturas extremas (55,7 mil mortes). Na América do Sul, as enchentes causaram o maior número de desastres (59%), a maior perda de vidas (77%) e a maior perda econômica (58%) no período analisado.

Não apenas o clima médio está mudando, mas também os extremos climáticos. De modo geral, quanto maior o aquecimento, maior a frequência e a intensidade de eventos extremos, e maior a probabilidade de que eventos raros se tornem comuns (Rocha, 2021). A média global de precipitação sobre a terra aumentou desde 1950, com uma taxa de aumento mais rápida desde a década de 1980. A influência humana contribuiu para esse padrão de mudanças observadas na precipitação desde meados do século XX. As rotas das tempestades de latitude média mudaram em direção aos polos em ambos os hemisférios desde a década de 1980, com marcada sazonalidade nas tendências (IPCC, 2022).

Como já evidenciado, os eventos extremos de precipitação têm aumentando em intensidade e frequência nos últimos 50 anos. Por isso, ganharam destaque nas discussões e pesquisas no que tange a pauta de mudanças climáticas, devido aos seus impactos significativos em diversas áreas, como meio ambiente, agricultura, infraestrutura e gestão de recursos hídricos (Silva, Marengo & Lemes, 2024; Donat *et al.*, 2016; Hosseinzadehtalaei, Tabari & Willems, 2020; IPCC, 2022; Marengo *et al.*, 2024).

De acordo com o Relatório de Síntese de Mudanças Climáticas (IPCC, 2022), as projeções indicam um aumento na frequência e intensidade de precipitações intensas, resultando em maior risco de inundações locais, principalmente na Europa, Ásia, América do Norte e do Sul, sendo esta última agravada pelos fenômenos El Niño e La Niña. Em relação às secas, as projeções indicam que os riscos relacionados às mudanças climáticas tendem a se intensificar e interligar no curto prazo, incluindo um aumento na probabilidade de eventos compostos, como ondas de calor e secas simultâneas, nas regiões mediterrâneas, Austrália, África Subsaariana e partes da América do Sul, principalmente em áreas semiáridas. Esses impactos podem levar a aumentos nos preços dos alimentos, redução da renda familiar e riscos

à saúde, como desnutrição e mortalidade relacionada ao clima. Projeções com um alto nível de confiança mostram que, com um aumento da temperatura de 2°C ou mais, essas mudanças se expandem para mais regiões e se tornam mais significativas, com projeções de secas agrícolas e ecológicas mais frequentes e severas em várias regiões do mundo (IPCC, 2022).

As simulações para o Brasil indicam que o aumento gradativo na temperatura média tornará o clima mais quente e seco na região Norte, podendo alterar gravemente o equilíbrio ecossistêmico da Amazônia. No Nordeste, já naturalmente seco, isso pode acarretar impactos significativos para a segurança hídrica, energética e alimentar. A região central da América do Sul, onde está concentrada a maior parte do agronegócio brasileiro, deverá registrar um maior aumento na temperatura e na frequência e intensidade das ondas de calor, além de períodos secos mais prolongados. O Sudeste do Brasil se tornaria mais quente e mais suscetível a extremos climáticos hídricos. Na região Sul do Brasil, são esperadas mais chuvas fortes e de grandes volumes de água, com aumento já observado nas precipitações (IPCC, 2022; PBMC, 2014).

Diante desse contexto, a análise e caracterização das tendências de ocorrência de eventos extremos de precipitação se torna crucial, fazendo com que cada vez mais pesquisas sejam realizadas a fim de desenvolver estratégias de adaptar e mitigar os impactos relacionados à crise hídrica (Reis *et al.*, 2024; Neto *et al.*, 2016; Viola *et al.*, 2015), à agricultura (Júnior *et al.*, 2012; Sondermann *et al.*, 2022; Zilli *et al.*, 2020) e à infraestrutura, perdas materiais e sócio econômicas (Avila-Diaz *et al.*, 2020; Dalagnol *et al.*, 2022; Drumond, Almeida & Nascimento, 2023; Perez *et al.*, 2020).

Analizando os dados do AR6 (IPCC, 2022), nota-se que Minas Gerais está localizado em uma área de transição entre o que os modelos globais mostram com maior convicção para o Sul, Norte e Nordeste do país, em relação ao nível de incerteza das previsões para eventos extremos de precipitação. Paralelamente a isso, os dados do ATLAS BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS e da Defesa Civil (Universidade Federal de Santa Catarina; Naturais, 2012), indicam que, entre 1999 e 2021, Minas Gerais registrou diversos desastres hidrológicos e climatológicos, sendo mais comuns as estiagens e secas (44,53%), seguidas por chuvas intensas (18,48%), enxurradas (15,03%), inundações (13,69%), movimentos de massa (4,16%) e alagamentos (2,47%). Apesar da maior frequência de estiagem e secas, os desastres mais letais foram as chuvas intensas, responsáveis por 30,34% dos óbitos, seguidas por enxurradas (26,9%), inundações (14,71%) e movimentos de massa (12,64%).

Os anos mais críticos em termos de óbitos foram 2003 (62 mortes), 2005 (57 mortes) e 2020 (59 mortes). O maior número de óbitos ocorreu nos meses de primavera e verão, especialmente em janeiro (182 óbitos), dezembro (90), fevereiro (69) e novembro (60). As regiões mais afetadas foram o Vale do Rio Doce e a Região Metropolitana de Belo Horizonte, enquanto a ocorrência de estiagem e secas foi mais frequente no norte do estado.

Para entender e demonstrar a influência humana no clima, os modelos numéricos são fundamentais. Os relatórios do IPCC utilizam modelos de circulação atmosférica, globais e regionais, para simular e projetar o clima. Esses modelos têm avançado consideravelmente, aumentando a resolução espacial e incluindo novos componentes do sistema climático (PBMC, 2014). No entanto, as escalas espaciais dos modelos de circulação geral (MCG), que variam de 240 a 600 km, são inadequadas para estudos de impactos locais. Portanto, o refinamento de escala (*downscaling*) dessas projeções climáticas, que envolve a incorporação de informações locais, é crucial para áreas com topografia complexa, ilhas, regiões costeiras ou uso do solo heterogêneo (Abdollahipour; Ahmadi; Aminnejad, 2022; Keller *et al.*, 2022; Murphy, 1999; Vrac *et al.*, 2007; Wilby *et al.*, 2004).

Os métodos de *downscaling* estatístico são amplamente utilizados no sentido de refinar a escala de modelagem e previsão de eventos extremos, principalmente os de precipitação. Esses métodos classificam-se em três categorias: métodos baseados na classificação de padrões de tempo (*weather typing*), geradores de clima (*weather generators*) e métodos de regressão, (Wilby *et al.*, 2004). A pesquisa realizada se enquadra no "downscaling estatístico," uma abordagem amplamente utilizada em estudos climáticos para traduzir informações de uma escala global ou continental para um contexto mais regional ou local. Enquanto os relatórios do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) realizam análises de extremos de precipitação em uma escala global, a presente pesquisa se diferencia ao focar na escala estadual, analisando individualmente os extremos de precipitação para cada estação pluviométrica e para cada mês de uma série histórica no estado de Minas Gerais.

O *downscaling* estatístico é um processo que utiliza técnicas estatísticas para estabelecer relações entre variáveis em larga escala e dados observacionais em uma escala menor, a fim de obter projeções ou análises mais detalhadas em nível local. Este método é especialmente relevante em pesquisas climáticas, pois os modelos globais, como os utilizados pelo IPCC, muitas vezes não conseguem capturar as nuances e variações que ocorrem em escalas espaciais menores.

A análise baseia-se em dados observacionais coletados ao longo de 44 anos (1977 - 2021), provenientes de 232 estações pluviométricas em Minas Gerais, dando a característica de *downscaling* estatístico à pesquisa, que trabalha com séries históricas detalhadas para capturar variações locais. Utilizando técnicas estatísticas como percentis (95 e 99), o método de block maxima, testes de tendência e estacionariedade (Mann-Kendall, ADF, KPSS) e decomposição de séries temporais, foi possível identificar padrões específicos de extremos pluviométricos em uma escala espacial (estações) e temporal (mensal) mais refinada do que a proporcionada pelos modelos globais.

Enquanto o IPCC trabalha em escalas globais, a pesquisa realizada aqui desagregou essas informações para uma escala estadual e por estações, permitindo entender a ocorrência de extremos pluviométricos em detalhes que são cruciais para a gestão e planejamento local. Ao analisar cada estação e cada mês separadamente, a pesquisa fornece percepções que os modelos globais de baixa resolução não conseguem capturar.

O *downscaling* estatístico é fundamental para estudos que buscam entender como fenômenos globais, como as mudanças climáticas, se manifestam em contextos regionais e locais. Assim, essa pesquisa visa contribuir para esse entendimento e fornecer uma análise detalhada e precisa dos extremos pluviométricos em Minas Gerais, o que é crucial para a tomada de decisões em setores como agricultura, recursos hídricos e gestão de desastres.

Em suma, a pesquisa representa um exemplo claro de *downscaling* estatístico, que utiliza dados locais e técnicas estatísticas para traduzir informações sobre extremos pluviométricos em uma escala estadual/local e oferecer uma análise relevante e aplicável para a realidade de Minas Gerais, do que as análises em larga escala feitas por órgãos globais como o IPCC.

1. 2 O ESTADO DE MINAS GERAIS

O estado de Minas Gerais, está localizado na região Sudeste do Brasil entre as latitudes 14°13'58"S e 22°54'00"S e as longitudes 39°51'32"W e 51°02'35"W, fazendo fronteira com os estados da Bahia, Goiás, Mato Grosso do Sul, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e o Distrito Federal (MMA, 2021) e possui uma área de aproximadamente 586.753 km², sendo uma região de grande importância em termos de recursos hídricos e gestão de água (Abreu *et al.*, 2022). É um dos maiores produtores de alimentos do Brasil, possui rios fundamentais para a geração de energia elétrica e um significativo potencial turístico, sendo essas atividades particularmente vulneráveis a eventos extremos.

Os principais sistemas meteorológicos dinâmicos que afetam o estado de Minas Gerais, juntamente com os fatores estáticos, condicionam a significativa diversidade climática, mas de forma geral, a região apresenta um clima tropical, com variações de acordo com a altitude, distância em relação ao oceano e atuação diferenciada de sistemas atmosféricos. É conhecida por ter estações distintas de chuva e seca. Durante o verão, especialmente entre dezembro e março, ocorrem chuvas intensas, enquanto o inverno é mais seco. As temperaturas na região sudeste costumam ser mais amenas, com variações de acordo com a altitude. A umidade relativa do ar nessa região pode variar, sendo mais elevada durante o verão e menor durante o inverno.

Também é uma área bastante suscetível a eventos extremos, como secas, enchentes e deslizamentos de terra, que podem ser influenciados por fenômenos climáticos globais, como o El Niño e as mudanças climáticas. A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é um dos principais sistemas meteorológicos que afetam Minas Gerais, especialmente durante a estação chuvosa. Esse fenômeno resulta em chuvas contínuas e intensas que podem durar vários dias, sendo uma característica marcante do clima da região (Abreu, 1998), muitas vezes associada a desastres naturais como deslizamentos de terra e inundações (Brasiliense *et al.*, 2018; Drumond *et al.*, 2021; Teixeira & Satyamurty, 2011).

Os sistemas convectivos de mesoescala, também são responsáveis por eventos de precipitação intensa e localizada no estado. Estes sistemas podem ser bastante comuns durante a estação chuvosa e são associados a tempestades e trovoadas. Estudos indicam que áreas com grandes altitudes têm maior incidência desses eventos (Reis *et al.*, 2018). A Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) é outro fenômeno que pode influenciar a ocorrência de chuvas em Minas Gerais. Este sistema está associado à convergência de umidade em níveis médios da atmosfera, promovendo a formação de nuvens e precipitação intensa (Campos *et al.*, 2016). Portanto, o estado é afetado por uma combinação de sistemas meteorológicos que são responsáveis por uma significativa variabilidade climática e eventos extremos de precipitação.

O estado é muito afetado por precipitações de origem orográfica e ciclônica, com frentes frias de origem polar - com chuvas de longa duração e de baixa a média intensidade, caracterizadas por um sistema atmosférico frontal, e frentes quentes e úmidas oriundas da região equatorial (Amazônia), que caracterizam um sistema atmosférico não frontal (Mello & Silva, 2008).

Foram identificados três principais grupos climáticos no estado: A (tropical chuvoso), B (seco) e C (temperado quente). Dentro desses grupos, as classes climáticas observadas foram Aw e Am no grupo A; BSh no grupo B; Cwa e Cwb no grupo C. Cada classe possui

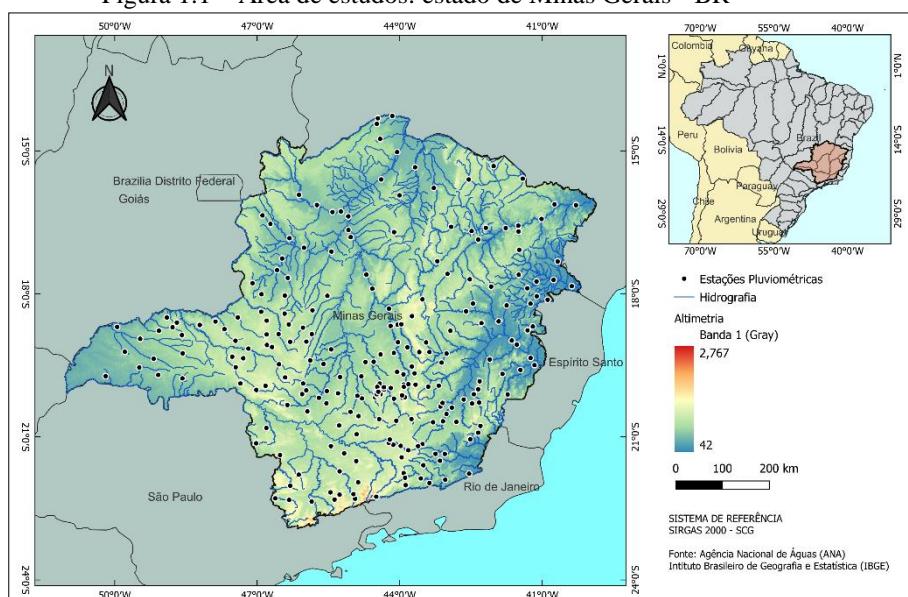
características específicas, como estações secas e úmidas, temperaturas médias mensais e padrões de precipitação, que influenciam as condições climáticas da região e são relevantes para atividades agrícolas e de planejamento (Júnior *et al.*, 2012).

A topografia acidentada da região sul do estado, especialmente a Serra da Mantiqueira, influencia significativamente as variáveis atmosféricas. Modelos climáticos de alta resolução mostram que a remoção da topografia resulta em aumentos na temperatura média mensal e na precipitação acumulada (Oliveira, Reboita & Rocha, 2018). O estado possui uma diversidade de paisagens, resultantes da combinação de processos relacionados a variados fatores fisiográficos, é composto por serras, planaltos e superfícies de erosão, especialmente na interface entre o Cráton São Francisco e o Orógeno Araçuaí (Costa, 2021).

Além disso, como ocorre em todo o Brasil, o estado enfrenta desigualdades sociais e uma gestão inadequada de problemas socioambientais, o que pode colocar uma parcela considerável da população em risco. Muitos moradores vivem em áreas de encostas ou nas margens dos rios, em condições precárias de habitação, tornando-se especialmente suscetíveis a desastres naturais como enchentes e deslizamentos (Natividade *et al.*, 2016).

A Figura 1.1 mostra o estado de Minas Gerais, com sua hidrografia principal e suas altitudes nas diferentes regiões do estado, assim como a distribuição das estações pluviométricas utilizadas na pesquisa.

Figura 1.1 – Área de estudos: estado de Minas Gerais - BR



Fonte: A autora (2024)

A hidrografia de Minas Gerais é um de seus aspectos mais marcantes, abrigando a maior quantidade de nascentes no Brasil, o que lhe vale o título de "Caixa d'Água do Brasil" (ANA,

2024). Minas Gerais é cortado por importantes bacias hidrográficas, como: a Bacia do Rio São Francisco, que percorre o estado de sul a norte; a Bacia do Rio Doce, que corta o leste de Minas Gerais; a Bacia do Rio Grande e a Bacia do Rio Paranaíba, que fazem parte da Bacia do Paraná; e a Bacia do Rio Jequitinhonha, que ocupa parte do nordeste do estado (IGAM, 2024). Esses rios desempenham um papel fundamental para o abastecimento de água, geração de energia hidrelétrica e irrigação.

Essas características físicas e naturais tornam Minas Gerais um estado de grande diversidade geográfica e climática, o que reflete sua riqueza hídrica, variedade de paisagens e importância para a economia e o meio ambiente do Brasil.

Em termos de características climáticas o estado está inserido no regime de Monção da América do Sul, o que significa que a maior parte da precipitação ocorre durante meados da primavera a meados do outono do ano seguinte (Silva et al., 2014; Reboita et al., 2018). Sendo esse o período mais propício para a ocorrência de eventos de precipitação intensa. Além disso, devido à topografia complexa de MG, com as serras do Espinhaço e da Mantiqueira, ocorre a formação de circulações locais que influenciam o clima local (Campos, Carvalho & Reboita, 2016; Oliveira, Reboita & Rocha, 2018). Assim, os processos climáticos locais precisam ser modelados e avaliados com maior precisão, pois mesmo os modelos regionais ainda não conseguem fazer esse trabalho com alta precisão, devido as características do Estado.

O ATLAS BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS (1991-2012), traz que o Estado de Minas Gerais possui 1.155 registros oficiais de enxurradas severas caracterizadas como desastre, entre os anos de 1991 e 2012. A Mesorregião da Zona da Mata foi a mais afetada, com 24% dos desastres, seguida das mesorregiões Vale do Rio Doce e Metropolitana de Belo Horizonte, com 19% e 17% das enxurradas registradas, respectivamente. Nordeste de Minas e Central Mineira foram as mesorregiões menos afetadas, com 1% e 2%, respectivamente. Os mais de mil eventos de enxurrada afetaram 2.160.311 mineiros, deixando 32 mil desabrigados, 159,5 mil desalojados e ocasionando o falecimento de 112 pessoas. Todos esses eventos foram desencadeados por eventos de precipitação extrema.

Segundo REIS et al. (2018), estudos para Minas Gerais têm avaliado a tendência da temperatura do ar e precipitação em séries históricas, bem como a tendência de eventos extremos dessas variáveis, e também utilizado modelos climáticos globais para projetar o futuro climático do Estado.

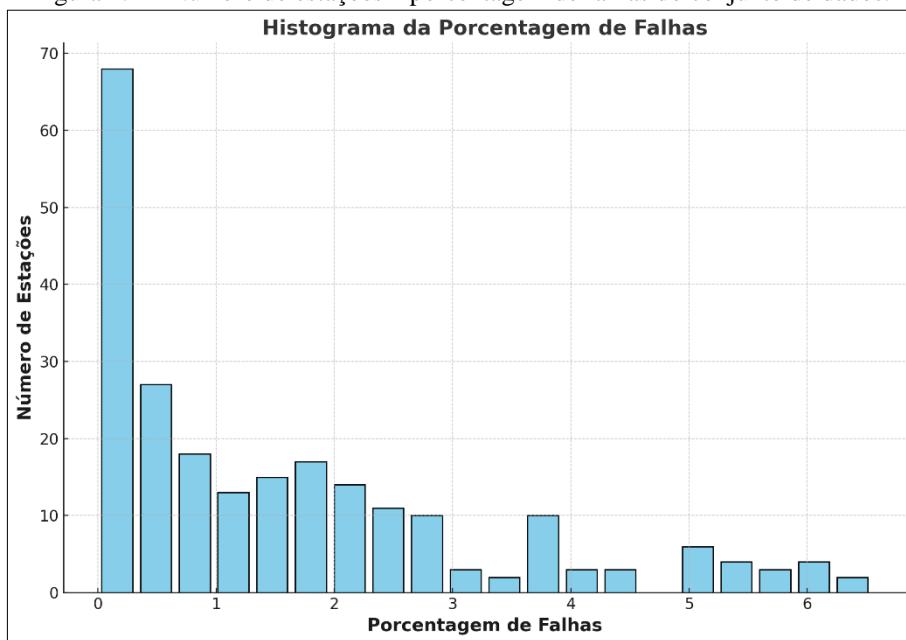
1.3 BASE DE DADOS

Para a presente pesquisa, foram adquiridos dados de precipitação diária de 318 Postos pluviométricas distribuídas por todo o estado de Minas Gerais, fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA), no formato Access, contendo diversas planilhas com totais diários, máximos e mínimos mensais, totais mensais, número de dias com chuva e um gráfico mostrando a pluviometria diária ao longo dos anos. Esses arquivos podem ser visualizados no software HIDRO, também fornecido pela ANA. Com efeito, é possível verificar os postos que possuem falhas muito extensas (mais de 5 anos) em uma estação e já descartá-las em uma primeira análise, deixando apenas as que possuem falhas mínimas e que passaram por uma vistoria mais fina.

Após a análise inicial, constatou-se que 86 apresentavam grandes lacunas nas séries temporais, restando 237 estações. Após uma vistoria mais cuidadosa e fina das séries temporais, segundo os seguintes critérios: se uma estação apresentasse três meses de dados faltantes no inverno ou um mês faltante no verão, o ano correspondente seria descartado. Caso o número de anos eliminados excedesse 10% dos dados da estação, esta seria excluída da pesquisa. Assim das 237 estações, apenas cinco delas não passaram pelos critérios descritos, restando 232 estações, razoavelmente bem distribuídas por todo o estado. Como é possível observar ainda na Figura 1.2, nenhum dos postos apresentou mais que 7% de falhas nos dados, sendo que quase 84% das séries possuem menos de 3% de falhas e quase 10% delas possuem falhas entre 3% e 5%, garantindo a consistência do conjunto total dos dados e da série histórica.

Os 86 postos com lacunas significativas foram excluídos, pois o objetivo foi trabalhar com séries de dados de igual duração para todos as estações pluviométricas, abrangendo o período de 1977 a 2021, totalizando 44 anos.

Figura 1.2 – Número de estações x porcentagem de falhas do conjunto de dados.



Fonte: A Autora (2024).

É importante destacar que os valores nulos não foram preenchidos, utilizando-se os dados brutos dos postos para evitar a inserção de qualquer tipo de viés nas estimativas. Além disso, os valores de *outliers* não foram eliminados, uma vez que o principal objetivo da pesquisa é identificar e avaliar a frequência e a magnitude dos extremos, sendo estes precisamente os valores que se desviam significativamente da média.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

A tese foi organizada de forma a proporcionar uma análise aprofundada e sistemática dos eventos extremos de precipitação em Minas Gerais, Brasil, com o objetivo de compreender os impactos das mudanças climáticas na região. A estrutura foi cuidadosamente elaborada para apresentar, de forma clara e coerente, a fundamentação teórica, a metodologia aplicada, os resultados obtidos e as discussões que sustentam as conclusões da pesquisa, porém em um formato que traz esses itens para cada capítulo, dinamizando a leitura. A organização da tese se dá da seguinte:

Capítulo 1 – Considerações Iniciais, área de estudo e base de Dados

O primeiro capítulo apresenta a introdução à temática da tese, o qual contextualiza a importância de estudar os eventos extremos de precipitação no cenário das mudanças climáticas globais em escalas locais. Nesta seção, são discutidos os principais problemas enfrentados por

Minas Gerais em relação a eventos climáticos extremos e a relevância de compreender esses fenômenos para o desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação. Além disso, são explicitados os objetivos gerais e específicos da pesquisa, bem como a justificativa para a sua realização. Além disso, a área de estudo é detalhada, destacando as características geográficas, climáticas e hidrológicas de Minas Gerais. É apresentada também a base de dados utilizada na pesquisa, que inclui informações pluviométricas diárias de 232 estações ao longo de 44 anos (1977-2021), fornecendo um panorama completo das fontes de dados e critérios de seleção.

Capítulo 2 – Caracterização dos Extremos de Precipitação com Técnicas de Block Maxima e Percentis

Este capítulo é dedicado à análise estatística dos extremos de precipitação, utilizando técnicas como Block Maxima (BM) e percentis para identificar e caracterizar os eventos extremos. A aplicação dessas metodologias permitiu a identificação de padrões sazonais, bem como a avaliação da intensidade e frequência dos eventos extremos em diferentes regiões de Minas Gerais. A escolha por análises mensais, em vez de análises sazonais ou anuais, é destacada como um diferencial da pesquisa, permitindo uma compreensão mais detalhada dos extremos de precipitação ao longo do tempo. Além disso, o capítulo apresenta e discute os resultados, evidenciando as vantagens e desvantagens de cada metodologia utilizada.

Capítulo 3 – Análises de Tendência e Estacionariedade

No quarto capítulo da tese é abordada a identificação de tendências, as magnitudes dessas tendências e a avaliação da estacionariedade das séries temporais de precipitação. Testes estatísticos como ADF (*Augmented Dickey-Fuller*), KPSS (*Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin*), Mann-Kendall e Mann-Kendall Modificado foram aplicados conjuntamente, para verificar a presença de tendências e padrões não estacionários. Esta análise é fundamental para compreender as variações temporais dos eventos extremos e suas possíveis associações com as mudanças climáticas.

Além disso, o capítulo apresenta a aplicação de uma metodologia utilizando técnicas estatísticas avançadas, que pode ser considerada uma técnica de *downscaling* estatístico, as quais permitiram a adaptação das análises climáticas globais para uma escala mais local e detalhada em Minas Gerais, o que foi essencial para compreender a influência das mudanças climáticas nos padrões de precipitação extrema, fornecendo uma análise em alta resolução que possibilitou a identificação de variações regionais específicas.

Capítulo 4 – Decomposição das séries temporais: tendências, sazonalidade e resíduos

O capítulo aborda a decomposição e análise de séries temporais de precipitação extrema em diferentes estações meteorológicas de Minas Gerais ao longo de 44 anos, para os percentis 95 e 99 com o objetivo de identificar temporalmente os eventos de precipitação intensa, tendências e possíveis mudanças nos padrões de precipitação. A metodologia aplicada foi o método aditivo, que separou os componentes de tendência, sazonalidade e ruído nas séries temporais. O capítulo destaca tendências de diminuição e aumento da magnitude de precipitação em diferentes estações e meses, apresentando resultados que são fundamentais para compreender as variações climáticas regionais e a formulação de estratégias de adaptação e mitigação na gestão de recursos hídricos e prevenção de desastres naturais.

Capítulo 5 – Conclusões Finais e Perspectivas Futuras

O último capítulo apresenta as conclusões da tese, onde são ressaltadas as principais contribuições do estudo para a compreensão dos eventos extremos de precipitação e das mudanças climáticas em Minas Gerais. Além disso, são sugeridas perspectivas futuras para a continuidade da pesquisa, como a integração de variáveis climáticas adicionais, o uso de modelos preditivos mais avançados e a realização de estudos comparativos com outras regiões, visando aprimorar ainda mais o entendimento dos impactos das mudanças climáticas sobre os eventos extremos de precipitação.

REFERÊNCIAS

ABDOLLAHIPOUR, Arman; AHMADI, Hassan; AMINNEJAD, Babak. A review of downscaling methods of satellite-based precipitation estimates.: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00669-4>

ABREU, Magda Luzimar de. Climatologia Da Estação Chuvosa De Minas Gerais: De Nimer (1977) à Zona De Convergência Do Atlântico Sul. *Geonomos*, v. 6, n. 2, p. 17–22, 1998. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v6i2.166>

ABREU, Marcel Carvalho et al. Daily Rainfall Disaggregation to Estimate the Intensity-Duration-Frequency Relationship in Minas Gerais State, Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 65, 2022. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2022210694>

ANA. ANA., 2024. Disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br/>..

AVILA-DIAZ, Alvaro et al. Climatological aspects and changes in temperature and precipitation extremes in viçosa-Minas Gerais. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, v. 92, n. 2, p. 1–19, 2020. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020190388>

BARBOSA, Eduardo B M; ROSA, Reinaldo. Caracterizacao por ondeletas de processos fisicos nao-lineares na micro-bacia amazonica. [s. l.], n. January, 2004.

BRASILIENSE, Camila Silva et al. Synoptic analysis of an intense rainfall event in Paraíba do Sul river basin in southeast Brazil. *Meteorological Applications*, v. 25, n. 1, p. 66–77, 2018. <https://doi.org/10.1002/met.1670>

CAMPOS, Bruno de et al. Extreme rainfall weather events in the Southern Minas Gerais State, Brazil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 9, n. 7, 2016. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160166>

CAMPOS, Bruno; CARVALHO, Vanessa S. B.; REBOITA, Michele S. Sistema numérico-operacional de previsão de tempo para a região Sul de Minas Gerais: comparação com dados observados. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 09 n04, n. 1984–2295, p. 9, 2016. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160070>

COSTA, LUIS RICARDO FERNANDES DA. Considerations About the Geomorphological Macrournities of the State of Minas Gerais – Brazil/Considerações Sobre As Macrournidades Geomorfológicas Do Estado De Minas Gerais – Brasil. *William Morris Davis – Revista de Geomorfologia*, v. 2, n. 1, p. 11–18, 2021. <https://doi.org/10.48025/ISSN2675-6900.v2n1.2021.109>

DA SILVA, Rodrigo Cesar; MARENKO, José Antônio; RUV LEMES, Murilo. Analysis of extreme rainfall and landslides in the metropolitan region of the Paraíba do Sul River Valley and North Coast of São Paulo, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 2024. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3513624/v1>

DA SILVA, Luciano José; REBOITA, Michelle Simões; DA ROCHA, Rosmeri Porfírio. Relação Da Passagem De Frentes Frios Na Região Sul De Minas Gerais (Rsmg) Com a Precipitação E Eventos De Geadas. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 14, n. 1, p. 229–246, 2014. <https://doi.org/10.5380/abclima.v14i1.36314>

DALAGNOL, Ricardo et al. Extreme rainfall and its impacts in the Brazilian Minas Gerais state in January 2020: Can we blame climate change?. *Climate Resilience and Sustainability*, v. 1, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.1002/clr2.15>

DE JÚNIOR, Arionaldo Sá et al. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 108, n. 1–2, p. 1–7, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0507-8>

DONAT, Markus G. et al. More extreme precipitation in the worldâ€TM s dry and wet regions. *Nature Climate Change*, v. 6, n. 5, p. 508–513, 2016. <https://doi.org/10.1038/nclimate2941>

DRUMOND, Anita et al. Dry and wet climate periods over eastern south america: Identification and characterization through the spei index. *Atmosphere*, v. 12, n. 2, p. 1–15, 2021. <https://doi.org/10.3390/atmos12020155>

DRUMOND, Rafael Augusto Santos; ALMEIDA, Renan Pereira; NASCIMENTO, Nilo de Oliveira. Mudanças climáticas e Plano Diretor: mitigação de inundações em Belo Horizonte. *Cadernos Metrópole*, v. 25, n. 58, p. 899–922, 2023. <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2023-5806>

HOSSEINZADEHTALAEI, Parisa; TABARI, Hossein; WILLEMS, Patrick. Climate change impact on short-duration extreme precipitation and intensity–duration–frequency curves over Europe. *Journal of Hydrology*, v. 590, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125249>

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas - Igam. 2024.

IPCC. IPCC Sixth Assessment Report - Synthesis Report. 2022.

IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546013>

KELLER, Arturo A. et al. Downscaling approaches of climate change projections for watershed modeling: Review of theoretical and practical considerations. *PLOS Water*, v. 1, n. 9, p. e0000046, 2022. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000046>

MARENGO, Jose A et al. Heavy rains and hydrogeological disasters on February, 2024.

MELLO, Carlos R. de; SILVA, Antônio M. da. Modelagem estatística da precipitação mensal e anual e no período seco para o estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 1, p. 68–74, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000100010>

MURPHY, James. An Evaluation of Statistical and Dynamical Techniques for Downscaling Local Climate. 1999. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2256:AEOSAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2256:AEOSAD>2.0.CO;2)

NATIVIDADE, Ulisses Antônio et al. Tendência dos Índices de Extremos Climáticos Observados e Projetados no Estado de Minas Gerais Trend of Observed and Projected Extreme Climate Indices in Minas Gerais State. *Cadernos*, v. 32, n. 4, p. 600–614, 2016. <https://doi.org/10.1590/0102-7786324008>

OLIVEIRA, Debora Martins; REBOITA, Michelle Simões; ROCHA, Rosmeri Porfirio da. A influência da topografia da região sul de Minas Gerais nas variáveis atmosféricas simuladas

com o RegCM4. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 11, n. 2, p. 758–772, 2018.
<https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.6.p758-772>

PBMC. Primeiro Relatório de Avaliação Nacional Sobre Mudanças Climáticas, realizado pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Base científica das mudanças climáticas, p. 348, 2014.

PEREZ, Letícia Palazzi et al. Climate change and disasters: Analysis of the Brazilian regional inequality. Sustentabilidade em Debate, v. 11, n. 3, p. 260–277, 2020.
<https://doi.org/10.18472/Sust Deb.v11n3.2020.33813>

REBOITA, Michelle Simões et al. Cenários De Mudanças Climáticas Projetados Para O Estado De Minas Gerais. Revista Brasileira de Climatologia, v. 1, n. November, 2018.
<https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60524>

REIS, André Luiz dos et al. Climatologia e eventos extremos de precipitação no estado de Minas Gerais. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 07, n. 1, n. ISSN 0034, p. 82, 2018.
<https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.61074>

REIS, Guilherme Barbosa et al. Influence of anthropogenic effects and climate variability on streamflow in a Brazilian tropical watershed. Theoretical and Applied Climatology, 2024.
<https://doi.org/10.1007/s00704-024-04936-4>

RIBEIRO NETO, Alfredo et al. Hydrological Processes and Climate Change in Hydrographic Regions of Brazil. Journal of Water Resource and Protection, v. 08, n. 12, p. 1103–1127, 2016. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.812087>

ROCHA, Vinícius Machado. Um breve comentário a respeito do IPCC AR6. Revista Entre-Lugar, v. 12, n. 24, p. 396–403, 2021. <https://doi.org/10.30612/rel.v12i24.15253>

SAREWITZ, Daniel; PIELKE, Roger. Extreme events: A research and policy framework for disasters in context. International Geology Review, v. 43, n. 5, p. 406–418, 2001.
<https://doi.org/10.1080/00206810109465022>

SONDERMANN, Marcely et al. Climate change projections and impacts on the eucalyptus plantation around the Doce River basin, in Minas Gerais, Brazil. Climate Services, v. 28, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ciser.2022.100327>

TEIXEIRA, Mateus da Silva; SATYAMURTY, Prakki. Trends in the frequency of intense precipitation events in southern and southeastern Brazil during 1960-2004. Journal of Climate, v. 24, n. 7, p. 1913–1921, 2011. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3511.1>

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA; NATURAIS, Centro Universitário De Estudos E Pesquisas Sobre Desastres. Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012. Atlas. 2012.

VIOLA, M. R., DE MELLO, C. R., CHOU, S. C., YANAGI, S. N. M., & GOMES, J. L. Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. International Journal of Climatology, v. 35, p. 1378–1391, 2015.
<https://doi.org/10.1002/joc.4038>

VRAC, Mathieu et al. A general method for validating statistical downscaling methods under future climate change. *Geophysical Research Letters*, v. 34, n. 18, 2007.

<https://doi.org/10.1029/2007GL030295>

WHO. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data. p. 1–187, 2003.

WILBY, R L et al. Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods Document history. 2004.

WMO. State of the Global Climate 2023. 2024.

ZILLI, Marcia et al. The impact of climate change on Brazil's agriculture. *Science of the Total Environment*, v. 740, p. 139384, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139384>

CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DOS EXTREMOS PLUVIOMÉRICOS EM MINAS GERAIS: UMA ABORDAGEM BASEADA NOS MÉTODOS DE BLOCK MAXIMA E PERCENTIS CONVENCIONAIS

RESUMO

Esta pesquisa visa avaliar o desempenho de dois métodos estatísticos para caracterizar a distribuição espacotemporal da frequência e intensidade de extremos de precipitação em Minas Gerais, a técnica do percentil convencional e a técnica de Block Maxima (BM). A pesquisa mostrou que os percentis diários convencionais revelam padrões sazonais e tendências climáticas, fornecendo uma análise granular, mas podem subestimar a frequência de eventos extremos mais intensos. Em contraste, os percentis com base nos BM focaram nos blocos de máximos mensais e anuais dos dados diários, destacando mudanças na intensidade e frequência de eventos extremos, eliminando ruídos de dias sem chuva e capturando anos e meses, com maior sensibilidade. Na análise espacial os percentis de BM destacam regiões com precipitação de grandes magnitudes, superiores ao que já se considera extrema e que podem causar desastres ainda mais graves em relação a técnica convencional. Ou seja, a técnica do BM mostrou uma sensibilidade superior na identificação de extremos de grandes magnitudes, o que é essencial para planejamento de infraestrutura e na mitigação de desastres. A combinação de ambos os métodos é capaz de oferecer uma análise mais robusta e consistente na identificação de locais com potencial de grandes desastres, além de servir como base para estudos mais aprofundados em relação ao tempo de recorrência e análise de tendências com maior precisão e consistência.

Palavras-chave: Extremos pluviométricos. Percentis. Block Maxima.

This research aims to evaluate the performance of two statistical methods for characterizing the spatiotemporal distribution of the frequency and intensity of extreme precipitation in Minas Gerais: the conventional percentile technique and the Block Maxima (BM) technique. The study showed that conventional daily percentiles reveal seasonal patterns and climate trends, providing granular analysis but potentially underestimating the frequency of more intense extreme events. In contrast, percentiles based on BM focused on the monthly and annual maxima of daily data, highlighting changes in the intensity and frequency of extreme events, eliminating noise from dry days, and capturing years and months with greater sensitivity. In the spatial analysis, BM percentiles highlight regions with magnitudes of precipitation greater than those considered extreme, which could cause even more severe disasters compared to the conventional technique. In other words, the BM technique showed superior sensitivity in identifying high-magnitude extremes, which is essential for infrastructure planning and disaster mitigation. The combination of both methods offers a more robust and consistent analysis in identifying locations with the potential for major disasters and serves as a basis for further studies on recurrence times and trend analysis with greater precision and consistency.

Keywords: Rainfall Extremes. Percentiles. Block Maxima.

2.1 INTRODUÇÃO

A análise e caracterização das tendências de ocorrência de eventos extremos de precipitação se torna crucial, fazendo com que cada vez mais pesquisas sejam realizadas a fim de desenvolver estratégias de adaptar e mitigar os impactos relacionados à crise hídrica (Reis *et al.*, 2024; Neto *et al.*, 2016; Viola *et al.*, 2015), à agricultura (Júnior *et al.*, 2012; Sondermann *et al.*, 2022; Zilli *et al.*, 2020) e à infraestrutura, perdas materiais e sócio econômicas (Avila-Diaz *et al.*, 2020; Dalagnol *i.*, 2022; R. A. S. Drumond *et al.*, 2023; Perez *et al.*, 2020).

A caracterização de eventos extremos em Minas Gerais vem sendo realizada por diversos estudos sobre a intensidade e frequência de ocorrência desses eventos. Alguns dos estudos mais relevantes incluem trabalhos de (Avila-Diaz *et al.*, 2020; Campos *et al.*, 2016; Carvalho *et al.*, 2002; da Silva *et al.*, 2024b; Dalagnol *et al.*, 2022; Donat *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2024; Hosseinzadehtalaei *et al.*, 2020; Hu *et al.*, 2020; Lima & Armond, 2022; Mallick *et al.*, 2021; Natividade *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2024; Tavares, 2024; Viola *et al.* 2015; Zakaria *et al.*, 2017).

No entanto, todas as pesquisas nacionais e grande parte das internacionais utilizam a técnica convencional dos percentis para delimitar os valores extremos de precipitação. Essa técnica frequentemente descarta os valores mais altos, que são considerados *outliers* e classificados como erros de registro nos postos pluviométricos.

Outro problema recorrente é a falta de consistência dos dados, o que leva a maioria das pesquisas a trabalhar com séries temporais mais curtas para obter um número maior de postos pluviométricos. Alternativamente, algumas pesquisas utilizam séries temporais mais longas, mas com poucos postos, extrapolando os resultados para regiões inteiras ou até mesmo bacias hidrográficas. Isso pode resultar em interpretações equivocadas. Além disso, trabalhar com dados consistidos, onde as falhas são preenchidas, também pode introduzir vieses nos dados, influenciando os resultados, especialmente quando se trata de eventos raros, como os extremos. Esse cenário apresenta desafios significativos na caracterização precisa de eventos extremos de precipitação em Minas Gerais, destacando a necessidade de melhorias nas técnicas de coleta e análise de dados.

Nesta contribuição, objetiva-se caracterizar os extremos de precipitação no estado de Minas Gerais, utilizando métodos estatísticos avançados para identificar e compreender os padrões espaciais e temporais desses eventos extremos. A análise é realizada em duas etapas principais: a identificação de máximos mensais e anuais por meio da técnica de Block Maxima,

e a comparação de percentis calculados a partir de todos os dados diários com aqueles calculados a partir dos valores máximos mensais e anuais.

A técnica de Block Maxima (BM) é uma abordagem estatística utilizada na análise de extremos, especialmente na modelagem de eventos extremos como chuvas intensas, temperaturas extremas, etc. Nesta técnica é realizada a divisão do conjunto de dados em blocos de igual tamanho, como meses ou anos. Posteriormente é feita a seleção de máximos para cada bloco, onde os valores máximos são identificados e registrados. E finalmente os valores máximos de cada bloco são então analisados para entender a distribuição dos eventos extremos (Ceresetti *et al.*, 2012; Sarailidis; Tsiougkos, 2018; On the estimation of continuous 24-h precipitation maximaVan de Vyver, 2015a; Vandeskog *et al.*, 2022; Zakaria; Ahmad Radi; Satari, 2017).

Aqui, as análises são realizadas à luz dos máximos mensais e anuais utilizando BM, bem como percentis 95 e 99, para cada uma das 232 estações pluviométricas em Minas Gerais. Com efeito, destaca-se nesta pesquisa as diferenças entre os percentis calculados a partir de toda a série de dados diários e aqueles calculados apenas a partir dos máximos mensais e anuais identificados pela BM.

Por fim, destaca-se que este estudo visa contribuir para uma melhor compreensão dos padrões de precipitação extrema em Minas Gerais, fornecendo informações úteis para tomadores de decisão e profissionais envolvidos na gestão de recursos hídricos e planejamento urbano. Ao comparar diferentes métodos de análise de extremos, busca-se também fornecer uma base sólida para futuras pesquisas e estratégias de mitigação de riscos associados a eventos climáticos extremos.

2.2 MATERIAL E MÉTODO

2.2.1 BLOCK MÁXIMA E PERCENTIS

Na análise de extremos de precipitação, os percentis e a técnica de Block Maxima são dois métodos amplamente utilizados, cada um com suas particularidades e aplicabilidades específicas. Na análise de dados de precipitação, os percentis 95 e 99 são frequentemente utilizados para identificar dias com precipitação intensa, classificando-os como eventos extremos. Enquanto a técnica de Block Maxima é utilizada para capturar os eventos de precipitação mais extremos dentro de intervalos de tempo definidos, concentrando-se nos valores máximos. Os valores máximos são extraídos para cada bloco de dados diários (mensal,

anual) e podem ser modelados usando distribuições de valores extremos, como a DGVE (Distribuição Generalizada de Valores Extremos).

Nesta técnica é realizada a divisão do conjunto de dados em blocos de igual tamanho, como meses ou anos. Posteriormente é feita a seleção de máximos para cada bloco. O valor máximo é, então, identificado e registrado. E finalmente é feita a análise dos máximos de cada bloco para entender a distribuição dos eventos extremos pluviométricos (Ceresetti *et al.*, 2012; Sarailidis; Tsougkos, 2018; Van de Vyver, 2015b; Vandeskog *et al.*, 2022; Zakaria; Ahmad Radi; Satari, 2017).

O método BM consiste em agrupar os dados em blocos de igual comprimento e ajustar os dados para o conjunto de máximos de bloco. Suponha que X_1, X_2, \dots, X_n é uma sequência de variáveis independentes e identicamente distribuídos associada à uma função de distribuição de probabilidade $F(x)$. A distribuição de estatística de máximos é dada segundo a Eq. (2.1):

$$M_n = \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad (2.1)$$

Onde:

- X_i : representa uma variável aleatória dentro de um conjunto de observações. Essas variáveis podem ser, por exemplo, medições de precipitação diária, temperatura, ou qualquer outra variável de interesse.
- M_n : é o valor máximo entre todas as variáveis X_1, X_2, \dots, X_n . Ou seja, é o maior valor observado em uma amostra de n observações.

Os dados dos máximos do bloco são geralmente modelados usando a Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV), como Gumbel, Weibull e Fréche, (Zakaria, Ahmad Radi & Satari, 2017).

Para a presente pesquisa, os valores máximos foram identificados dentre todos os dias de todos os meses da série histórica de 1977 a 2021 (44 anos), por mês e ano, em cada estação pluviométrica. Isso corresponde à primeira etapa do método BM, que consiste em dividir a série temporal em blocos. Depois de identificar os valores máximos de cada bloco, foram então gerados os percentis 95 e 99 dos valores máximos já identificados. Esta etapa é uma análise adicional na estatística descritiva (percentis) dos valores máximos identificados. Portanto, essa metodologia incorpora o método Block Maxima e estende a análise ao calcular percentis dos valores máximos selecionados, fornecendo uma visão detalhada dos extremos em diferentes níveis de severidade, o que traz um diferencial para esta pesquisa em relação as que já foram

realizadas nessa área no mundo, mas especialmente no Brasil (Almazroui, 2020; Costa *et al.*, 2020; Krishnamurthy, Lall & Kwon, 2009; Oliveira, Santos & Silva; Lima, 2017; Wasko *et al.*, 2021).

A técnica dos percentis também é amplamente utilizada para a determinação de limiares de valores extremos de precipitação ou classes de precipitação, pois permitem uma análise detalhada da distribuição dos dados de precipitação, como demonstram diversos estudos nessa área (Abreu *et al.*, 2022; Marengo & Lemes, 2024a; Lima & Armond, 2022; Néto & Santos, 2022; Oliveira; Santos & Silva; Lima, 2017; Teixeira & Satyamurty, 2011b), tornando-se fundamental para diversas aplicações em climatologia, incluindo a previsão de eventos climáticos severos, planejamento de uso dos recursos hídricos e gestão de desastres.

No contexto da distribuição de precipitação diária extrema, os percentis podem ser usados para determinar a frequência e a magnitude de eventos extremos de precipitação em relação aos dados observados, auxiliando na avaliação de riscos e na tomada de decisões em projetos de engenharia e planejamento hidrológico (Papalexiou, Koutsoyiannis & Makropoulos, 2013).

Quanto mais alto o percentil, mais raro e extremo é o evento representado por esse valor. Por exemplo, o percentil 90 indica que apenas 10% dos dados estão acima desse valor, tornando-o um evento relativamente raro, (Camuffo, Becherini & della Valle, 2019). A diferença entre percentis de séries regulares e irregulares está relacionada à natureza da coleta de dados e à frequência de observações ao longo do tempo. Em séries regulares, os dados são coletados em intervalos uniformes e predefinidos, como diário, mensal ou anual, como é o caso dessa pesquisa. E as observações são registradas em intervalos consistentes, o que resulta em uma distribuição regular de dados ao longo do tempo. Para séries regulares, os percentis são calculados com base na distribuição dos dados coletados em intervalos fixos, facilitando a análise estatística e a identificação de eventos extremos (Maidment, 2002).

Os P95 e P99 são valores significativos em séries regulares, especialmente quando se trata de identificar eventos extremos e raros. O P95 indica o valor abaixo do qual 95% dos dados estão localizados e acima do qual apenas 5% dos dados estão posicionados. Em uma série regular, como a empregada aqui, o P95 é útil para identificar eventos que ocorrem com mais frequência do que os eventos extremos representados por percentis mais altos, como o P99. Por exemplo, ao analisar a precipitação diária, o P95 pode representar os dias com eventos de chuva que ocorrem em 5% do tempo, indicando eventos relativamente intensos, mas não tão raros quanto os representados pelo P99. O percentil 99 representa o valor abaixo do qual 99% dos

dados estão localizados, tornando-o um indicador de eventos extremamente raros e excepcionais. Em séries regulares, o P99 é crucial para identificar eventos extremos, como tempestades severas, inundações intensas ou outras ocorrências climáticas extremas. Ao analisar a precipitação diária, por exemplo, o P99 pode representar os eventos de chuva intensa que ocorrem apenas 1% do tempo (Camuffo, Becherini & della Valle, 2020).

Esses percentis são amplamente utilizados em análises climáticas, hidrológicas e de risco para avaliar a probabilidade de ocorrência de eventos extremos, sendo essenciais para definir limiares para eventos significativos e calcular períodos de retorno associados a eventos raros.

Aqui os P95 e P99, foram calculados tanto para os dados pluviométricos diários, quanto para os máximos determinados pelo BM. No primeiro caso representam valores de precipitação abaixo dos quais 95% e 99% de todos os dias estão. Estes valores são geralmente mais baixos devido à inclusão de dias com pouca ou nenhuma precipitação. No segundo, tem-se valores abaixo dos quais 95% e 99% dos máximos mensais ou anuais estão. Estes valores são mais altos, pois se baseiam apenas nos valores extremos de precipitação, ou seja, apenas nos máximos dos blocos.

Logo percentis calculados a partir de todos os dados diários fornecem uma visão ampla da distribuição diária da precipitação, enquanto os percentis calculados a partir dos máximos mensais e anuais destacam a intensidade dos eventos extremos de precipitação. Ambos são úteis, mas em contextos diferentes, dependendo da natureza da análise e do tipo de planejamento necessário.

A análise geral dos dados diários dos postos foi realizada para identificar os valores de precipitação extrema em diferentes localidades do Estado de Minas Gerais. Com base nesses dados de precipitação diária para os 232 postos pluviométricos da série histórica de 44 anos (1977 a 2021), foram obtidos os valores máximos (MAX) e os percentis 95 (P95) e 99 (P99), para cada estação, por mês e por ano, salientando que os valores zero, considerados dias sem chuva, também foram incluídos nos cálculos. Assim, para cada mês identificou-se o valor máximo entre todos os valores diários, gerando um conjunto de doze máximos, um por mês, para cada ano da série histórica de 44 anos, para cada estação pluviométrica, totalizando assim uma tabela com mais de 122 mil registros de dados diários compilados em MAX, P95 e P99. Com base nos resultados compilados então, focando nos valores máximos, foram gerados os percentis 95 e 99 dos máximos (Block Maxima).

2.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.2.1 ANÁLISE TEMPORAL DA FREQUÊNCIA E INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO EXTREMA EM MINAS GERAIS

2.2.1.1 *Análise temporal dos extremos pluviométricos diários*

É importante salientar que o número de postos pluviométricas abrange de uma forma bastante completa todas as regiões do estado, com um número de anos relativamente extenso e um número de falhas de apenas 3% em mais de 80% das estações, sendo utilizados apenas os dados brutos, para não gerar nenhum tipo de viés nos resultados, devido ao preenchimento das mesmas. Isso traz um diferencial para a pesquisa, já que a grande maioria dos estudos e análises realizados, utiliza dados com preenchimento de falhas ou dados de reanálise, com um número bem menor de postos, devido ao tempo e esforço computacional, além de utilizar também períodos diferentes nas séries históricas para cada região e extrapolar o resultado para regiões inteiras ou bacias hidrográficas.

Nessa primeira análise, mesmo observando resultados mais gerais em relação aos valores extremos, já é possível fornecer algumas percepções importantes sobre a variabilidade e as tendências das precipitações extremas no estado de Minas Gerais, de uma forma geral.

As Figura 2.1 (a, b, c e d) mostram os gráficos das distribuições anuais dos valores MAX, P95 e P99 respectivamente, de precipitação diária para os postos pluviométricos, as cores nos boxplots refletem a intensidade dos valores medianos, com tons de azul representando diferentes níveis de intensidade.

O gráfico da figura é um boxplot que apresenta a distribuição dos valores do percentil 95 para a precipitação diária por ano, de 1977 a 2021. Para um melhor entendimento dos elementos presentes nesse e nos próximos gráficos de boxplots que serão apresentados no decorrer do trabalho, os mesmos serão detalhados cuidadosamente a seguir:

1. **Eixo Y (Percentil 95):** Representa os valores do percentil 95 da precipitação diária (em milímetros). O percentil 95 significa que 95% das observações de precipitação diária em cada ano são menores ou iguais ao valor mostrado.
2. **Eixo X (Ano):** Representa os anos, de 1977 até 2021. Para cada ano, é exibido um boxplot (caixinhas em tons de azul) correspondente à distribuição dos valores do percentil 95 da precipitação diária.
3. **Boxplots (Caixas e "Bigodes"):** Cada boxplot (caixinha) representa a distribuição

estatística dos valores de precipitação para o percentil 95 de cada ano. Os principais elementos são: a caixa principal mostra a distribuição interquartil (IQR), ou seja, os 50% centrais dos dados. A parte inferior da caixa representa o 1º quartil (25%) e a parte superior o 3º quartil (75%). Quanto mais alta ou mais larga for a caixa, maior a variabilidade entre os valores. A linha horizontal dentro da caixa: Representa a mediana dos dados, ou seja, o valor central (50%) dos valores do percentil 95. Os bigodes (linhas verticais acima e abaixo da caixa): representam o alcance dos valores que não são considerados *outliers*. Eles se estendem até 1,5 vezes o intervalo interquartil (IQR). Os pontos pretos acima dos bigodes são os *outliers*, ou seja, valores atípicos que estão significativamente acima dos outros valores de precipitação diária para aquele ano. Os Pontos vermelhos dentro das caixas representam a média dos valores do percentil 95 para cada ano. Ao contrário da mediana (que é o valor central), a média leva em consideração todos os valores e pode ser influenciada por *outliers*.

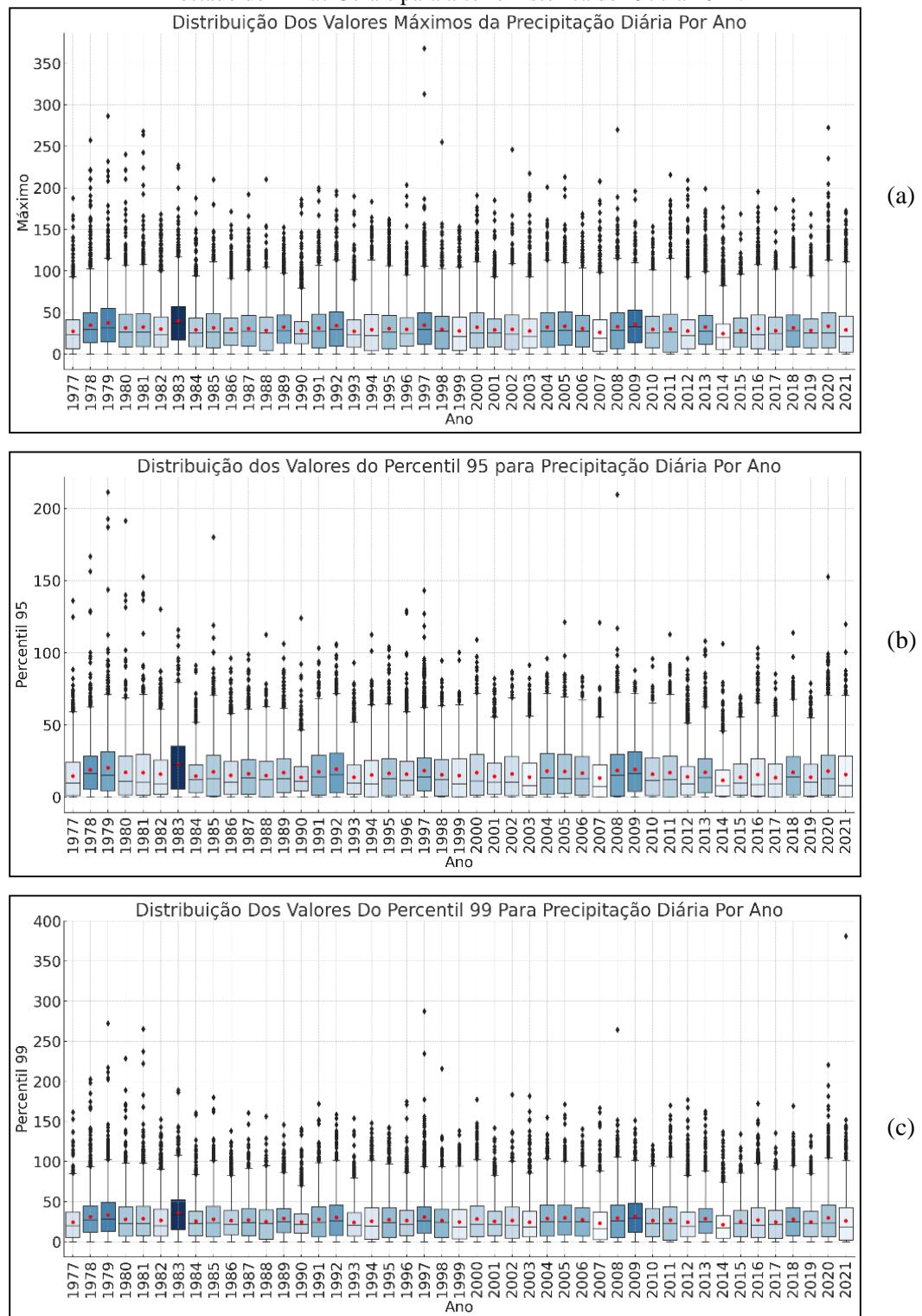
4. **Cores das caixas:** as caixas são coloridas em tons de azul, com diferentes intensidades. Este gradiente de cor parece estar relacionado à magnitude da mediana: quanto mais escura a cor, maior o valor da mediana do percentil 95 para aquele ano. Essa coloração foi ajustada para refletir a intensidade dos valores, conforme sua preferência por tons de azul em gráficos.
5. ***Outliers* (pontos pretos dispersos):** são os pontos pretos acima dos "bigodes" representam valores extremos de precipitação que se destacam do resto da distribuição. Eles são considerados *outliers* porque estão significativamente mais altos do que o restante dos valores.

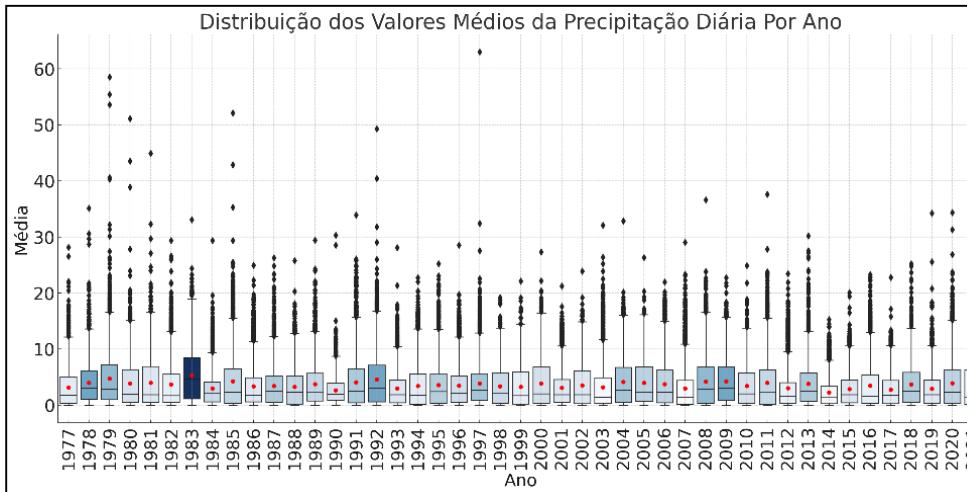
Este tipo de gráfico permite visualizar a distribuição e a variabilidade dos valores de precipitação diária acima do percentil 95 para cada ano, além de destacar a presença de *outliers* significativos. Podemos observar que anos como 1983, 1992, 2008 e outros têm mais *outliers* e uma maior variabilidade, enquanto outros anos mostram menor variabilidade na precipitação diária acima do percentil 95.

A presença de muitos *outliers* em determinados anos sugere que houve precipitações extremas nesses períodos, o que pode ser relevante para estudos de extremos pluviométricos.

A mesma lógica de interpretação serve para os gráficos seguintes, para os diferentes percentis e por mês.

Figura 2.3 - Gráficos da distribuição anual dos Máximos (a), P95 (b), P99 (c) e Médias para a precipitação no estado de Minas Gerais para a série histórica de 1977 a 2021.





Fonte: A autora (2024)

(d)

Todas as distribuições se mostram muito semelhantes, porém a distribuição dos valores do P95_Ano, mostra uma variabilidade menor em relação as distribuições dos valores de MAX_Ano e do P99_Ano, mas não menos significativa de ano para ano.

Particularmente nos anos iniciais da série, tais como 1977, 1978, 1982, 1983 e 1991, existem muitas ocorrências de *outliers* acima dos limites de concentração de 100 mm diárias, indicando que alguns postos apresentam ocorrências de precipitação bem acima do que se considera extremo, principalmente na década de 70, com uma impressão de estabilidade ao longo dos anos. De acordo com a Defesa Civil de Minas Gerais, nesses anos ocorreram chuvas intensas que causaram inundações e deslizamentos de terra em várias partes do estado. Fortes chuvas associadas ao El Niño causaram enchentes e deslizamentos de terra. Com destaque para o ano de 1983, que teve um dos mais fortes eventos de El Niño do século XX. Os impactos mais significativos ocorreram entre setembro de 1982 e março de 1983. No Brasil, as chuvas intensas foram mais pronunciadas nos meses de verão, de dezembro de 1982 a fevereiro de 1983 (Cavalcanti et al., 2016; Ropelenwski & Halpert, 1987).

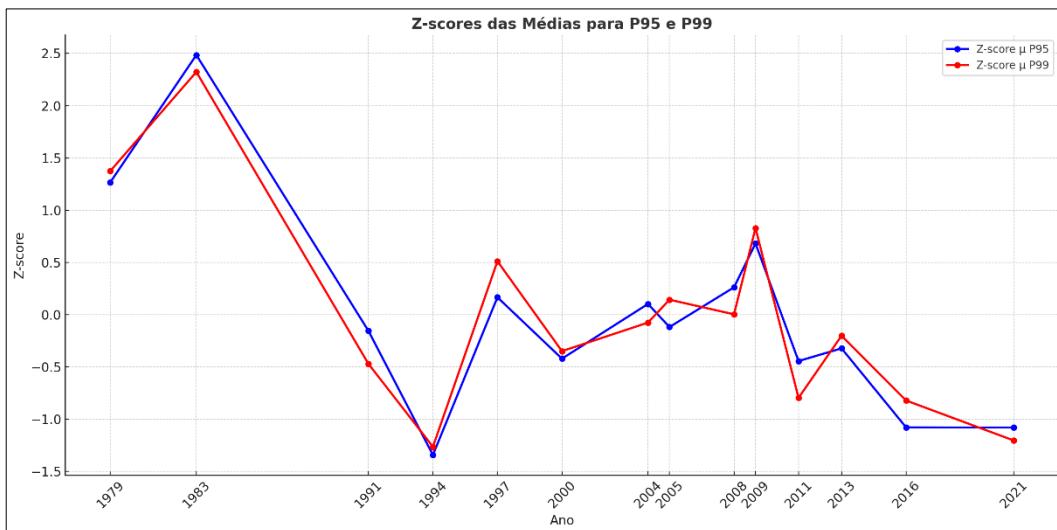
Nos anos mais recentes da série é possível notar uma maior consistência nos valores extremos, sugerindo uma possível mudança nos padrões de precipitação. Os pontos vermelhos, que representam os valores médios, tendem a se agrupar em torno da marca de 30 mm na maioria dos anos, indicando que a tendência central de precipitação média tanto de MAX_Ano, quanto dos P95_Ano e P99_Ano é relativamente estável. Os bigodes mínimos, estão em torno de 0mm (zero) e os bigodes máximos em torno dos 100 mm, para os MAX_Ano e P99_Ano e em torno de 60 e 70 mm para o P95_Ano. Os intervalos interquartis (IQR), mostram que a maioria dos dias de precipitação estão entre 10 mm e 50 mm para o MAX_Ano e P99_Ano e 10 mm e 25 mm para o P95_Ano. Isso indica que, embora existam valores extremos (*outliers*),

a maioria dos valores de precipitação diária para os MAX_Ano, P95_Ano e P99_Ano se concentram dentro de um intervalo moderado.

Com o objetivo de padronizar os dados e facilitar a comparação entre diferentes distribuições, o Z-score foi calculado para expressar a posição de um valor em relação à média do conjunto de dados, em termos de desvios padrão. Essa métrica também auxilia na identificação de *outliers* ou valores extremos, o que é crucial em análises de séries temporais e eventos extremos. O Z-score representa o desvio de uma observação em relação à média, medido em desvios padrão. Um Z-score positivo indica que a observação está acima da média, enquanto um Z-score negativo indica que está abaixo da média.

O gráfico da Figura 2.2, mostra os anos com Z-scores das médias altos: 1983 e 1979 destacam-se como anos de precipitação extrema significativa para ambos os percentis, com Z-scores positivos muito elevados (2.48 e 1.27 para μ P95 em 1983 e 1979 respectivamente; 2.32 e 1.38 para μ P99). Esses anos tiveram eventos de precipitação extrema muito acima da média. Já os anos com Z-scores Baixos: 1994, 2016, e 2021 apresentaram Z-scores negativos para μ P95 e μ P99, indicando anos com precipitação extrema bem abaixo da média. Isso sugere períodos mais secos ou menos intensos em relação a eventos extremos.

Figura 2.4 – Gráfico do Z-scores das médias dos P95 e P99 da precipitação no estado de Minas Gerais para os anos mais chuvosos da série histórica de 1977 a 2021.

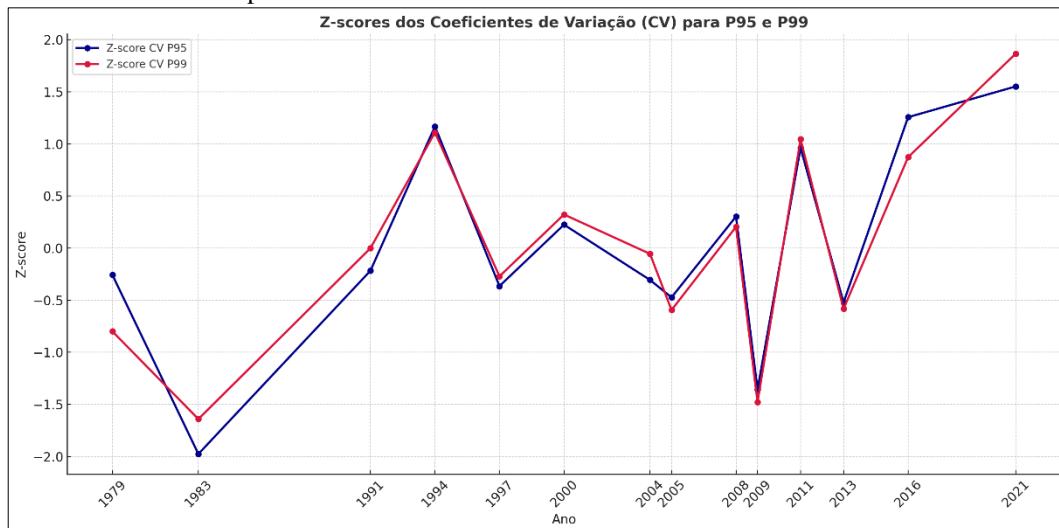


Elaboração: A autora (2024).

No gráfico da Figura 2.3 que mostra o coeficiente de variação, é possível observar a alta variabilidade relativa, no ano 2021 que apresenta um Z-score muito alto para o coeficiente de variação (CV P95 Zsc = 1.55 e CV P99 Zsc = 1.87). Isso indica que, mesmo que a média de precipitação não tenha sido a mais alta, a variabilidade relativa foi muito significativa, indicando anos com precipitações extremas que foram muito diferentes em relação à média. Os

anos com baixa variabilidade relativa: 1983 e 1979 tiveram Z-scores negativos para o CV (especialmente em P95), indicando que, embora a intensidade média dos eventos extremos fosse alta, a variabilidade relativa foi menor em comparação com outros anos.

Figura 2.3 - Gráfico do Z-scores dos Coeficientes de Variação dos P95 e P99 da precipitação no estado de Minas Gerais para os anos mais chuvosos da série histórica de 1977 a 2021.



Elaboração: A autora (2024).

A Tabela 2.1, detalha os resultados dos gráficos das Figura 2.2 e 2.3, possibilitando a verificação dos anos mais chuvosos e os com maior variabilidade, respectivamente, em relação a essas métricas, de forma mais dinâmica.

Na maioria dos anos, os valores Z-scores de P95 e P99 são bastante alinhados, o que indica que os eventos extremos seguiram padrões semelhantes em ambos os níveis de intensidade (percentil 95 e 99). Porém, há anos em que os eventos de precipitação foram mais intensos apenas em um dos percentis, como em 2021, onde P99 teve Z-scores maiores para todos os parâmetros em comparação a P95, indicando que os eventos extremos mais raros (P99) foram mais pronunciados.

Para as tendências ao longo do tempo, os dados da Tabela 2.1 sugerem períodos cíclicos de intensidade e seca em eventos extremos de precipitação. Por exemplo, há uma alta em 1983 seguida por um período de menor intensidade na década de 1990. Os anos recentes (2016 e 2021) indicam uma tendência de maior variabilidade relativa nos eventos extremos, sugerindo um comportamento mais errático, possivelmente devido a mudanças climáticas ou anomalias climáticas como El Niño ou La Niña.

Tabela 2.1– Média (μ), desvio-padrão (σ) e coeficiente de variação (CV) para os anos mais chuvosos e seu respectivos Z-scores.

Ano	μ_{95}	σ_{P95}	CV P95	μ_{P99}	σ_{P99}	CV P99	μ_{P95} Zsc	σ_{P95} Zsc	CV P95 Zsc	μ_{P99} Zsc	σ_{P99} Zsc	CV P99 Zsc
1979	20,44	19,86	0,97	33,34	27,00	0,81	1,27	2,16	-0,26	1,38	1,04	-0,80
1983	22,84	18,19	0,80	36,02	26,36	0,73	2,48	0,45	-1,98	2,32	0,47	-1,64
1991	17,64	17,22	0,98	28,13	24,87	0,88	-0,15	-0,54	-0,22	-0,47	-0,85	0,00
1994	15,30	17,10	1,12	25,89	25,56	0,99	-1,34	-0,67	1,17	-1,26	-0,24	1,11
1997	18,27	17,56	0,96	30,90	26,56	0,86	0,17	-0,20	-0,36	0,51	0,64	-0,27
2000	17,12	17,48	1,02	28,47	26,04	0,91	-0,42	-0,28	0,23	-0,35	0,18	0,32
2004	18,15	17,55	0,97	29,25	25,70	0,88	0,10	-0,20	-0,31	-0,08	-0,12	-0,05
2005	17,71	16,82	0,95	29,86	24,75	0,83	-0,12	-0,95	-0,47	0,14	-0,96	-0,59
2008	18,46	18,99	1,03	29,47	26,62	0,90	0,26	1,27	0,30	0,00	0,70	0,20
2009	19,29	16,58	0,86	31,80	23,76	0,75	0,68	-1,19	-1,36	0,83	-1,84	-1,48
2011	17,07	18,71	1,10	27,21	26,69	0,98	-0,44	0,98	0,96	-0,80	0,76	1,05
2013	17,31	16,35	0,95	28,89	23,99	0,83	-0,32	-1,43	-0,52	-0,20	-1,63	-0,58
2016	15,82	17,81	1,13	27,14	26,19	0,97	-1,08	0,06	1,26	-0,82	0,31	0,87
2021	15,82	18,29	1,16	26,06	27,55	1,06	-1,08	0,55	1,55	-1,20	1,53	1,87

Fonte: A autora (2024)

A análise revela que houve anos de precipitação extrema significativa, com variações tanto na intensidade quanto na consistência dos eventos. Os valores de Z-scores fornecem uma visão clara sobre a frequência e intensidade dos eventos extremos de precipitação, mostrando padrões temporais que podem estar associados a fenômenos climáticos globais ou regionais. A variação nos coeficientes de variação sugere que, mesmo nos anos com médias elevadas de precipitação extrema, a intensidade desses eventos não foi uniforme, reforçando a importância de entender a variabilidade no contexto de mudanças climáticas e gerenciamento de recursos hídricos de forma localizada.

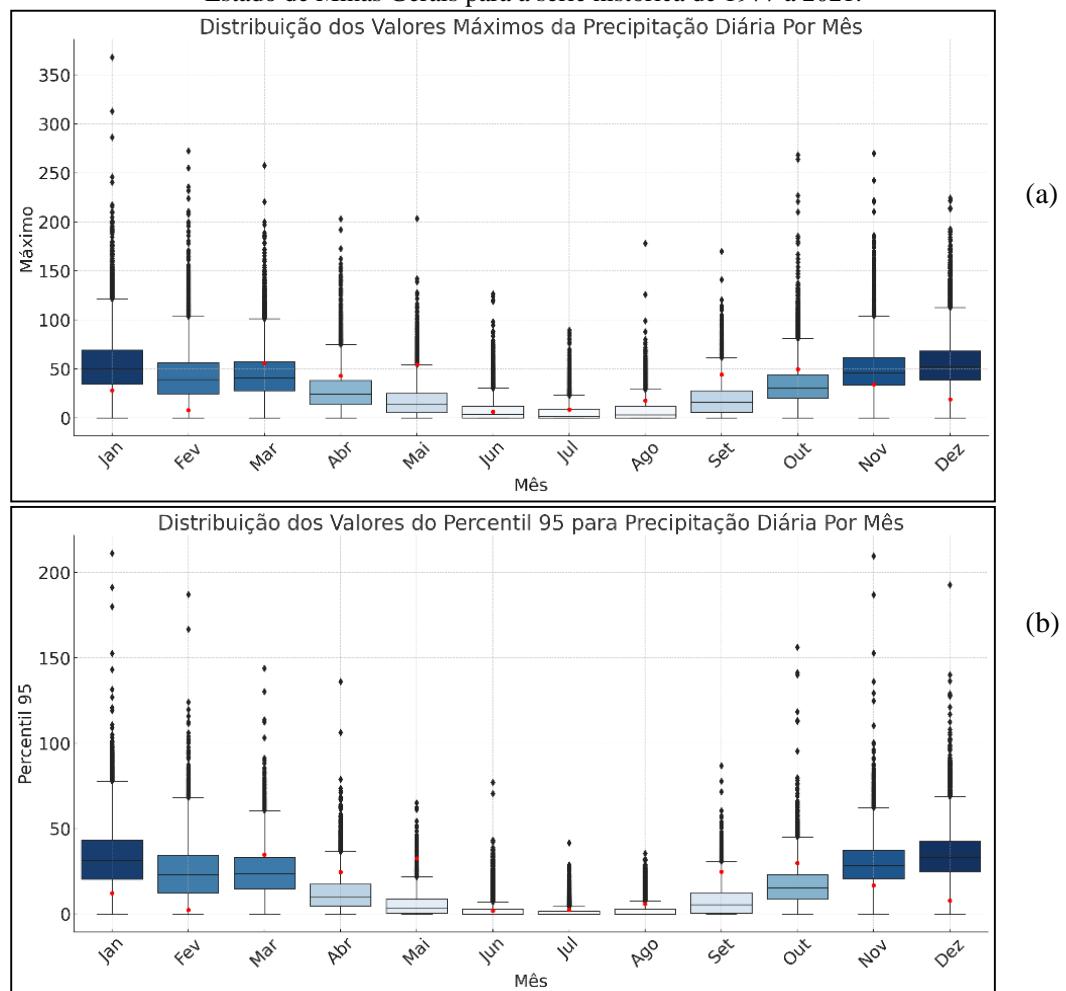
Como já mencionado, fortes chuvas associadas ao El Niño causaram enchentes e deslizamentos de terra em Minas Gerais, nesses anos. Com destaque para o ano de 1983, que teve um dos mais fortes eventos de El Niño do século XX. Os impactos mais significativos ocorreram entre setembro de 1982 e março de 1983. No Brasil, as chuvas intensas foram mais pronunciadas nos meses de verão, de dezembro de 1982 a fevereiro de 1983 (Cavalcanti et al., 2016; Ropelewski e Hailpert, 1987).

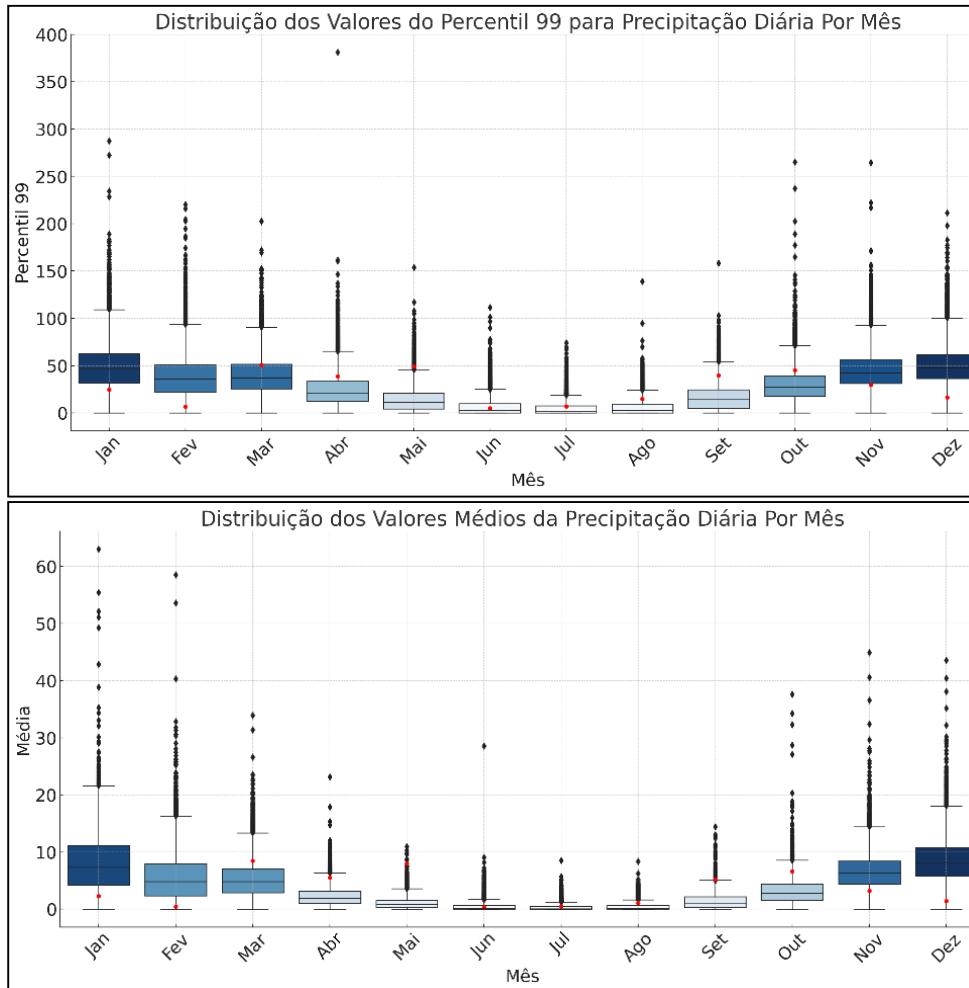
Os anos de 1997, 2008 e 2021 mostraram maiores flutuações, com picos significativos, alertando para ocorrência de precipitações ainda mais intensas em alguns locais. O El Niño de 1997-1998 também foi extremamente forte e seus efeitos foram sentidos de meados de 1997 até o início de 1998, assim como nos outros dois anos que sofreram com os fortes impactos do

fenômeno (Grimm e Tedeschi, 2009; Nobre e Shukla, 1996; Silva e Kousky, 2012). Pesquisas nos últimos anos mostram exatamente esse comportamento, porém para algumas regiões isoladas (Campos et al., 2016; Reboita et al., 2017; Reis, et al., 2018; Silva, Escobar, Reboita, 2020).

Agora analisando o comportamento dos extremos de uma perspectiva mensal, os gráficos da Figura 2.4 (a, b, c e d) mostram as distribuições dos MAX, P95, P99 e MED de precipitação para cada mês ao longo da série para todas as estações pluviométricas. Analisando essas distribuições é possível obter uma visão detalhada sobre os padrões sazonais de precipitações extremas na região.

Figura 2.4 - Gráficos da distribuição mensal dos Máximos (a), P95 (b), P99 (c) e Médias para a precipitação no Estado de Minas Gerais para a série histórica de 1977 a 2021.



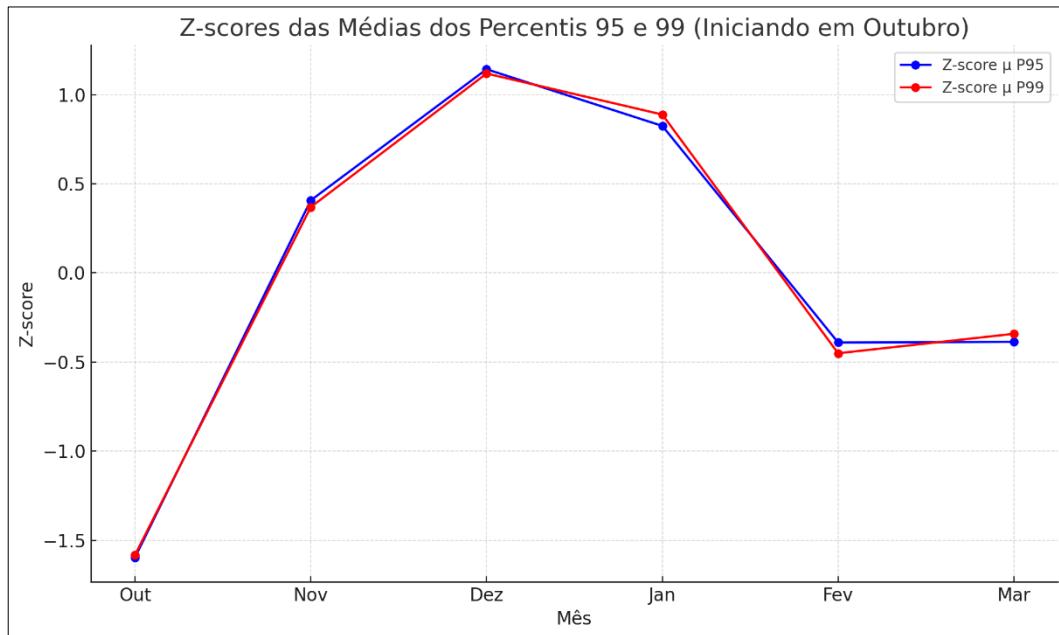


Fonte: A autora (2024).

É nítido que nos meses de novembro a março os valores para os MAX, P95, P99 e MED de precipitação são mais altos, indicando que as precipitações extremas são mais comuns principalmente durante o verão. Já nos meses de junho, julho e agosto têm valores de precipitação significativamente mais baixos para todas as métricas calculadas, refletindo a estação seca na região. Os meses de abril, maio, setembro e outubro são meses de transição entre o período chuvoso e o seco, mesmo assim apresentando *outliers* com valores consideráveis. Os *outliers* são particularmente mais evidentes nos meses de verão, se concentrando entre 100 mm e 200mm, com valores muito significativos em janeiro e dezembro, sugerindo eventos de precipitação excepcionalmente mais altos nesses meses para alguns postos, excedendo os 300 mm, considerando os P95 e P99. Os meses de inverno apresentam valores bem menores em todas as métricas, refletindo uma menor frequência de eventos extremos, mas mesmo assim apresentando eventos acima de 50 mm em algumas localidades.

O gráfico da Figura 2.5, mostra os Z-scores das médias dos percentis 95 e 99 para os meses mais chuvosos, de outubro a março.

Figura 2.5 - Gráfico do Z-scores das Médias dos P95 e P99 da precipitação no estado de Minas Gerais para os meses mais chuvosos da série histórica de 1977 a 2021.



Fonte: A autora (2024).

Em outubro, tanto o percentil 95 (P95) quanto o percentil 99 (P99) exibem Z-scores negativos, com valores inferiores à média geral, indicando uma menor intensidade de eventos extremos de precipitação em comparação com os meses subsequentes. O Z-score do P99 apresenta um valor ligeiramente inferior ao do P95, sugerindo que os eventos extremos mais raros e intensos são ainda menos frequentes em outubro.

Ao avançar para novembro, é possível observar um aumento significativo nos Z-scores de ambos os percentis, com valores aproximando-se de zero e superando-o levemente. Esse comportamento indica que a intensidade das precipitações extremas começa a aumentar, tornando-se ligeiramente superior à média do período analisado. Ainda assim, o P95 apresenta uma ligeira superioridade em relação ao P99, sugerindo que os eventos extremos mais frequentes (P95) têm uma presença mais marcada em novembro em comparação com os eventos mais raros. O mês de dezembro é caracterizado por um aumento expressivo nos Z-scores, com o P95 atingindo seu valor máximo ao longo do período de seis meses. Este pico positivo indica que a intensidade dos eventos extremos de precipitação mais frequentes é excepcionalmente elevada em dezembro, muito acima da média geral. O P99 também apresenta um Z-score positivo significativo, embora ligeiramente menor que o P95, sugerindo que dezembro é um período com alta incidência de precipitações extremas, tanto frequentes quanto raras, mas com predominância dos eventos do P95.

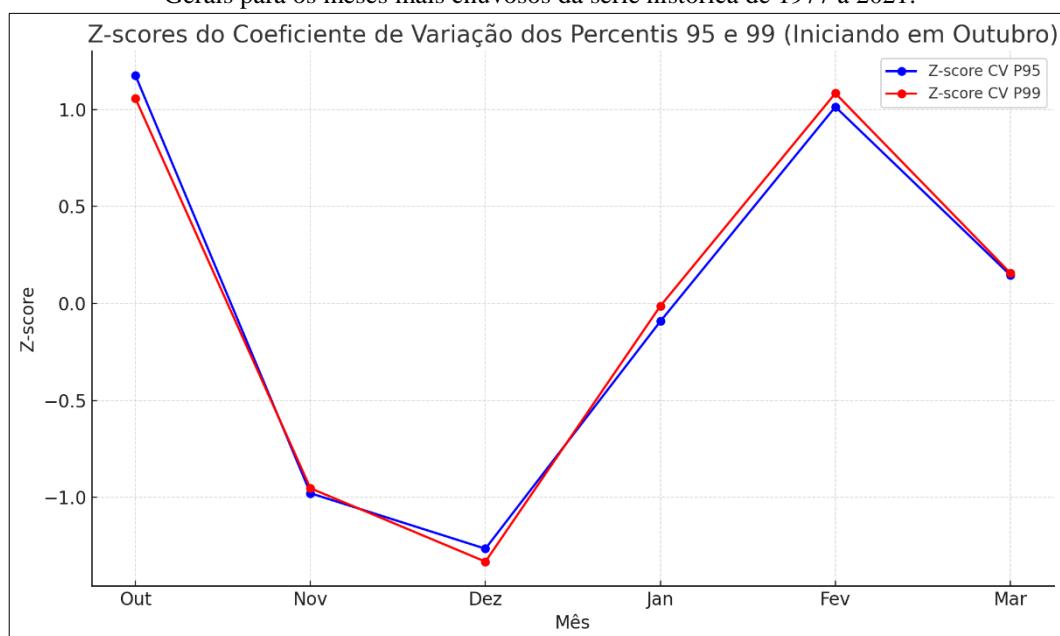
Em janeiro, há uma ligeira redução no Z-score do P95, embora ele permaneça positivo

e acima da média. Em contrapartida, o Z-score do P99 atinge seu valor máximo, tornando-se o mais alto de todo o período analisado. Esse comportamento indica que janeiro é o mês em que os eventos extremos mais raros e intensos (P99) são mais proeminentes, destacando-se como o período de maior intensidade para tais eventos. Os meses de fevereiro e março apresentam uma queda acentuada nos Z-scores de ambos os percentis, com valores negativos para o P95 e P99. Isso sugere que a intensidade e a frequência dos eventos extremos de precipitação diminuem significativamente nesses meses, situando-se abaixo da média geral do período. O fato de ambos os percentis apresentarem valores negativos reforça a ideia de que fevereiro e março são meses com menor propensão a eventos extremos, com março sendo o período menos intenso do ciclo analisado.

A análise gráfica revela uma clara variabilidade sazonal na intensidade dos eventos extremos de precipitação, com os picos mais pronunciados ocorrendo em dezembro para o percentil 95 e em janeiro para o percentil 99. Isso indica que dezembro é o mês com maior frequência de eventos extremos moderados, enquanto janeiro se destaca pela presença de eventos extremos de alta magnitude. A diminuição observada em fevereiro e março reflete uma redução significativa na intensidade e frequência desses eventos, sugerindo uma fase de transição para períodos de menor atividade pluviométrica extrema.

O gráfico da Figura 2.6, mostra os Z-scores dos coeficientes de variação dos percentis 95 e 99 para os meses mais chuvosos, de outubro a março.

Figura 2.6 - Gráfico do Z-scores dos Coeficientes de Variação dos P95 e P99 da precipitação no estado de Minas Gerais para os meses mais chuvosos da série histórica de 1977 a 2021.



Fonte: A autora (2024).

Em outubro, ambos os percentis 95 (em azul) e 99 (em vermelho) apresentam Z-scores positivos elevados no coeficiente de variação, com o P95 ligeiramente superior ao P99. Esses valores positivos indicam que a variabilidade relativa da precipitação extrema em outubro é significativamente maior do que a média geral dos seis meses analisados. Isso sugere que há uma maior inconsistência ou dispersão dos eventos extremos nesse período, o que pode indicar a presença de eventos de precipitação com magnitudes muito distintas.

A partir de novembro, há uma redução acentuada nos Z-scores do coeficiente de variação para ambos os percentis, que se tornam negativos e atingem um valor mínimo quase idêntico. Este comportamento indica uma queda na variabilidade relativa dos eventos extremos, sugerindo que em novembro os eventos de precipitação tendem a apresentar magnitudes mais homogêneas em relação à média do período.

Em dezembro, os Z-scores do CV atingem seu valor mais baixo, indicando a menor variabilidade relativa para os eventos extremos de precipitação dentro do período analisado. Essa redução na dispersão sugere que a precipitação extrema durante dezembro é mais consistente, apresentando valores menos divergentes em relação à média.

No mês de janeiro, observa-se um aumento expressivo nos Z-scores do coeficiente de variação para ambos os percentis, ultrapassando a média e atingindo um pico positivo, especialmente no P99. Isso sugere que a variabilidade relativa dos eventos extremos volta a aumentar de forma significativa em janeiro, indicando uma maior amplitude na intensidade dos eventos extremos de precipitação, especialmente para os eventos mais raros e intensos representados pelo P99. Em fevereiro Z-score do CV continua aumentando, atingindo um valor próximo ao de dezembro, mas agora com o P99 acima do P95, indicando que a alta variabilidade do extremo, especialmente no P99. Em março, os Z-scores do CV diminuem novamente, retornando a valores próximos a zero ou ligeiramente negativos. Isso indica que a variabilidade relativa dos eventos extremos é mais moderada nesses meses, sugerindo que a precipitação extrema tende a apresentar magnitudes mais próximas da média geral do período analisado, com menor dispersão entre os eventos.

A Tabela 2.2 traz informações sobre a média, desvio padrão e coeficiente de variação para os percentis 95 e 99 e seus respectivos Z-scores em diferentes meses, considerados os mais chuvosos.

Tabela 2.2 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos meses mais chuvosos e com maior variabilidade pluviométrica diária no percentis 95 e 99 e seus respectivos Z-scores.

Mês	μ P95	σ P95	CV P95	μ P99	σ P99	CV P99	μ P95 Zsc	σ P95 Zsc	CV P95 Zsc	μ P99 Zsc	σ P99 Zsc	CV P99 Zsc
Dez	34,70	14,69	0,42	50,93	21,24	0,42	1,14	0,03	-1,27	1,12	-0,11	-1,33
Jan	32,62	17,81	0,55	49,15	25,48	0,52	0,82	1,42	-0,09	0,89	1,52	-0,01
Fev	24,64	16,31	0,66	38,77	23,33	0,60	-0,39	0,75	1,01	-0,45	0,69	1,08
Mar	24,67	14,07	0,57	39,62	21,04	0,53	-0,39	-0,25	0,15	-0,34	-0,19	0,16
Nov	29,88	13,52	0,45	45,13	20,12	0,45	0,41	-0,49	-0,98	0,37	-0,55	-0,95
Out	16,73	11,37	0,68	30,00	18,01	0,60	-1,60	-1,46	1,18	-1,58	-1,36	1,06

Fonte: A autora (2024).

Os valores médios de precipitação do percentil 95 (μ P95) e do percentil 99 (μ P99) indicam a intensidade dos eventos extremos de precipitação em cada mês. Em dezembro, a média para ambos os percentis atinge os valores mais altos (μ P95 = 34,702 mm e μ P99 = 50,932 mm), sugerindo que este é o mês com os eventos extremos mais intensos. Este comportamento é evidenciado pelo Z-score positivo, que é o mais elevado para P95 (1,142) e P99 (1,118), indicando que a intensidade das precipitações extremas em dezembro está significativamente acima da média geral do período.

Em janeiro, a média do P95 (32,617 mm) e do P99 (49,148 mm) também se mantêm elevadas, com Z-scores positivos (0,825 para P95 e 0,888 para P99), confirmando que é um mês com forte ocorrência de eventos extremos. Em contraste, nos meses de outubro e fevereiro, os valores médios de precipitação para ambos os percentis são mais baixos, com Z-scores negativos que variam de -1,596 a -0,391, indicando que esses meses têm precipitações extremas de menor intensidade em comparação com a média geral.

O desvio padrão fornece informações sobre a variabilidade dos valores de precipitação em torno da média. Em janeiro, o desvio padrão para P95 (17,807 mm) e P99 (25,482 mm) apresenta os maiores Z-scores (1,419 para P95 e 1,523 para P99), sugerindo que este é o mês com a maior variabilidade em relação à intensidade dos eventos extremos. A alta variabilidade indica que, em janeiro, os eventos extremos de precipitação têm uma ampla gama de intensidades. Por outro lado, os meses de outubro e novembro apresentam os desvios padrão mais baixos, com Z-scores negativos significativos (-1,456 para P95 e -1,362 para P99 em outubro; -0,493 para P95 e -0,546 para P99 em novembro), sugerindo menor variabilidade e uma distribuição mais uniforme dos eventos extremos nesses meses.

O coeficiente de variação (CV) indica a variabilidade relativa em relação à média. Em outubro, o CV para P95 (0,679) e P99 (0,6) apresenta os Z-scores mais altos (1,176 para P95 e 1,058 para P99), indicando que, apesar de ter médias absolutas mais baixas, a variabilidade

relativa dos eventos extremos é muito maior em outubro. Isso sugere que os eventos extremos neste mês são menos previsíveis, com uma maior dispersão em torno da média.

Já em dezembro, o CV atinge o seu ponto mais baixo para ambos os percentis, com Z-scores de -1,265 para P95 e -1,332 para P99. Isso implica que, apesar de ser o mês com as maiores médias de precipitação extrema, há uma menor dispersão relativa em torno da média, o que indica que os eventos extremos são mais consistentes em sua intensidade.

A análise detalhada dos valores e Z-scores revela que dezembro e janeiro são os meses mais propensos a eventos extremos de precipitação, tanto em intensidade (média) quanto em variabilidade (desvio padrão). No entanto, a variabilidade relativa (CV) é menor em dezembro, sugerindo que os eventos extremos nesse mês são mais previsíveis e homogêneos. Em contrapartida, outubro se destaca por ter a maior variabilidade relativa, indicando que os eventos extremos são menos consistentes e apresentam maior dispersão em intensidade. Esses padrões sazonais de intensidade e variabilidade são fundamentais para o planejamento de estratégias de mitigação e gestão de riscos associados a eventos extremos de precipitação em diferentes períodos do ano.

Os padrões sazonais observados podem ser explicados por fatores meteorológicos que influenciam a precipitação no Estado de Minas Gerais. A estação chuvosa no Sudeste do Brasil, incluindo o estado em questão, ocorre tipicamente durante os meses de verão (dezembro a março), devido à influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e ao aquecimento das águas do Atlântico Sul, fator determinante que contribui para a alta precipitação e a variabilidade observada, levando a eventos extremos frequentes (Barros *et al.*, 2000; Silva Dias *et al.*, 2013).

Marengo *et al.*, (2009) analisaram os extremos de precipitação na América do Sul e apontaram que a região sudeste do Brasil, que inclui Minas Gerais, tem experimentado eventos de chuvas extremas mais frequentes, especialmente nos meses de verão (Dezembro a Fevereiro). A relação entre médias elevadas e variação menor nesses meses é consistente com as mudanças climáticas e o aumento na frequência de eventos extremos. Silva Dias *et al.*, (2013) destacaram o papel dos sistemas convectivos e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) na intensificação das chuvas durante o verão. Isso sustenta os resultados que mostram dezembro e janeiro com maior média de precipitação, já que esses meses são fortemente influenciados pela ZCAS. Pereira *et al.*, (2018) investigaram a variabilidade da precipitação em Minas Gerais e encontraram uma maior variabilidade nas chuvas durante o início da primavera (outubro), corroborando os resultados da alta variabilidade observada em outubro, com baixos

valores médios, mas alto coeficiente de variação.

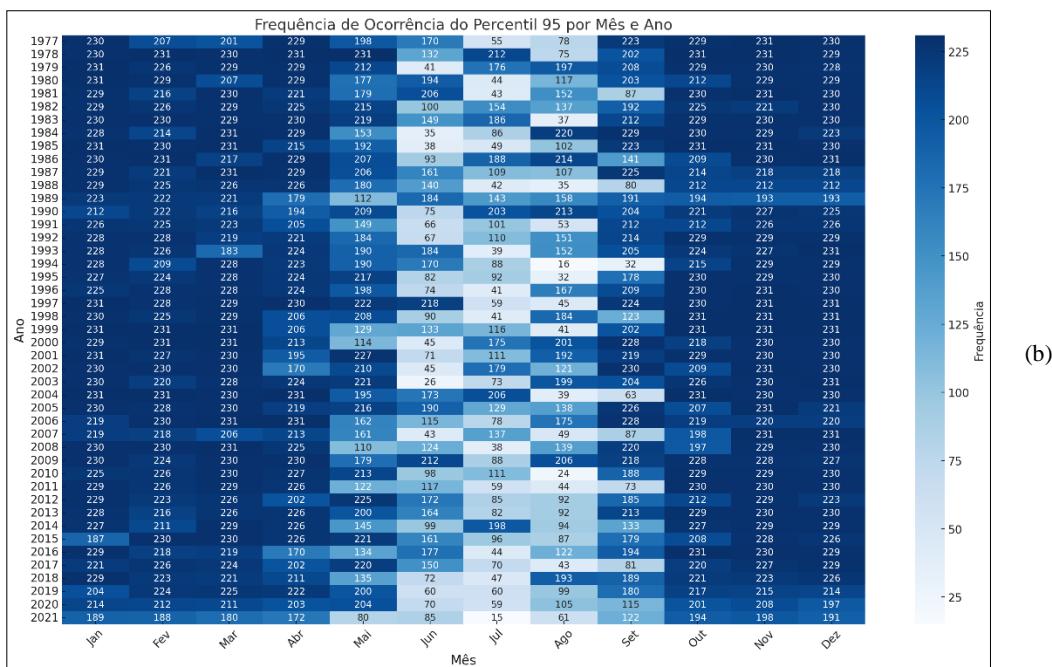
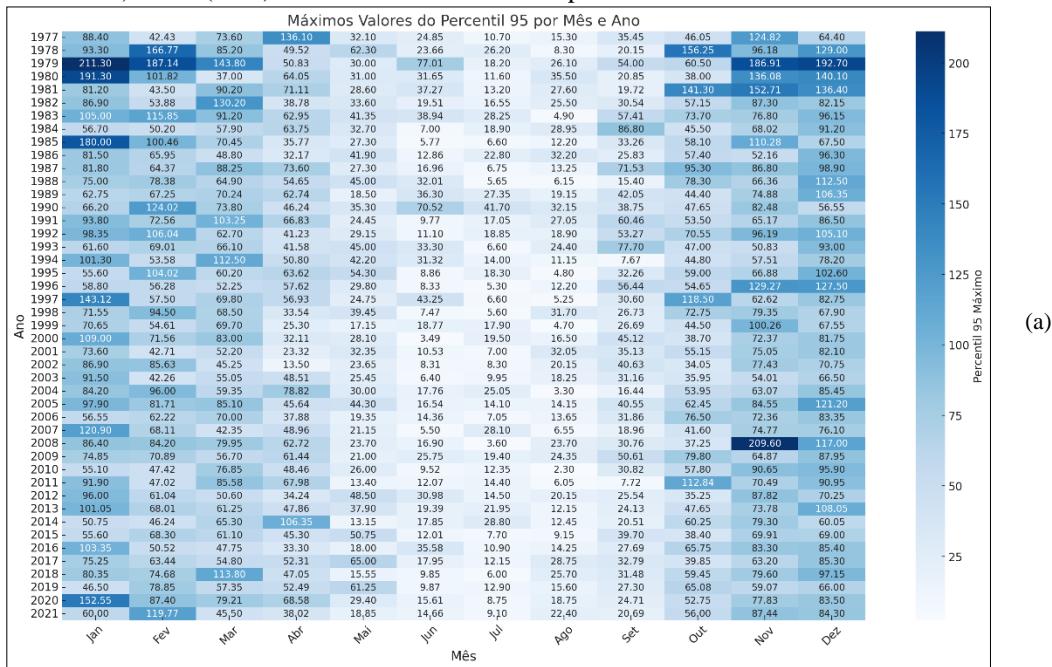
Minas Gerais é particularmente vulnerável a eventos extremos de precipitação, que podem resultar em desastres naturais como enchentes e deslizamentos de terra, especialmente nas áreas urbanas e regiões montanhosas (Cunnigham *et al.*, 2017; Quintão *et al.*, 2017).

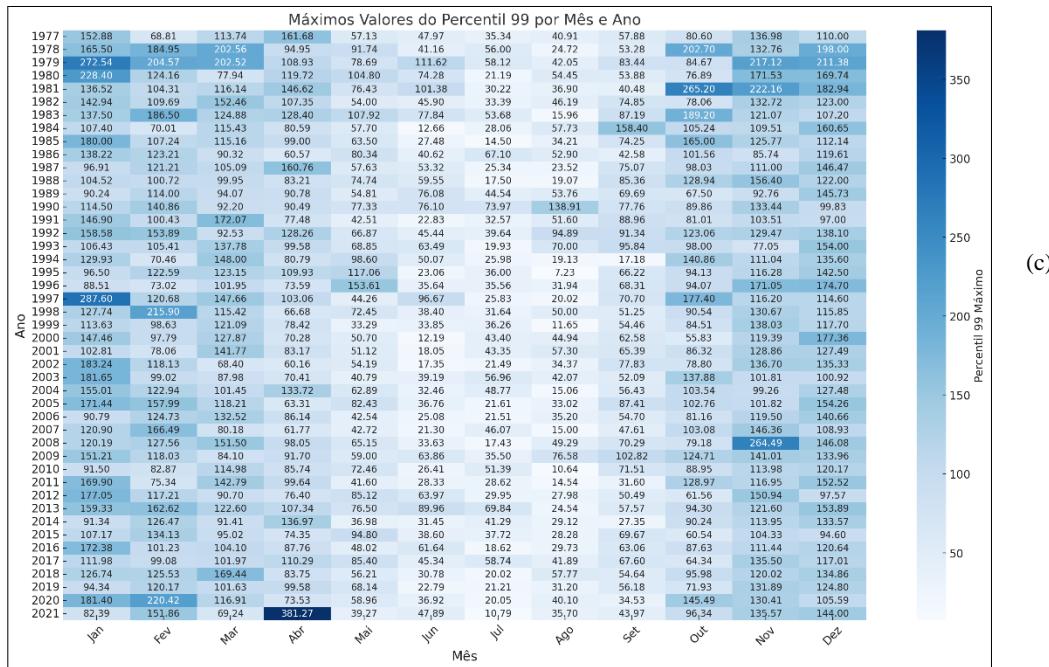
Já o inverno é caracterizado pela seca, com baixas precipitações e quase ausência de eventos extremos, resultado do comportamento e posição dos sistemas meteorológicos e a menor atividade convectiva. A primavera e o outono representam períodos de transição, com a primavera mostrando um aumento gradual nas precipitações, preparando-se para o verão chuvoso, e o outono apresentando uma redução gradual nas precipitações conforme o inverno seco se aproxima (Mello; Silva, 2008; Rao *et al.*, 2016).

Assim, é possível verificar que a análise sazonal realizada revela padrões claros de variação entre os meses. Os meses de verão destacam-se pela alta variabilidade e frequência de eventos extremos, enquanto os de inverno mostram a estação mais estável e seca. A primavera e o outono funcionam como períodos de transição, com mudanças graduais na intensidade e frequência das precipitações.

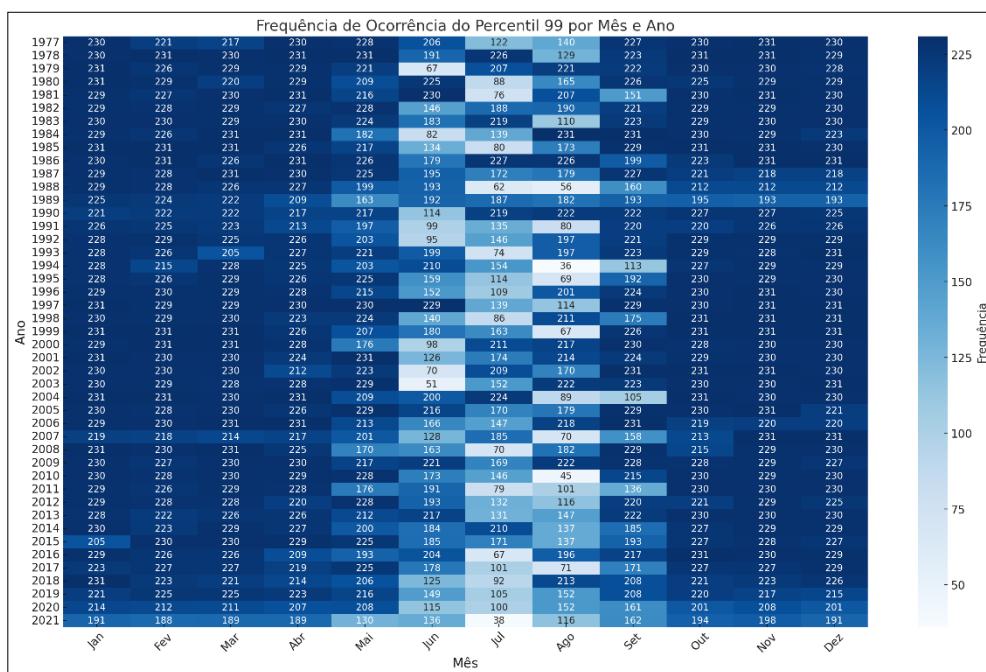
Os mapas de calor mostrados na Figura 2.6 (a e b), mostram as magnitudes dos eventos mais extremos (*outliers*) em relação aos anos e meses, já os mapas da Figura 2.6 (c e d), mostram a frequência dos eventos nos percentis 95 e 99. Analisando ambos os mapas, é possível afirmar que os meses de janeiro fevereiro, novembro e dezembro são consistentemente os meses com os maiores valores de *outliers* para ambos os percentis 95 e 99, enquanto abril destaca-se no percentil 99 com os maiores valores absolutos de *outliers*.

Figura 2.6 - Mapas de calor de magnitude e frequência de extremos pluviométricos por meses e anos nos P95 (a e b) e P99 (c e d) no estado de Minas Gerais para a série histórica de 1977 a 2021.





(c)



partes do estado, associadas ao fenômeno meteorológico El Niño. Em relação a frequência das ocorrências de extremos, os meses de primavera e verão mostram em média 230 ocorrências por ano, considerando os dados de todas as estações ao longo da série de 44 anos, reduzindo drasticamente esse número nos meses de inverno.

Com base nas análises dos percentis 95 e 99 ao longo dos anos, ainda não é possível afirmar que exista uma tendência clara de aumento ou diminuição nas precipitações em todo o estado. Isso indica que os eventos extremos de precipitação diária não se tornaram significativamente mais frequentes ou menos comuns durante o período analisado. Entretanto, em algumas localidades específicas, observamos que esses eventos extremos têm se tornado mais intensos.

2.2.1.2 Análise temporal dos extremos pluviométricos por Block Maxima

Nesta etapa, utilizou-se o método de Block Maxima (BM) aplicado mensal e anualmente para cada estação pluviométrica.

A abordagem empregada aqui consiste em produzir uma série temporal dos máximos e dos percentis dos máximos, ou seja, adiciona-se uma camada de análise que destaca os eventos mais extremos dentro dos períodos analisados. Identificar o máximo dos máximos e os percentis dos máximos, oferece uma visão mais clara dos eventos mais severos, o que reduz a influência de variabilidades menos relevantes. Essa técnica proporciona uma estimativa mais robusta dos eventos extremos, essencial para a análise de riscos e o planejamento de mitigação.

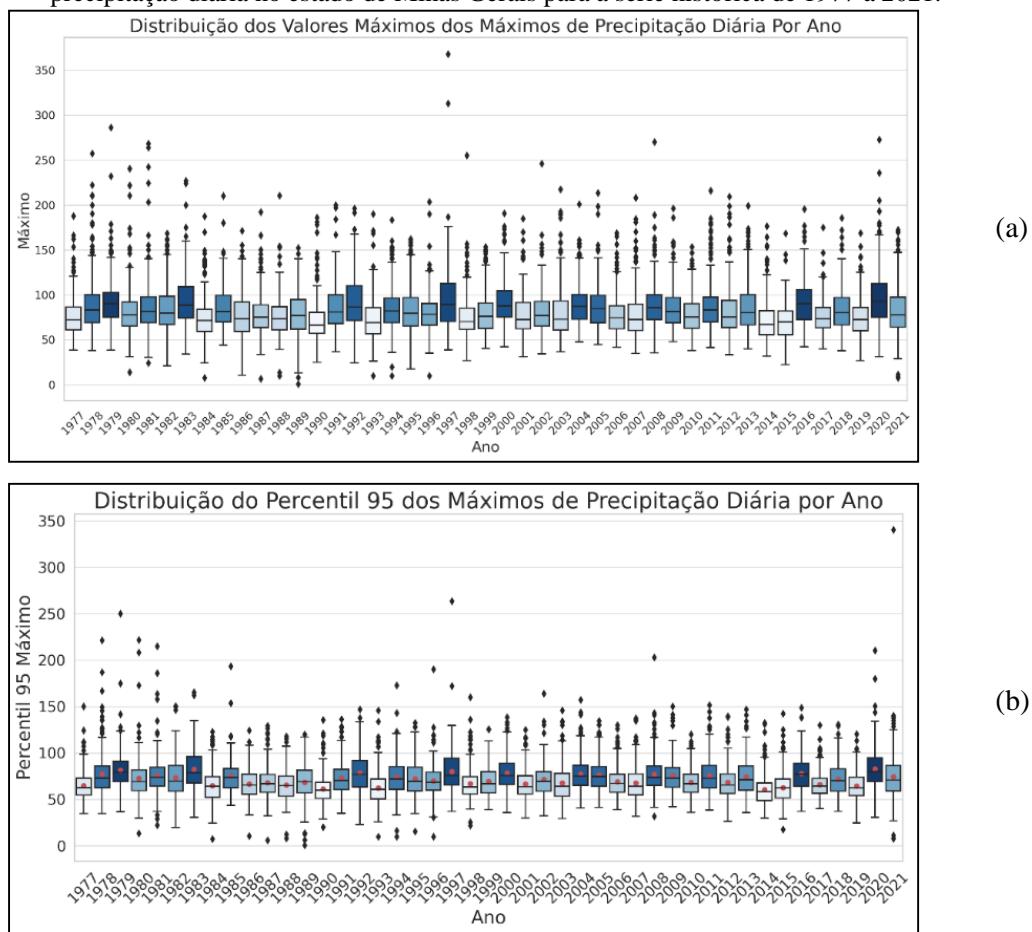
Para gerar os blocos de máximos nesta etapa, foram identificados os máximos dos máximos e também calculados os P95 e P99 dos máximos para cada mês ao longo de toda a série histórica. Isso resultou em três valores para cada um das 232 estações pluviométricas, tanto por ano quanto por mês. O máximo dos máximos (MAX_MAX_Ano), o percentil 95 dos máximos (P95_MAX_Ano) e o percentil 99 dos máximos (P99_MAX_Ano). E da mesma forma, calculou-se os valores mensais sobre os máximos: o máximo dos máximos (MAX_MAX_Mês), o percentil 95 dos máximos (P95_MAX_Mês) e o percentil 99 dos máximos (P99_MAX_Mês), baseados nos meses de cada ano para cada estação.

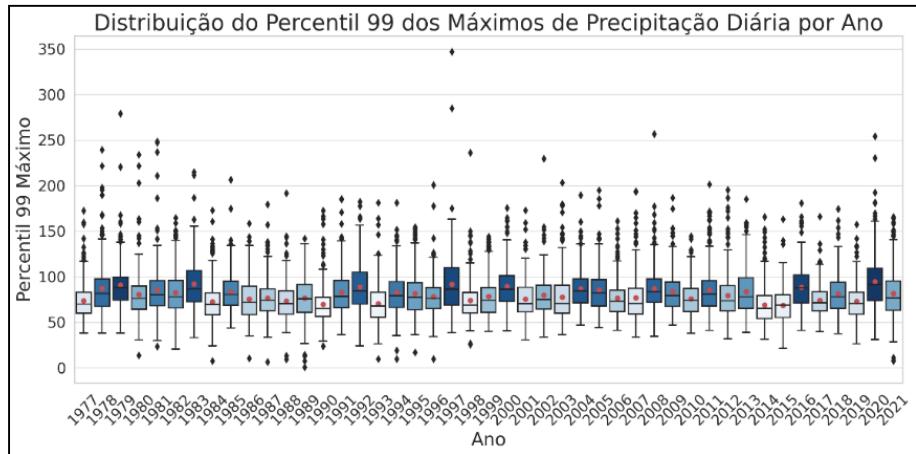
Essa abordagem avançada de identificar máximos mensais e anuais, seguida do cálculo de percentis, proporciona uma visão detalhada e robusta dos eventos de precipitação extrema. Isso é crucial para modelar e prever eventos futuros com maior precisão. A utilização dos percentis dos máximos é especialmente útil para destacar os eventos mais extremos e significativos, fundamentais para a gestão de riscos e planejamento. Desta forma, os valores

extremos foram obtidos de maneira mais refinada, focando em eventos que ocorrem muito raramente e com grande intensidade. Com isso, os valores mínimos não são mais apenas zeros (dias sem chuva), mas também mínimos significativos entre os máximos, eliminando a influência dos zeros devido à técnica de BM dos quantis.

Na Figura 2.7 (a, b e c) é possível observar nos gráficos, claramente os resultados da robustez da técnica de BM.

Figura 2.7 - Gráficos da distribuição anual dos Máximos (a), P95 (b), P99 (c) e Médias dos Block Maxima para a precipitação diária no estado de Minas Gerais para a série histórica de 1977 a 2021.





(c)

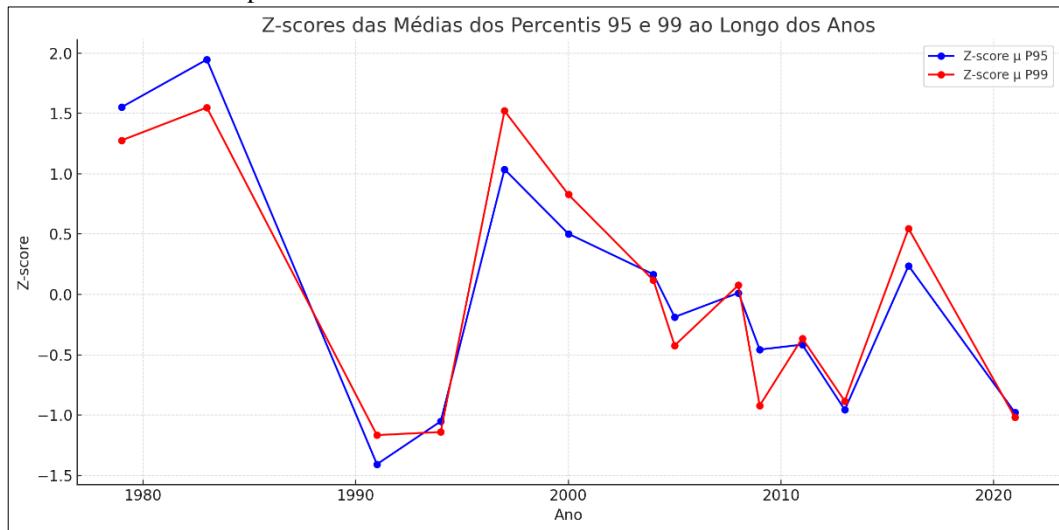
Fonte: A autora (2024).

Na etapa anterior, a análise dos valores anuais não evidenciou claramente a variabilidade dos eventos extremos. Em contraste, a abordagem atual, que utiliza a técnica de BM para identificar os máximos dos máximos e calcular percentis, revela uma maior granularidade e destaca um maior número de anos com ocorrência intensa de extremos: 1979, 1983, 1991, 1994, 1997, 2000, 2004, 2005, 2008, 2009, 2011, 2013, 2016 e 2021. Esses anos mostram uma maior variabilidade e intensidade de eventos extremos, corroborando com pesquisas anteriores (Campos, et al., 2016; Reboita et al., 2017; Silva et al., 2020). Nesses anos o estado também sofreu com a influência do fenômeno El Nino, de moderado a forte. De acordo com registros (Cavalcanti et al., 2016; Grimm & Tedeschi, 2009; Nobre & Shukla, 1996; Ropelenwski & Halpert, 1987; Silva & Kousky, 2012), as chuvas intensas causaram inundações e deslizamentos de terra em várias partes do estado como pode ser comprovado nos registros históricos e relatórios da Defesa Civil de Minas Gerais.

A variabilidade ao longo do tempo e entre as estações pluviométricas continua alta, porém agora é possível visualizar de forma mais precisa os extremos e também *outliers* negativos, além dos positivos. Isso indica que em alguns anos, apesar de algumas estações atingirem picos superiores a 300 e 350 mm para a distribuição de máximos, e entre 250 e 350 mm para o P95 e P99, outras praticamente não registraram precipitação, com valores abaixo de 30 mm diárias e alguns próximos de zero. Nos anos iniciais da série, entre 1978 e 1983, observa-se um grande número de *outliers* com precipitações diárias acima de 200 mm, possivelmente relacionadas ao fenômeno ENOS.

O gráfico da Figura 2.8 mostra os Z-scores das médias dos percentis dos máximos (Block Maxima), P95 (em azul) e P99 (em vermelho) ao longo dos anos.

Figura 2.8 - Gráfico do Z-scores das médias dos P95 e P99 do Block Maxima da precipitação no estado de Minas Gerais para os anos mais chuvosos da série histórica de 1977 a 2021.



Fonte: A autora (2024).

O gráfico evidencia variações significativas na intensidade dos eventos extremos de precipitação, analisados com base no método Block Maxima.

No início da série, em 1979 e 1983, observa-se que ambos os percentis apresentam Z-scores positivos, com valores mais elevados para o P95 do que para o P99. Isso sugere que, nesses anos, os eventos extremos de precipitação foram mais intensos e frequentes em relação à média da série, principalmente para o P95, que indica eventos de precipitação menos raros, porém ainda extremos.

A partir de 1983, há uma redução acentuada nos Z-scores, atingindo valores negativos em 1991 para ambos os percentis, com o P95 mostrando um declínio mais pronunciado. Este comportamento sugere que, em 1991, a intensidade dos eventos extremos foi significativamente menor do que a média da série histórica, refletindo um período de precipitação mais moderada.

O ano de 1997 marca uma recuperação na intensidade dos eventos extremos, com os Z-scores para ambos os percentis passando a ser positivos, indicando um retorno à ocorrência de eventos de precipitação acima da média. O P99, em particular, atinge seu valor mais elevado nesse ano, sugerindo que os eventos extremos mais raros foram especialmente intensos.

No decorrer dos anos 2000 a 2016, observa-se uma tendência geral de flutuação, com os Z-scores variando entre valores negativos e positivos. Os anos 2000 e 2004 apresentam valores levemente positivos, sugerindo uma intensidade moderada de eventos extremos, enquanto 2009 e 2011 mostram Z-scores negativos, indicando uma redução na intensidade das precipitações extremas.

Um destaque relevante é observado em 2021, onde tanto o P95 quanto o P99 atingem

Z-scores negativos, sugerindo uma redução substancial na intensidade dos eventos extremos de precipitação em relação à média da série. Este declínio indica que 2021 foi um ano atípico em termos de baixa intensidade de eventos extremos.

Em resumo, o gráfico revela padrões cíclicos de aumento e redução na intensidade dos eventos extremos de precipitação ao longo do período analisado. Anos como 1983, 1997 e 2004 destacam-se por apresentar Z-scores positivos, indicando uma maior intensidade de precipitação, especialmente para os eventos extremos mais raros (P99). Por outro lado, anos como 1991 e 2021 mostram uma diminuição significativa, evidenciada pelos Z-scores negativos, apontando para períodos de menor atividade pluviométrica extrema. Essa análise reforça a importância de compreender as variações temporais na intensidade de eventos extremos para a gestão de recursos hídricos e a formulação de estratégias de adaptação climática.

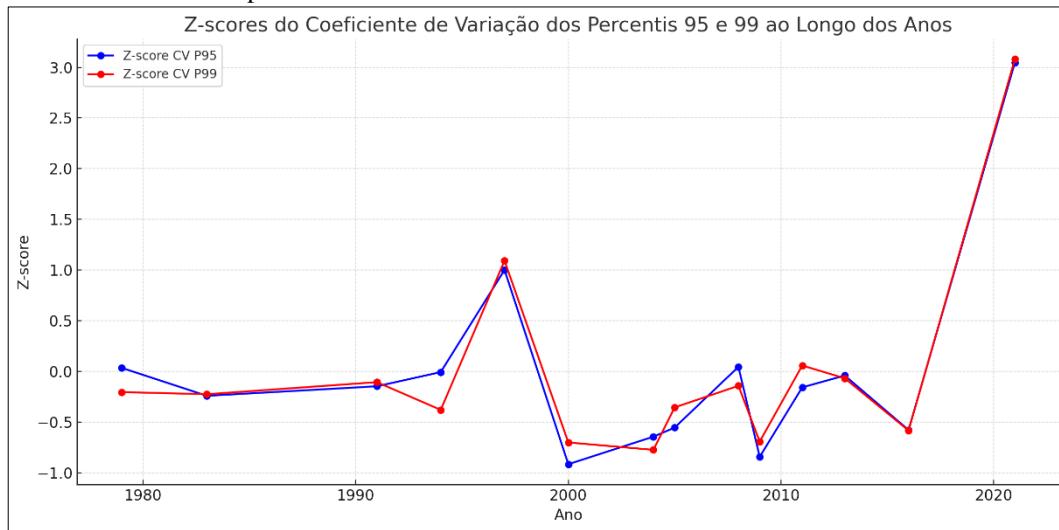
Em comparação com os gráficos do método anterior, alguns pontos merecem destaque: o pico em 1983, por exemplo, é mais pronunciado no P99, enquanto o P95 tem uma queda mais suave após esse ponto. Além disso, o comportamento dos Z-scores nas décadas de 1990 e 2000 apresenta mais variações entre os dois percentis, especialmente no período de 2000 a 2009, onde o P99 mostra um pico acentuado em 2008, enquanto o P95 tem um aumento menos intenso. Em ambos os métodos (gráficos), o comportamento das séries de P95 e P99 tende a convergir em alguns anos e divergir em outros, com o P99 frequentemente mostrando variações mais extremas. Isso reflete a maior sensibilidade do percentil 99 em relação aos eventos de precipitação extrema.

O gráfico de linhas da Figura 2.9 mostra os Z-scores dos coeficientes de variação dos percentis dos máximos (Block Maxima), P95 e P99 ao longo dos anos.

O gráfico de linhas dos Z-scores do coeficiente de variação (CV) para os percentis 95 (P95) e 99 (P99) ao longo dos anos revela importantes variações na dispersão relativa dos eventos extremos de precipitação, quando analisados com base no método Block Maxima.

No início da série, nos anos de 1979 e 1983, o gráfico mostra Z-scores próximos de zero para ambos os percentis, com o P95 apresentando valores ligeiramente positivos e o P99 mostrando valores levemente negativos. Este comportamento sugere que, nesses anos, a variabilidade relativa dos eventos extremos de precipitação para o P95 foi ligeiramente superior à média, enquanto o P99 se manteve ligeiramente abaixo, indicando uma dispersão moderada ao redor da média para os eventos mais raros.

Figura 2.9 - Gráfico do Z-scores dos CV dos P95 e P99 do Block Maxima da precipitação no estado de Minas Gerais para os anos mais chuvosos da série histórica de 1977 a 2021.



Fonte: A autora (2024).

A partir de 1991, há uma clara tendência de aumento no Z-score do CV para o P99, atingindo um valor positivo em 1997. Esse aumento no Z-score do P99 reflete uma variabilidade relativa significativamente maior em relação à média, indicando que os eventos extremos de precipitação nesse período se tornaram mais dispersos e menos previsíveis. Em contraste, o P95 também apresenta um aumento, mas de forma menos acentuada, sugerindo uma maior estabilidade relativa nos eventos extremos mais frequentes. O ano de 1997 marca um pico no Z-score do CV para ambos os percentis, com o P99 atingindo seu valor mais elevado. Esse comportamento indica que houve uma alta dispersão relativa nos eventos extremos de precipitação, especialmente para os eventos mais raros (P99), sugerindo que a intensidade desses eventos apresentou uma ampla gama de variação ao redor da média, refletindo condições pluviométricas extremamente irregulares durante este ano.

Nos anos seguintes, de 2000 a 2013, observa-se uma oscilação nos Z-scores do CV, com períodos alternados de valores positivos e negativos. Este padrão sugere variações na consistência dos eventos extremos, com alguns anos apresentando maior previsibilidade e outros, maior variabilidade relativa. Em 2021, há um aumento acentuado do Z-score do CV para ambos os percentis, atingindo valores extremamente positivos, especialmente para o P99. Este comportamento indica que, em 2021, a variabilidade relativa dos eventos extremos atingiu seu ponto mais alto, refletindo uma grande dispersão e irregularidade nos eventos extremos de precipitação.

O gráfico revela que a variabilidade relativa dos eventos extremos de precipitação, conforme indicada pelo coeficiente de variação, experimentou flutuações significativas ao

longo dos anos. A alta variabilidade em 1997 e 2021, particularmente para o P99, sugere períodos de eventos extremos menos previsíveis e mais dispersos em intensidade. Em contraste, anos como 1983 e 1991 apresentaram variabilidade relativa mais baixa, indicando eventos extremos de precipitação mais uniformes e consistentes.

Comparando os métodos (convencional e BM), ambos mostram uma tendência geral de aumento e maior variação nos coeficientes a partir de 1990, com oscilações em anos como 2008 e 2009. No entanto, o segundo (BM) apresenta valores extremos mais destacados no final da série, especialmente para o P99 em 2021. O primeiro gráfico tem uma distribuição mais suave dos Z-scores, com um padrão de subida gradual em relação ao coeficiente de variação.

Essas diferenças refletem as abordagens distintas utilizadas para calcular o coeficiente de variação e como o método de Block Maxima pode amplificar as variações extremas no final da série. Em ambos os casos, o comportamento de P99 tende a ser mais volátil e a apresentar maiores variações do que P95, reforçando a sensibilidade desse percentil a eventos mais extremos.

A Tabela 2.3 apresenta os valores anuais de médias (μ), desvios padrão (σ), e coeficientes de variação (CV) para os percentis 95 (P95) e 99 (P99) dos Block Maxima, de precipitação, juntamente com seus respectivos Z-scores, ao longo do período de 1979 a 2021.

Nos anos iniciais, como 1979 e 1983, observa-se que os Z-scores das médias para o P95 (1,553 e 1,947, respectivamente) e P99 (1,278 e 1,550) são positivos e relativamente altos, indicando que esses anos tiveram eventos extremos de precipitação com intensidades significativamente acima da média geral. Isso sugere que 1979 e 1983 foram períodos marcados por precipitações mais intensas do que o esperado, especialmente em relação aos percentis mais extremos. Em contraste, os anos de 1991 e 1994 apresentam Z-scores negativos para ambos os percentis, com o P95 atingindo -1,408 em 1991 e o P99 chegando a -1,167. Esses valores indicam que nesses anos, a intensidade dos eventos extremos de precipitação foi consideravelmente menor do que a média da série, sugerindo condições pluviométricas menos extremas. O ano de 1997 é notável por apresentar um Z-score positivo elevado para ambas as médias (1,037 para P95 e 1,522 para P99), destacando-se como um período de precipitação extrema mais intensa. A partir do ano 2000, as médias das precipitações extremas começam a oscilar em torno de valores próximos à média, com Z-scores que variam de levemente positivos e negativos, indicando uma alternância entre períodos de precipitação ligeiramente acima e abaixo da média.

Tabela 2.3 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos anos mais chuvosos e com maior variabilidade pluviométrica diária para os percentis 95 e 99 dos Block Maxima.

Ano	μ P95	σ P95	CV P95	μ P99	σ P99	CV P99	μ P95 Zsc	σ P95 Zsc	CV P95 Zsc	μ P99 Zsc	σ P99 Zsc	CV P99 Zsc
1979	81,59	21,55	26,42	91,07	27,05	29,71	1,55	0,41	0,03	1,28	0,05	-0,20
1983	82,72	20,88	25,25	91,96	27,21	29,58	1,95	0,20	-0,24	1,55	0,08	-0,23
1991	73,11	18,75	25,65	83,01	25,13	30,27	-1,41	-0,47	-0,15	-1,17	-0,34	-0,11
1994	74,13	19,45	26,24	83,10	23,84	28,69	-1,05	-0,25	-0,01	-1,14	-0,61	-0,38
1997	80,11	24,45	30,52	91,87	34,16	37,19	1,04	1,33	1,00	1,52	1,51	1,09
2000	78,58	17,59	22,38	89,59	24,04	26,84	0,50	-0,84	-0,92	0,83	-0,56	-0,70
2004	77,62	18,27	23,54	87,24	23,05	26,42	0,17	-0,63	-0,64	0,12	-0,77	-0,77
2005	76,61	18,32	23,92	85,46	24,64	28,83	-0,19	-0,61	-0,55	-0,42	-0,44	-0,36
2008	77,18	20,42	26,46	87,11	26,19	30,06	0,01	0,06	0,05	0,08	-0,13	-0,14
2009	75,84	17,21	22,69	83,82	22,53	26,89	-0,46	-0,96	-0,84	-0,92	-0,87	-0,69
2011	75,95	19,44	25,60	85,66	26,74	31,22	-0,42	-0,25	-0,16	-0,36	-0,01	0,06
2013	74,41	19,42	26,10	83,94	25,59	30,49	-0,96	-0,26	-0,04	-0,88	-0,25	-0,07
2016	77,82	18,54	23,82	88,65	24,39	27,52	0,24	-0,54	-0,58	0,55	-0,49	-0,58
2021	74,34	29,14	39,20	83,50	40,64	48,67	-0,98	2,81	3,05	-1,02	2,84	3,08

Fonte: A autora (2024).

O desvio padrão é um indicador da variabilidade absoluta da precipitação. Os Z-scores do desvio padrão para o P95 e P99 em 1997 possuem valores positivos e altos (1,329 e 1,509, respectivamente), indicando que a variabilidade dos eventos extremos também foi significativamente alta, com uma grande amplitude de valores de precipitação nesse ano. Esse comportamento sugere uma dispersão considerável dos valores extremos em 1997, evidenciando um período de precipitações bastante irregulares. Por outro lado, o desvio padrão apresenta Z-scores negativos marcantes em anos como 1991 (-0,473 para P95 e -0,343 para P99), refletindo uma menor variabilidade dos eventos extremos e sugerindo que a intensidade das precipitações foi mais homogênea e previsível nesse período. O ano de 2021 chama a atenção por ter o Z-score mais elevado para o desvio padrão, com 2,814 para o P95 e 2,835 para o P99. Esses valores indicam que a variabilidade da precipitação extrema foi extremamente alta, sugerindo uma ampla dispersão e uma grande diferença entre os eventos de precipitação extremos ao longo do ano, tornando-o um período de precipitações extremamente voláteis e imprevisíveis.

O coeficiente de variação (CV) reflete a variabilidade relativa em relação à média e é particularmente relevante para avaliar a consistência dos eventos extremos. O Z-score do CV em 1997 apresenta valores elevados (1,001 para P95 e 1,092 para P99), indicando que, apesar da alta intensidade dos eventos extremos, a variabilidade relativa foi também significativamente alta, sugerindo grande incerteza na intensidade desses eventos. O ano

de 2021 apresenta os Z-scores mais altos para o CV, com 3,047 para P95 e 3,081 para P99. Isso sugere que a variabilidade relativa em relação à média foi excepcionalmente alta, indicando que os eventos extremos de precipitação em 2021 foram não apenas intensos, mas também altamente imprevisíveis e dispersos em relação à média histórica. Em contraste, anos como 2000 e 2009 apresentaram Z-scores negativos para o CV (-0,916 para P95 e -0,701 para P99 em 2000), indicando que nesses anos, apesar da intensidade dos eventos extremos, houve uma menor dispersão relativa, sugerindo uma maior previsibilidade dos eventos extremos de precipitação.

A análise mostra que 1997 e 2021 foram anos de destaque em termos de intensidade e variabilidade dos eventos extremos de precipitação. Enquanto 1997 se destacou por sua alta variabilidade e intensidade, 2021 apresentou uma dispersão e variabilidade extremas, com eventos de precipitação altamente imprevisíveis. Por outro lado, anos como 1991 e 1994 registraram baixos valores de intensidade e variabilidade, sugerindo períodos de precipitações extremas mais moderadas e consistentes.

Fatores como fenômenos climáticos e variabilidade sazonal, podem dizer muito sobre eventos extremos de precipitação, como chuvas intensas em curtos períodos, são muitas vezes influenciados por fenômenos climáticos regionais e globais, como El Niño, La Niña, ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul) e outras anomalias atmosféricas. Esses fenômenos podem afetar tanto a intensidade quanto a variabilidade dos eventos de precipitação, como já mencionado anteriormente. Os percentis dos máximos podem estar mais fortemente ligados a eventos climáticos excepcionais, que geram chuvas extremas em períodos curtos e de maior magnitude. Em contraste, nos percentis totais, a presença de eventos climáticos mais moderados pode aumentar a variabilidade no percentil 95, mas não no percentil 99, uma vez que esse último reflete eventos muito mais raros.

Como nas análises realizadas até o momento, todos os anos (todos os meses de cada ano) e todas as estações pluviométricas foram incluídas, a sazonalidade tem um impacto significativo nos eventos de precipitação. Em áreas onde as chuvas são altamente sazonais, como em grande parte de Minas Gerais, a concentração de chuvas durante a estação chuvosa pode criar uma forte diferença entre eventos intensos e moderados. Nos percentis totais, essa sazonalidade pode resultar em uma alta variação entre eventos moderados (percentil 95) e extremos (percentil 99). Em anos com precipitação sazonalmente irregular, a variabilidade entre esses eventos pode ser acentuada, gerando diferenças percentuais maiores nas médias e desvios padrão. Nos percentis dos máximos,

a variabilidade é geralmente menor, pois estamos analisando apenas os picos de precipitação, que tendem a ser mais previsíveis.

Esses resultados são consistentes com estudos que mostram a intensificação dos extremos de precipitação e a maior variabilidade interanual em eventos de chuva intensa. A análise do coeficiente de variação reforça a importância de se entender a variação desses eventos, não apenas em termos de magnitude, mas também de consistência ao longo dos anos, (Campos et al., 2016; Reboita et al., 2017; Reis et al., 2018; Silva, Escobar e Reboita, 2020). De acordo com registros CAVALCANTI et al., 2016; GRIMM e TEDESCHI, 2009; NOBRE e SHUKLA, 1996; ROPELEWSKI e HAILPERT, 1987; SILVA e KOUSKY, 2012), as chuvas intensas causaram inundações e deslizamentos de terra em várias partes do estado como poder ser comprovado nos registros históricos e relatórios do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres - S2ID, (SEDEC, 2024).

Minas Gerais é um estado com regiões climáticas muito diversas. Eventos de chuvas intensas em uma região podem ser moderados ou ausentes em outra. Nos percentis totais, essa heterogeneidade espacial pode aumentar a variabilidade entre os eventos de precipitação moderada e extrema, resultando em diferenças percentuais maiores. Nos percentis dos máximos, estamos lidando com eventos que atingem os picos de intensidade, o que pode ocorrer simultaneamente em diferentes regiões, reduzindo a variação relativa (Carvalho; Jones; Liebmann, 2004; Nobre; Shukla, 1996; Pereira *et al.*, 2018).

A variabilidade e o aumento na intensidade e frequência dos eventos de precipitação intensa em Minas Gerais, podem estar relacionados especialmente às mudanças climáticas. Estudos indicam que as mudanças climáticas globais influenciam os padrões de precipitação, aumentando a frequência e intensidade dos eventos extremos. A literatura aponta que o aquecimento global impulsiona maior evaporação e, consequentemente maior quantidade de vapor d'água na atmosfera, resultando em precipitações mais intensas (Sun *et al.*, 2021; Trenberth, 2020).

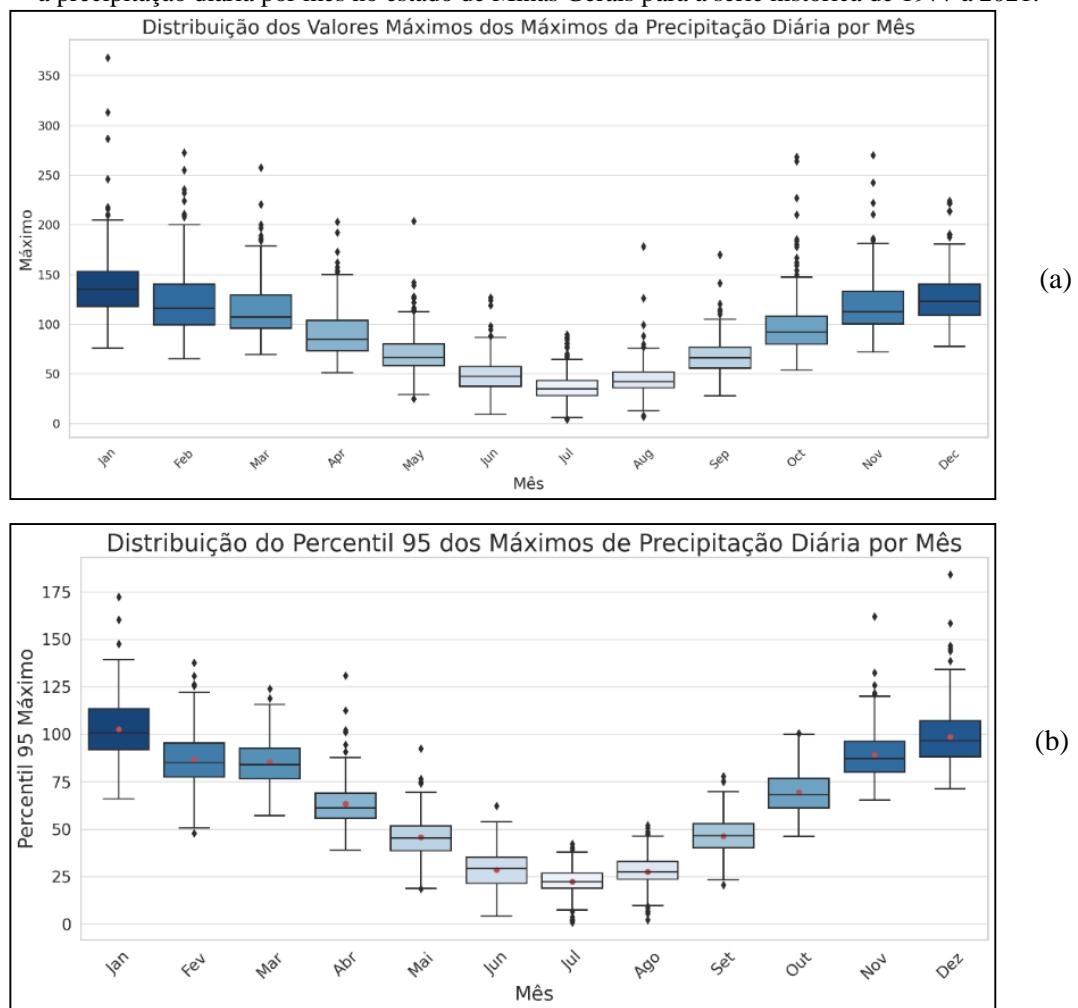
Especificamente no Sudeste do Brasil, estudos indicam um aumento na intensidade e frequência de eventos de precipitação intensa, correlacionando esses eventos com mudanças nos padrões climáticos regionais (Perez *et al.*, 2020a; Silva Dias *et al.*, 2013). Modelos climáticos projetam que a tendência de aumento na intensidade dos eventos de precipitação intensa continuará nas próximas décadas, especialmente em regiões vulneráveis como Minas Gerais (IPCC, 2022).

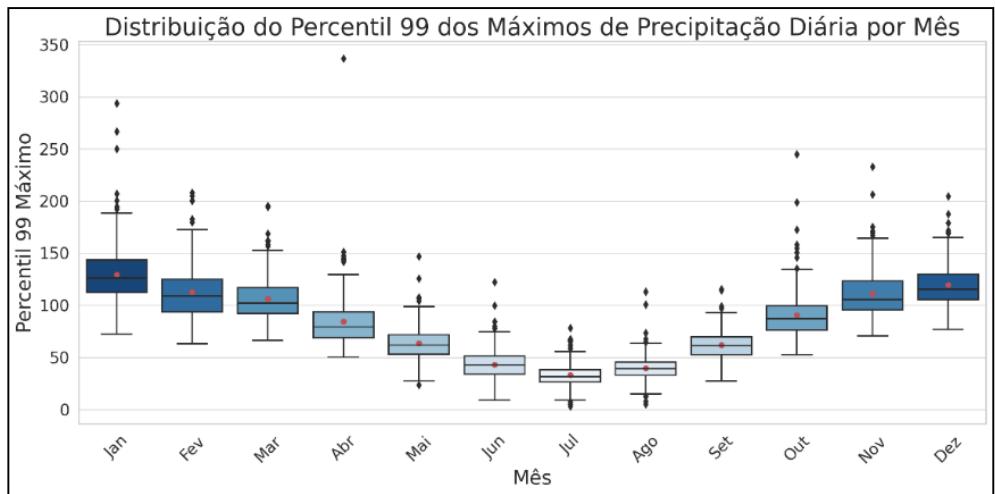
Ao analisar os extremos de precipitação mensais, os gráficos mostrados na Figura

2.11 (a, b e c) representam as distribuições dos máximos dos máximos e dos percentis 95 e 99 dos Block Maxima de precipitação diária por mês para toda a série histórica analisada neste estudo de todas as estações pluviométricas.

É possível observar que nos meses de verão (dezembro a março) há altos valores de precipitação diária, indicando a ocorrência frequente de eventos de chuva intensa, além de uma variabilidade razoavelmente grande. Esse comportamento heterogêneo dos extremos entre as localidades é um avanço em relação à análise anterior, que não capturava essa variabilidade de maneira tão clara. Nos meses de inverno, a variabilidade é consideravelmente menor, refletindo meses mais secos e com maior homogeneidade espacial, o que já havia sido indicado na análise anterior, mas agora se torna mais evidente, mostrando a sensibilidade do método.

Figura 2.10 - Gráficos da distribuição anual dos Máximos (a), P95 (b), P99 (c) dos valores máximos para a precipitação diária por mês no estado de Minas Gerais para a série histórica de 1977 a 2021.





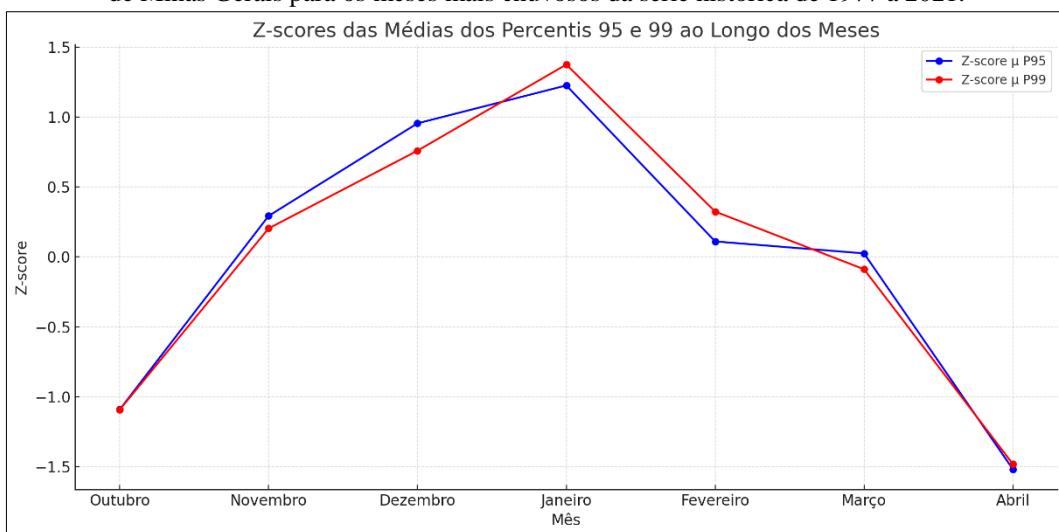
(c)

Fonte: A autora (2024).

Nos meses de inverno (maio, junho e julho), a nova análise identifica extremos entre 20 e 150 mm considerando as três distribuições, mostrando a eficiência da técnica de BM em identificar extremos mesmo em meses tradicionalmente secos, mesmo que esses extremos sejam proporcionalmente menores a quantidade de chuva da época. Durante o inverno no hemisfério sul, a região Sudeste do Brasil pode ser influenciada por sistemas frontais e áreas de baixa pressão, resultando em eventos de chuvas intensas e até extremos de precipitação (Carvalho; Jones; Liebmann, 2002).

O gráfico da Figura 2.11 mostra os Z-scores das médias dos percentis 95 e 99 dos Block Maxima ao longo dos meses de outubro a abril.

Figura 2.11 - Gráfico do Z-scores das médias dos P95 e P99 do Block Maxima da precipitação no estado de Minas Gerais para os meses mais chuvosos da série histórica de 1977 a 2021.



Fonte: A autora (2024).

No mês de outubro, ambos os percentis apresentam Z-scores das médias negativos, com o P95 atingindo aproximadamente -1,09 e o P99 chegando a -1,15. Esses valores negativos indicam que a média dos eventos extremos de precipitação em outubro é significativamente menor do que a média geral ao longo dos meses analisados. Este comportamento sugere que outubro é um mês com menor intensidade de eventos extremos, tanto para precipitações frequentes (P95) quanto para as mais raras (P99).

Em novembro, há um aumento nos Z-scores para ambos os percentis, tornando-se levemente positivos, com P95 apresentando um Z-score de cerca de 0,29 e P99 de 0,20. Este aumento sugere que a intensidade dos eventos extremos de precipitação começa a se alinhar ou ligeiramente superar a média geral do período, indicando um mês em que os eventos extremos se tornam mais pronunciados.

Dezembro apresenta um crescimento contínuo nos Z-scores, com o P95 alcançando cerca de 0,95 e o P99, aproximadamente, 0,76. Esses valores indicam que a média das precipitações extremas é significativamente maior em dezembro, sobretudo para os eventos representados pelo P95. Isso sugere que dezembro é um período de aumento na intensidade dos eventos extremos de precipitação.

Janeiro marca o pico nos Z-scores para ambos os percentis, com o P95 atingindo cerca de 1,23 e o P99 chegando a aproximadamente 1,37, o maior valor do gráfico. Este comportamento indica que janeiro é o mês com a maior intensidade de precipitações extremas em relação à média geral. A elevada intensidade tanto para o P95 quanto para o P99 aponta para um período de alta frequência e magnitude dos eventos extremos, tornando janeiro o mês mais crítico em termos de extremos pluviométricos.

Após janeiro, os Z-scores começam a diminuir. Em fevereiro, o P95 apresenta um Z-score de cerca de 0,11, e o P99, aproximadamente 0,32, indicando uma diminuição na intensidade dos eventos extremos, embora ainda acima da média para o P99. Em março, ambos os percentis convergem para valores mais próximos de zero ou ligeiramente negativos, sugerindo que a intensidade dos eventos extremos retorna a níveis mais moderados ou abaixo da média, indicando um período de transição.

Abril apresenta os Z-scores mais negativos de todo o período para ambos os percentis, com o P95 e P99 atingindo valores em torno de -1,15. Este comportamento indica que abril é o mês com a menor intensidade de precipitações extremas em relação à média geral, sugerindo que é um período de eventos extremos de precipitação menos frequentes e menos intensos.

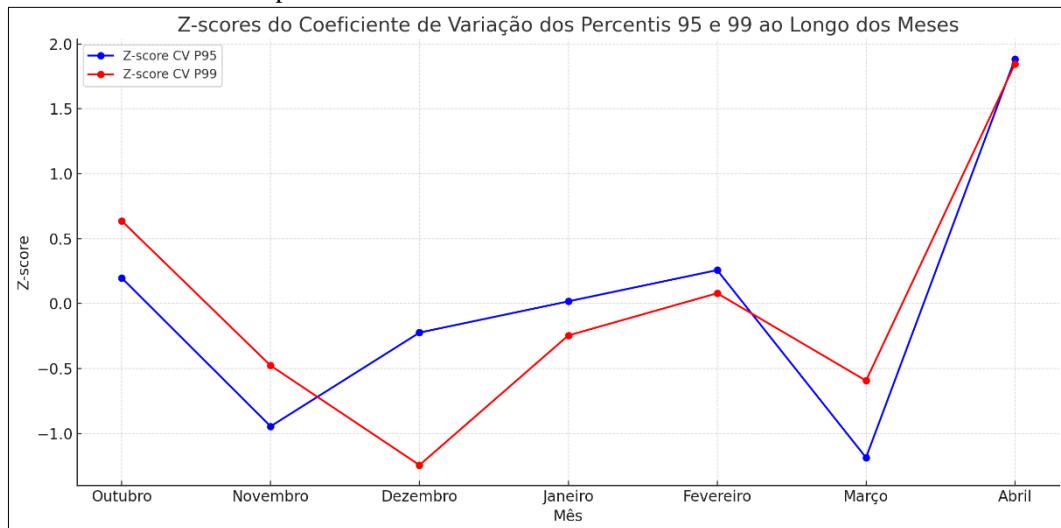
Comparando o gráfico do método convencional com o do BM nas análises do Z-

score mensal, o padrão sazonal é claro, com os meses de verão (dezembro e janeiro) mostrando os maiores Z-scores e os meses de transição (outubro e abril) os menores. No entanto, o método de Block Maxima, parece suavizar as diferenças entre os percentis, tornando o comportamento dos extremos de precipitação mais uniforme entre P95 e P99. Já no gráfico do método convencional do item anterior, há uma ligeira diferença entre os dois percentis, especialmente em janeiro e março, com o P99 mostrando valores mais elevados, indicando uma maior concentração de extremos mais severos em certos meses.

O gráfico da Figura 2.12 mostra os Z-scores dos coeficientes de variação dos percentis 95 e 99 dos Block Maxima ao longo dos meses de outubro a abril.

Em outubro, o Z-score do CV é positivo para o P99 e levemente positivo para o P95, indicando que a variabilidade relativa dos eventos extremos de precipitação é maior do que a média geral do período para os eventos mais raros (P99). Isso sugere que os eventos extremos de precipitação em outubro são menos previsíveis e apresentam maior dispersão em torno da média, especialmente para os percentis mais elevados.

Figura 2.12 - Gráfico do Z-scores dos CVs dos P95 e P99 do Block Maxima da precipitação no estado de Minas Gerais para os meses mais chuvosos da série histórica de 1977 a 2021.



Fonte: A autora (2024).

Em novembro, o gráfico mostra uma queda significativa nos Z-scores do CV, com o P95 atingindo um valor negativo próximo de -1,0 e o P99 também ficando negativo, mas menos acentuado. Este comportamento indica que a variabilidade relativa dos eventos extremos é menor em novembro em relação à média do período, sugerindo que há uma maior consistência nos eventos extremos de precipitação nesse mês, ou seja, eles são mais uniformes e previsíveis.

O mês de dezembro apresenta uma continuidade da tendência de novembro, com Z-scores do CV ainda negativos para ambos os percentis, embora menos acentuados. O Z-score do P95 é mais elevado em comparação ao P99, sugerindo que os eventos extremos de precipitação são ligeiramente mais variáveis para o P95 do que para o P99. No entanto, dezembro é caracterizado por eventos extremos que são mais previsíveis em comparação com outros meses.

A partir de janeiro, há um aumento gradual nos Z-scores do CV para ambos os percentis, com o P95 e P99 tornando-se positivos em fevereiro. O aumento do Z-score em fevereiro para o P95 atinge o seu ponto mais alto até então, indicando que a variabilidade relativa dos eventos extremos de precipitação nesse mês é superior à média geral do período. Isso sugere que os eventos extremos de precipitação são mais dispersos e imprevisíveis, principalmente para o percentil 95.

Março apresenta uma queda acentuada nos Z-scores do CV para ambos os percentis, com o P95 atingindo novamente valores negativos próximos de -1,0. Esse declínio indica que a variabilidade relativa dos eventos extremos de precipitação em março é menor que a média do período, sugerindo que os eventos extremos são mais consistentes e homogêneos nesse mês.

Abril se destaca por apresentar os Z-scores mais elevados para o CV em ambos os percentis, com o P95 e P99 atingindo seus valores máximos no período, cerca de 2,0. Isso indica uma altíssima variabilidade relativa dos eventos extremos de precipitação em abril, sugerindo que este é o mês mais imprevisível e disperso em relação aos eventos extremos de precipitação. A elevada dispersão implica que a intensidade dos eventos extremos em abril é muito variável e menos consistente em relação à média do período.

Em comparação com o método anterior, observa-se uma sazonalidade clara em ambos, com novembro e dezembro mostrando os menores valores de Z-score e janeiro e fevereiro como os meses com os maiores coeficientes de variação. No entanto, o método de Block Maxima apresenta uma maior diferença entre as linhas dos P95 e P99, especialmente nos meses de fevereiro e março. O comportamento mais linear do gráfico mostrado no item anterior (método convencional), sugere que o coeficiente de variação dos extremos de precipitação é capturado de forma mais uniforme para ambos os percentis ao longo dos meses. Mostrando como o método de Block Maxima é capaz de amplificar as diferenças entre os percentis nos meses de transição.

A Tabela 2.4 enfatiza os valores de média, desvio-padrão, coeficiente de variação para os P95 e P99 do Block Maxima para os meses considerados os mais chuvosos no

estado.

Tabela 2.4 – Média, desvio-padrão e coeficiente de variação e os respectivos Z-scores para os percentis 95 e 99 da precipitação diária dos Block Maxima para os meses mais chuvosos.

Mês	μ P95	σ P95	CV P95	μ P99	σ P99	CV P99	μ P95 Zsc	σ P95 Zsc	CV P95 Zsc	μ P99 Zsc	σ P99 Zsc	CV P99 Zsc
Out	69,45	11,29	0,16	90,42	23,13	0,26	-1,09	-1,13	0,20	-1,09	-0,39	0,64
Nov	89,18	12,86	0,14	110,9	23,08	0,21	0,29	-0,31	-0,95	0,20	-0,41	-0,48
Dez	98,62	15,35	0,16	119,7	20,97	0,18	0,95	0,99	-0,22	0,76	-1,20	-1,24
Jan	102,4	16,42	0,16	129,4	28,17	0,22	1,23	1,54	0,02	1,37	1,51	-0,25
Fev	86,58	14,22	0,16	112,8	26,20	0,23	0,11	0,40	0,26	0,32	0,77	0,08
Mar	85,36	11,97	0,14	106,3	21,63	0,20	0,02	-0,78	-1,19	-0,09	-0,95	-0,59
Abr	63,36	12,11	0,19	84,26	25,91	0,31	-1,52	-0,70	1,88	-1,48	0,66	1,84

Fonte: A autora (2024).

A média de precipitação para o P95 apresenta um Z-score de -1,090, indicando que a intensidade dos eventos extremos está significativamente abaixo da média geral para o período. O P99 também apresenta um Z-score negativo de -1,091, sugerindo que outubro é caracterizado por eventos extremos menos intensos em relação ao período analisado. Os Z-scores das médias em novembro (0,293 para P95 e 0,203 para P99) indicam que a intensidade dos eventos extremos para esse mês se aproxima da média geral, sendo um pouco mais elevada para P95. Isso sugere uma leve intensificação dos eventos extremos em comparação com outubro. Em dezembro, há um aumento notável na intensidade dos eventos extremos, com Z-scores positivos para P95 (0,954) e P99 (0,759). Isso indica que dezembro é um período de eventos extremos mais intensos, com a média situando-se significativamente acima da média geral do período.

Janeiro é o mês com os maiores Z-scores de médias (1,225 para P95 e 1,374 para P99), indicando que os eventos extremos de precipitação são os mais intensos durante este mês. A alta intensidade observada em janeiro destaca-o como o período de maior ocorrência de precipitação extrema na série analisada. O Z-score da média em fevereiro diminui (0,110 para P95 e 0,324 para P99), sugerindo que a intensidade dos eventos extremos é ligeiramente acima da média, mas não tão pronunciada quanto em janeiro. Fevereiro ainda é um período com precipitações extremas, embora não tão intensas. Os Z-scores da média para março (0,025 para P95 e -0,088 para P99) indicam uma intensidade próxima ou ligeiramente abaixo da média geral, dando indícios de que os eventos extremos em março são menos intensos em comparação com os meses anteriores. Em abril há um declínio acentuado na intensidade, com Z-scores negativos de -1,517 para

P95 e -1,480 para P99, indicando que abril é o mês com a menor intensidade de precipitações extremas em relação ao período analisado.

Outubro apresenta um Z-score de -1,134 para o P95, indicando menor variabilidade em relação à média, enquanto o P99 também mostra uma variabilidade abaixo da média. Esses resultados sugerem que os eventos extremos em outubro são mais homogêneos e consistentes. Janeiro se destaca pela maior variabilidade, com Z-scores de 1,544 para P95 e 1,514 para P99. Isso indica uma alta dispersão dos eventos extremos, sugerindo que as precipitações em janeiro são mais imprevisíveis e apresentam maior amplitude. Em abril o desvio padrão para o P99 tem um Z-score positivo (0,663), indicando uma variabilidade superior à média, sugerindo que, mesmo com a baixa intensidade, há uma dispersão significativa nos eventos extremos de precipitação.

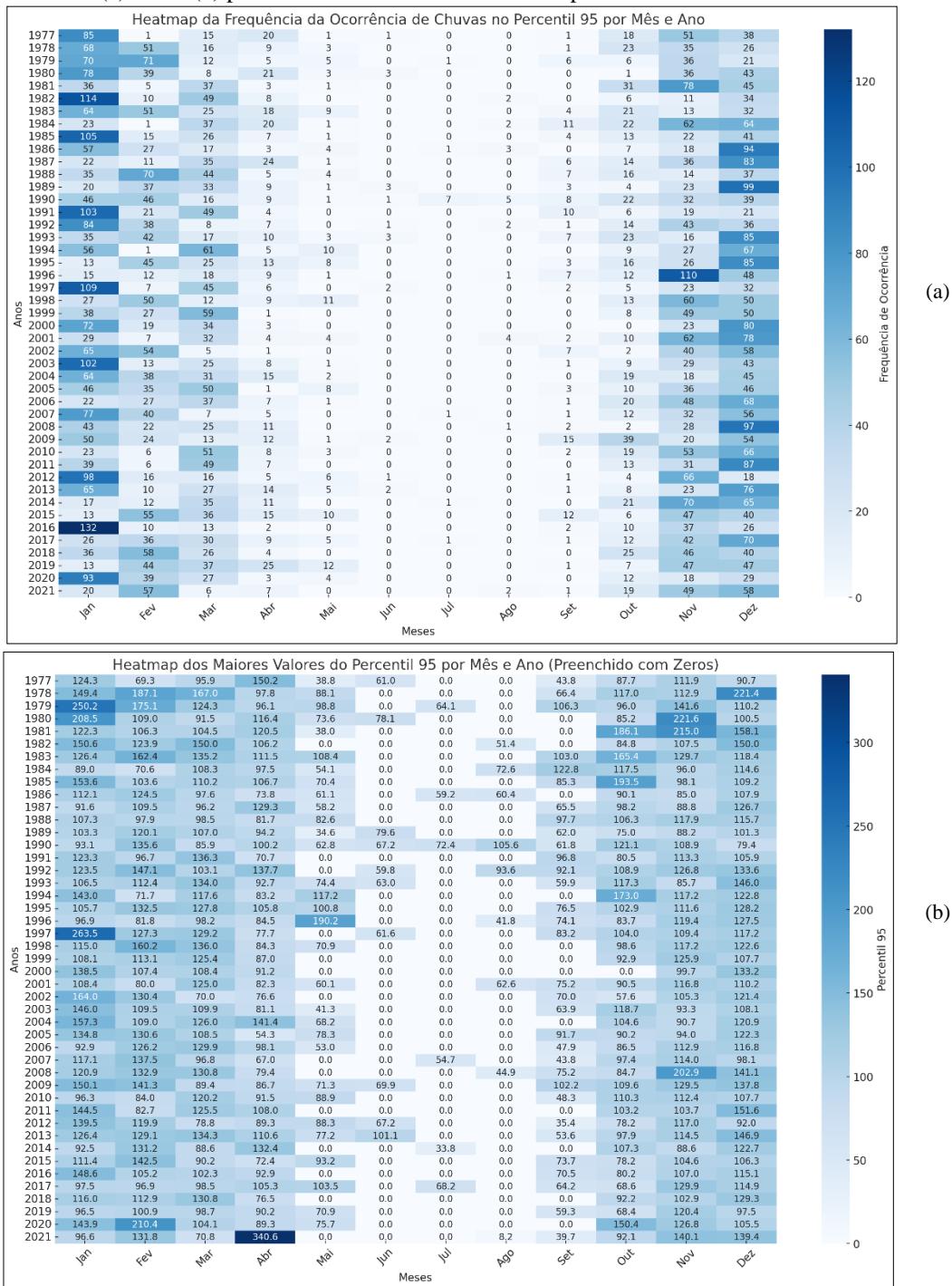
Em outubro o Z-score do CV é positivo para P99 (0,637), indicando que os eventos extremos neste mês têm maior variabilidade relativa, o que sugere menor previsibilidade. Janeiro: Apresenta um Z-score levemente negativo para P95 (0,017), mas ainda positivo, enquanto o P99 é negativo (-0,245), sugerindo que, embora haja alta intensidade, a variabilidade relativa é comparativamente menor do que em outros meses. Em abril os Z-scores são mais altos para o CV (1,882 para P95 e 1,844 para P99), indicando uma dispersão relativa extremamente elevada em relação à média do período, sugerindo que os eventos extremos são menos consistentes e previsíveis.

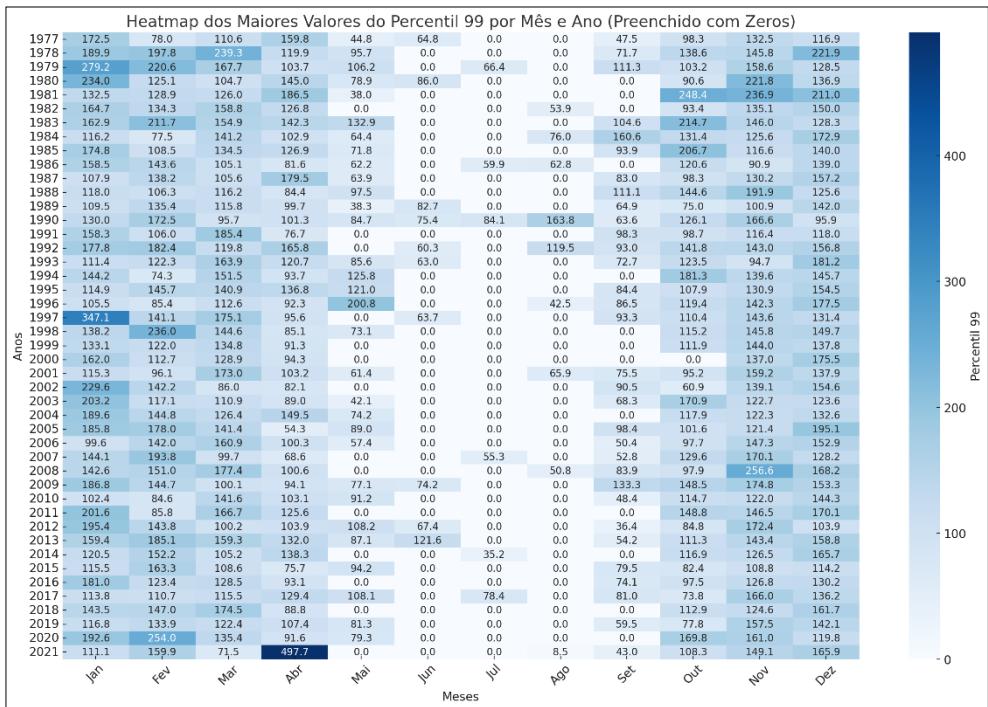
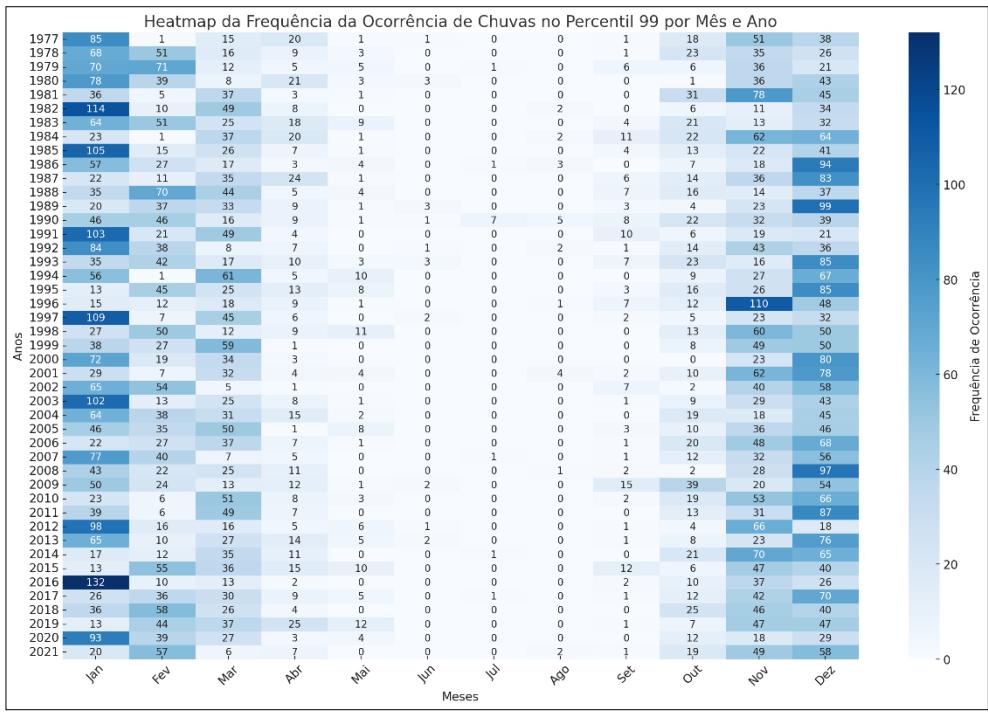
A análise dos Z-scores das médias, desvios padrão e coeficientes de variação revela uma variabilidade sazonal distinta nos eventos extremos de precipitação. Janeiro é o mês de maior intensidade e variabilidade absoluta, enquanto abril se destaca pela alta variabilidade relativa, indicando um período de extremos pluviométricos menos previsíveis. Outubro e novembro apresentam eventos extremos menos intensos e mais consistentes.

Essas análises são importantes para a compreensão da dinâmica climática de Minas Gerais e podem auxiliar na gestão de recursos hídricos e na prevenção de desastres naturais, especialmente durante os períodos de transição climática.

Os mapas de calor da Figura 2.13 (a, b, c e d), destacam a frequência e a magnitude, respectivamente, dos eventos extremos de precipitação no estado para a série histórica.

Figura 2.13 - Mapas de calor de magnitude e frequência da ocorrência de precipitação por meses e anos nos P95 (a) e P99 (b) por BM no estado de Minas Gerais para a série histórica de 1977 a 2021.





Fonte: A autora (2024).

Em comparação com a técnica convencional, a técnica de BM demonstrou ser eficaz ao filtrar os dias secos (com valores de pluviometria baixos ou zero) e considerar apenas os máximos no cálculo dos percentis, evidenciando seu potencial de refinamento. Esta técnica conseguiu identificar com maior precisão os anos e os meses com eventos extremos de grandes magnitudes, os quais não puderam ser detectados anteriormente, conforme mostram os mapas da Figura 3.14 (a e c). Esses eventos se concentraram nos

meses de primavera e verão, como já esperado.

Em relação à frequência das ocorrências por mês e ano, considerando todas as estações para a série, a técnica de BM mostrou uma sensibilidade superior ao método convencional, destacando apenas os anos e meses com ocorrência de eventos de grandes magnitudes e reduzindo consideravelmente a frequência nos demais períodos, como ilustrado na Figura 2.14 (b e d). Os meses de janeiro e dezembro concentraram o maior número de eventos extremos de grandes magnitudes. Esses eventos podem estar correlacionados com os anos de ocorrência de El Niño, que geralmente se estendem entre os meses de outubro a março, mas com maior intensidade em janeiro e fevereiro (Cavalcanti et al., 2016; Grimm e Tedeschi, 2009; Nobre e Shukla, 1996; Ropelewski e Hailpert, 1987; Silva e Kousky, 2012).

Nos meses de inverno (maio, junho e julho), a nova análise identificou eventos extremos para alguns anos da série, demonstrando a eficiência da técnica de BM em destacar esses eventos mesmo em meses tradicionalmente secos, o que não foi possível com a abordagem convencional. Durante o inverno no hemisfério sul, a região Sudeste do Brasil pode ser influenciada por sistemas frontais, frentes frias e áreas de baixa pressão, resultando em eventos de chuvas intensas e até extremos de precipitação (Carvalho, Jones e Liebmann, 2002).

Eventos de precipitação extrema, como os apresentados aqui, podem causar inundações significativas, deslizamentos de terra e outros desastres naturais. A infraestrutura local deve ser projetada para suportar essas condições extremas (Guedes et al., 2023).

Anteriormente, abril era considerado livre de eventos extremos, mas a nova análise identifica valores de *outliers* para o P95 entre 100 e 150 mm diários, destacando a capacidade da técnica de BM em detectar extremos anteriormente não identificados. Tal evento extremo ocorreu no início de abril de 2004 em Belo Horizonte, atingindo também outras áreas de Minas Gerais por fortes chuvas que causaram enchentes e deslizamentos de terra. Mais precisamente entre os dias 3 e 7, com 56, 84, 120, 70 e 92 mm respectivamente por dia, acumulando mais de 400mm no total. Este evento resultou em danos significativos à infraestrutura, incluindo ruas alagadas, interrupções no trânsito, deslizamentos que afetaram residências e deslocamentos de pessoas. Esse fato pode ser comprovado pelos relatórios da Defesa Civil de Minas Gerais, do Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM) e pelas notícias na mídia como o jornal “O Estados de Minas” e o “O Tempo” que cobriram os efeitos do desastre. Em abril de 2021, houve registros de

chuvas intensas em várias regiões de Minas Gerais, incluindo o município de Florestal. Segundo as previsões e monitoramentos meteorológicos da época (INMET e Climatempo, 2024), essa região foi impactada por episódios de chuva considerável, com volumes que variaram bastante, possivelmente atingindo acumulados significativos em determinados dias, como observado em outras cidades do estado durante o mesmo período, o que explica o valor alto no respectivo mês de ano no *heatmap*.

Os valores médios no P95 variam de 68 mm em julho a 100 mm em janeiro, e de 85 mm em julho a 140 mm em janeiro para o P99, destacando o comportamento dos extremos pluviométricos nos meses de verão, mas também evidenciando a ocorrência dos mesmos no inverno, ainda sem considerar os *outliers*. Comparativamente, a análise anterior não capturava essa diferenciação detalhada dos extremos sazonais.

Os *outliers* em alguns meses específicos são notáveis: em janeiro, os *outliers* para os máximos absolutos variaram entre 200 e 300 mm diários, significativamente mais altos que o padrão usual de precipitação máxima para janeiro, indicando eventos de chuva extrema, como tempestades tropicais associadas à atuação da ZCAS, sistemas frontais intensos ou eventos de convecção. Em abril, os *outliers* do percentil 95 superaram os 130 mm, sugerindo que alguns dias experimentaram chuvas muito intensas, possivelmente devido a sistemas convectivos ou sistemas frontais em algumas regiões do estado.

Os *outliers* mais altos (acima dos bigodes superiores das caixas) foram encontrados no percentil 99, variando entre 200 e 350 mm diários. Valores acima do bigode superior para este percentil no mês de dezembro indicam que podem ocorrer eventos de precipitação extremamente altos. Estes valores muito altos de precipitação diária podem estar correlacionados com os anos de ocorrência de El Niño, os quais tiverem sua permanência entre os meses de outubro a março, mas com maior intensidade em janeiro e fevereiro (Cavalcanti et al., 2016; Grimm & Tedeschi, 2009; Nobre & Shukla, 1996; Ropelenwski & Halpert, 1987; S. Silva & Kousky, 2012).

A análise também identificou *outliers* abaixo dos valores mínimos, representando eventos de precipitação anormalmente baixos que ocorrem raramente. Eles podem indicar períodos de seca ou condições meteorológicas atípicas dentro do mês, ou ainda anomalias locais específicas de uma região em particular que não se alinham com o padrão geral. Comparativamente, a análise anterior não identificava esses *outliers* negativos com tanta sensibilidade e clareza.

Esses *outliers* ocorreram em alguns meses específicos, como fevereiro, com *outliers* no percentil 95 em torno dos 50 mm, 25 mm em maio e 23 mm em setembro,

indicando que, embora nesses meses geralmente ocorra alta precipitação, houve eventos raros de precipitação muito baixa, sugerindo períodos de seca mesmo em meses geralmente chuvosos em algumas localidades.

A maioria dos *outliers* abaixo dos valores mínimos se concentrou nos meses de inverno, de junho a agosto. Embora estes meses sejam geralmente mais secos, os *outliers*, quando presentes, indicam eventos de precipitação anômala, possivelmente resultado de sistemas convectivos isolados ou perturbações atmosféricas raras.

2.2.2 ANÁLISE ESPACIAL DA FREQUÊNCIA E INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO EXTREMA EM MINAS GERAIS

A climatologia geográfica ou a geografia do clima, segundo (Neto, 2001), representam pilares na ciência geográfica ao colocarem o espaço como um elemento central. Tais abordagens possibilitam uma visão do espaço não apenas como um local onde ocorrem fenômenos meteorológicos e climáticos, mas também como um ambiente que estabelece conexões entre esses fenômenos, dinâmicas e processos, sendo sua existência relativa. Dessa forma, ao considerar o espaço como relativo, torna-se essencial compreender os fenômenos climáticos, como os eventos extremos de precipitação, partindo da premissa de que a existência do espaço e dos extremos está intrinsecamente ligada, conforme destacado por (Harvey, 2015).

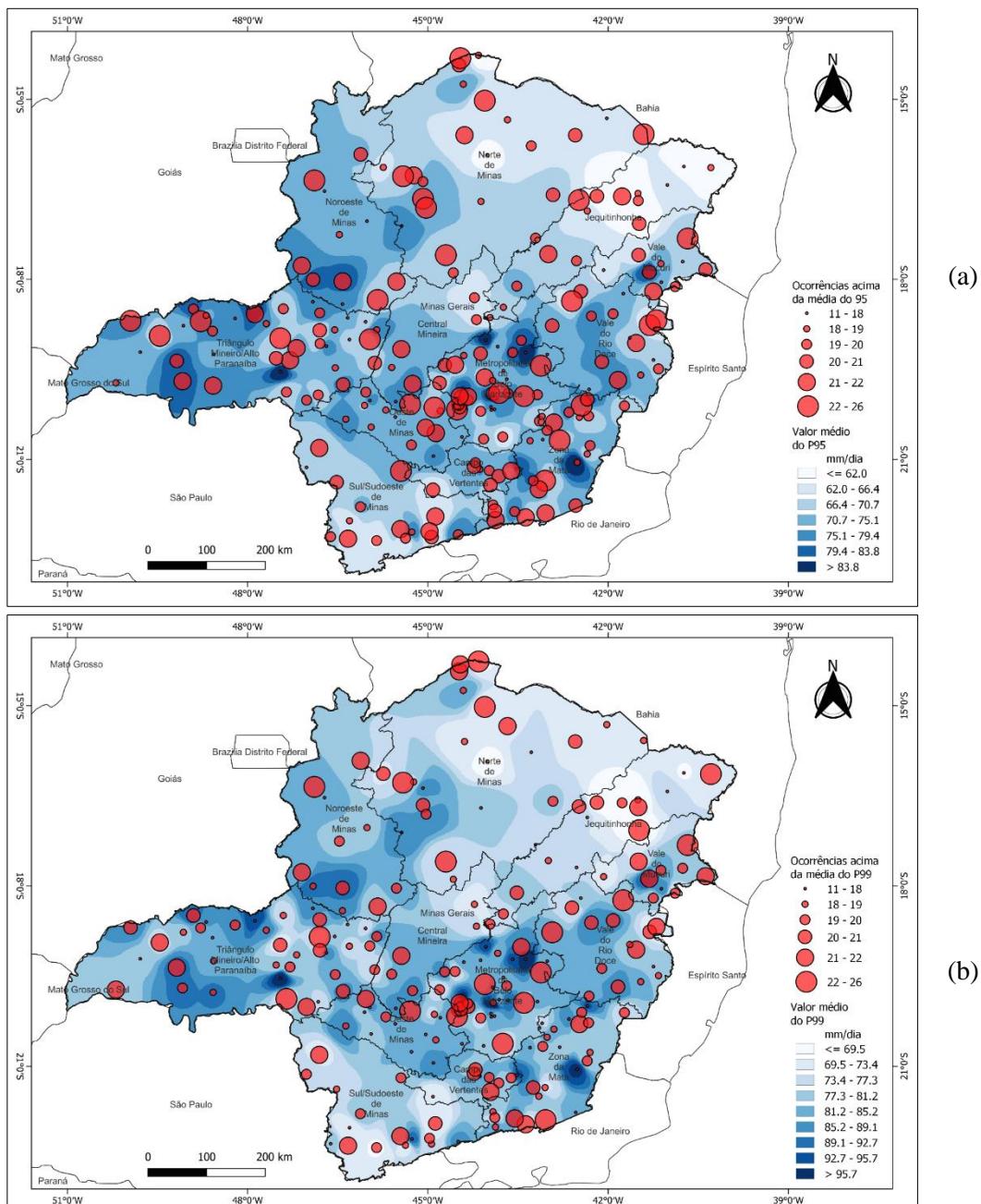
2.2.2.1 *Análise da distribuição espacial dos extremos pluviométricos: abordagem dos percentis convencional*

O conceito de ritmo, que se refere à sequência regular dos diferentes tipos de tempo, ajuda a entender como os sistemas atmosféricos atuam em uma determinada região. Ao considerar o espaço de forma relativa, é possível ter uma visão abrangente dos fenômenos climáticos, analisando como a circulação atmosférica interage com o espaço geográfico. Essa abordagem ampla destaca a importância dessa relação para o estudo do clima e dos eventos meteorológicos.

Os mapas das Figura 2.14 (a e b), mostram a distribuição espacial da frequência e magnitude dos extremos pluviométricos para os percentis 95 (a) e 99 (b) respectivamente, corroborando com as análises anteriores, sendo possível agora visualizar quais as regiões do estado são mais suscetíveis à ocorrência de eventos de grandes magnitudes e com que frequência eles ocorrem, considerando os percentis e máximos de todos os dados diários.

Assim, a análise da distribuição espacial dos eventos extremos de precipitação é essencial para compreender como a intensidade e a frequência desses eventos ocorrem em diferentes localidades do estado de Minas Gerais, para que com isso, seja possível integrar nas análises fatores como relevo, uso e cobertura do solo, além de ser possível visualizar como os fenômenos climáticos se comportam pelo espaço, auxiliando com maior precisão nas tomadas de decisão e nas medidas de mitigação de desastres.

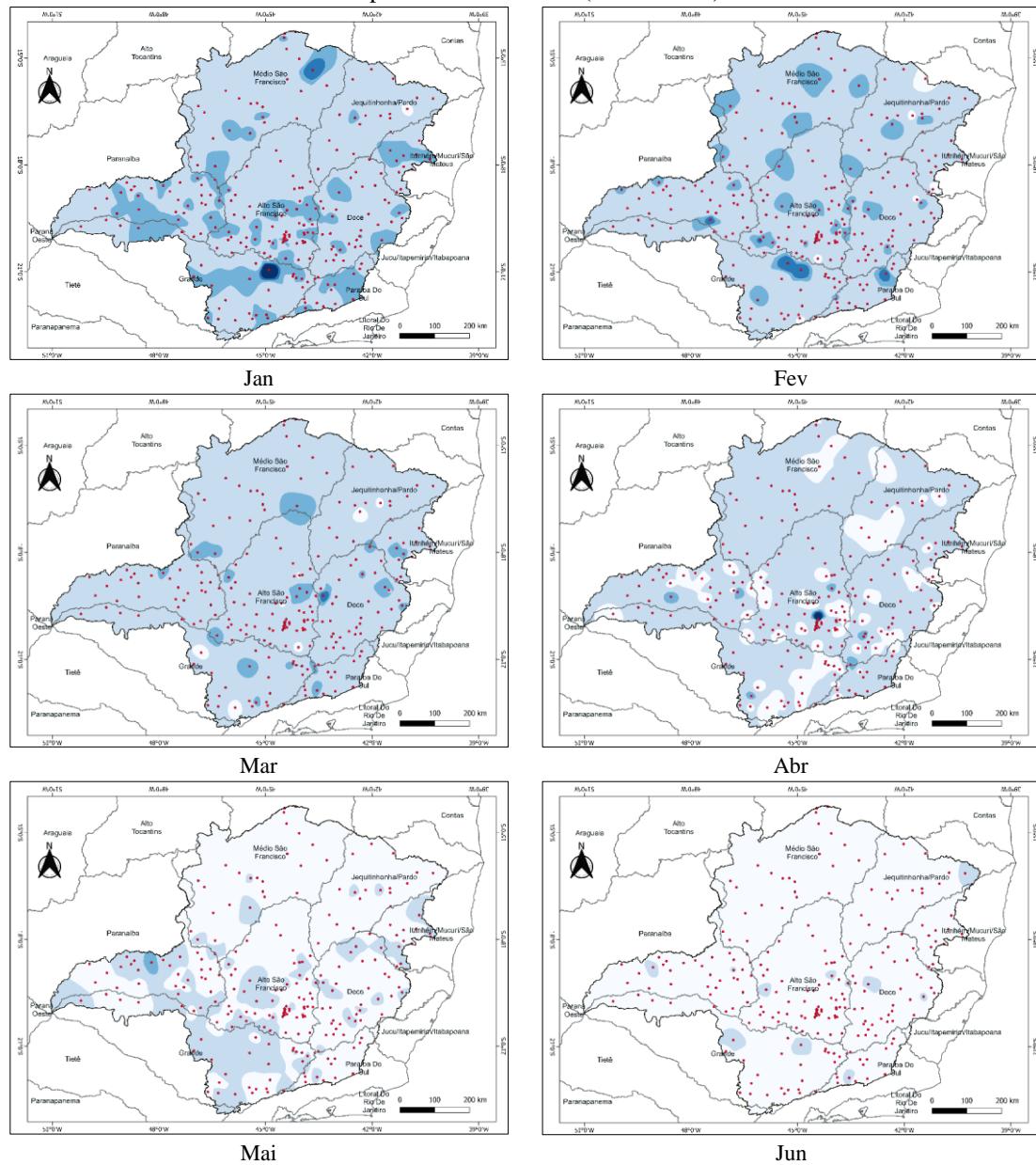
Figura 2.14 - Mapas da distribuição espacial da frequência e da magnitude para os percentis 95 (a) e 99 (b) da ocorrência de eventos extremos pluviométricos diários em Minas Gerais para a série histórica de 1977 a 2021.

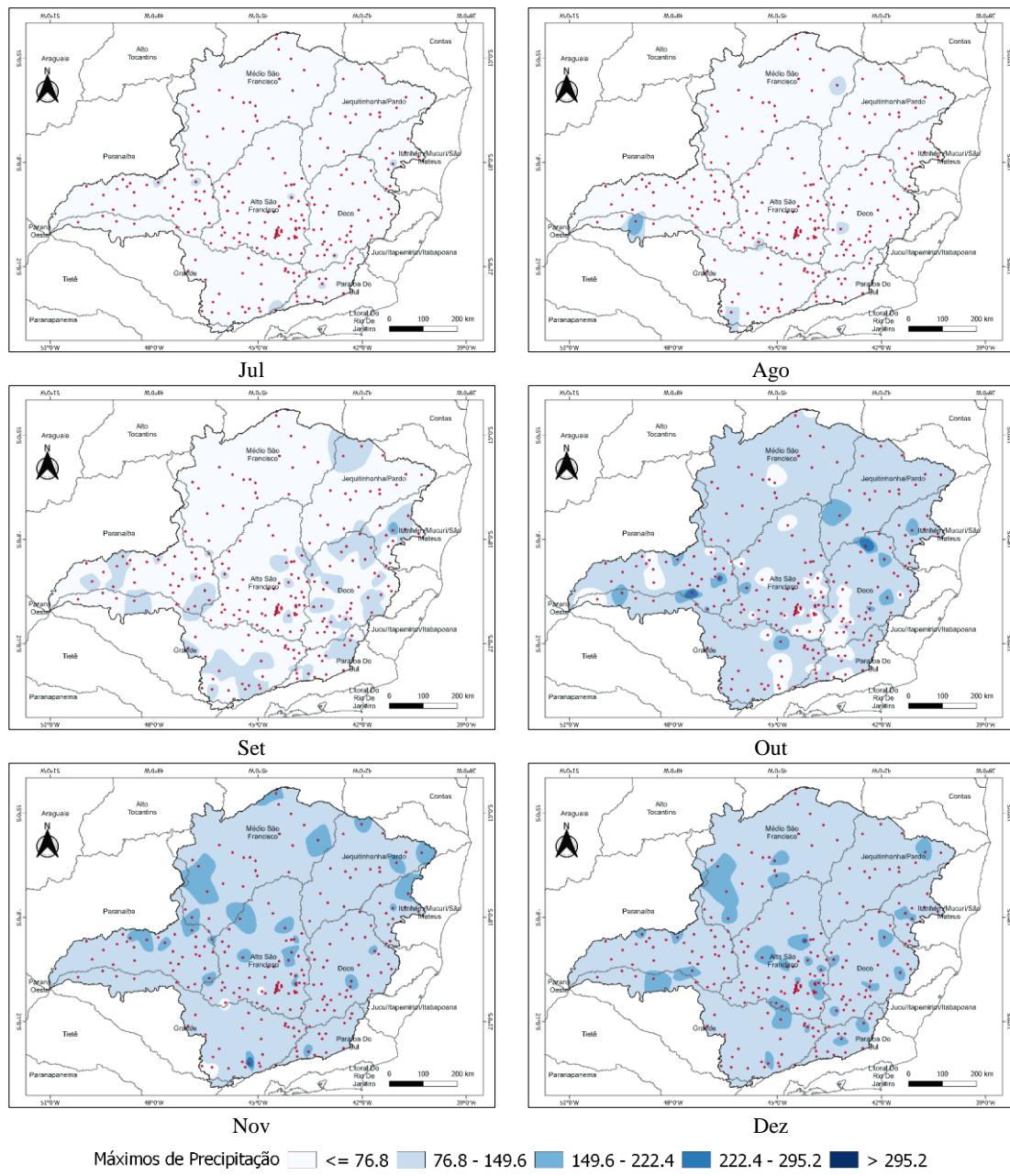


Fonte: A autora (2024).

Os mapas da Figura 2.15, mostram a distribuição espacial dos máximos de precipitação diária, por mês para o estado de Minas Gerais. Para a geração da superfície utilizou-se o método de interpolação de Ponderação pelo Inverso da Distância (IDW).

Figura 2.15 – Distribuição espacial dos máximos de precipitação diária no estado de Minas Gerais por mês para a série histórica (1977 - 2021).





Fonte: A Autora (2024).

Analizando os mapas em questão em relação a variabilidade sazonal, percebe-se que os maiores máximos diários de precipitação se concentram nos meses de outubro a março. Verifica-se, ainda, que apresentaram uma distribuição uniforme para todo estado, com valores entre 75 e 150 mm, aproximadamente. No mês de janeiro, em especial, muitos postos apresentaram valores entre 150 e 250 mm, especialmente nas regiões sul e sudeste do estado. Dois postos chamam a atenção para valores superiores a 250 mm, um na região oeste, no município de Santo Antônio do Amparo, com efeitos nos municípios vizinhos num raio de até 30 km; o outro na região norte do estado, no município de Jaíba, com máximo de 245 mm.

No mês de fevereiro os máximos mais altos começam a se concentrar em alguns postos mais específicos, mais ainda assim de forma bem distribuída por todas as regiões, mantendo o alerta para a região oeste do estado, nos municípios de Santo Antônio do Amparo, Candeias e arredores. Os dois postos em questão estão localizados em regiões com comportamentos pluviométricos opostos e características socioeconômicas bem diferentes, sendo a região norte de Minas uma região de pouca chuva e com tendência de diminuição, porém sendo mais suscetível a eventos de precipitação extrema, como inundações, do que à eventos de seca devido à sua vulnerabilidade econômica. Já as cidades das partes sul e oeste de Minas Gerais, apresentam maior volume de chuva e são identificadas como pontos quentes de desastres devido a precipitação extrema, porém com uma economia melhor estruturada. Sendo assim, ambas sofrerão e responderão de forma bastante diferentes a esses eventos e seus impactos (Pereira *et al.*, 2018; Sondermann *et al.*, 2022).

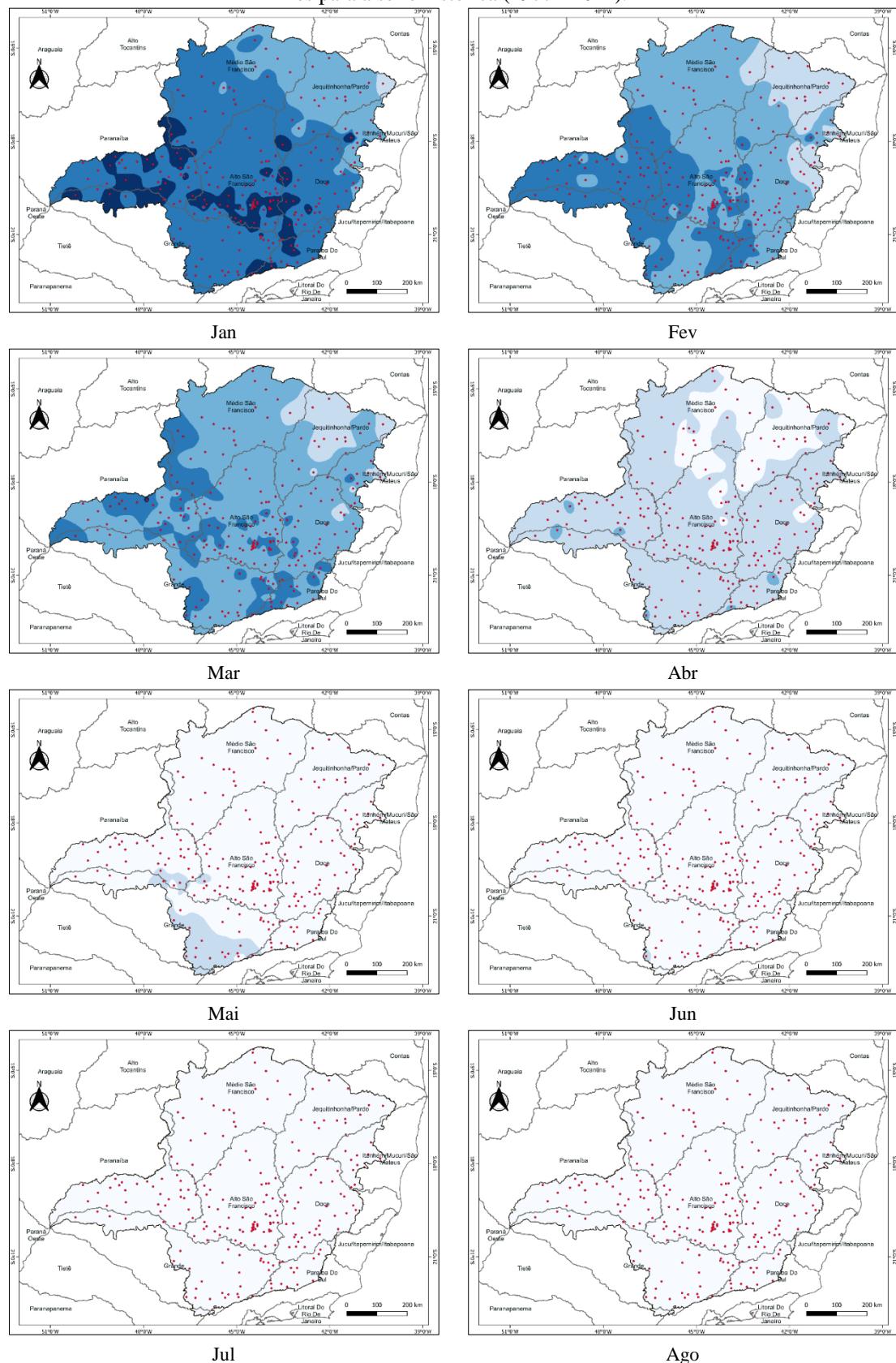
É importante notar que em abril, um mês considerado de transição na dinâmica climática regional, o qual indica uma redução na precipitação, foram observados eventos de máximos altos em pontos isolados do estado e especialmente significativo na região metropolitana de Belo Horizonte, sugerindo que a distribuição da chuva em abril é concentrada devido à menor média de acumulados de chuva em comparação com os outros meses da estação chuvosa, juntamente com a ocorrência de eventos extremos de maior magnitude.

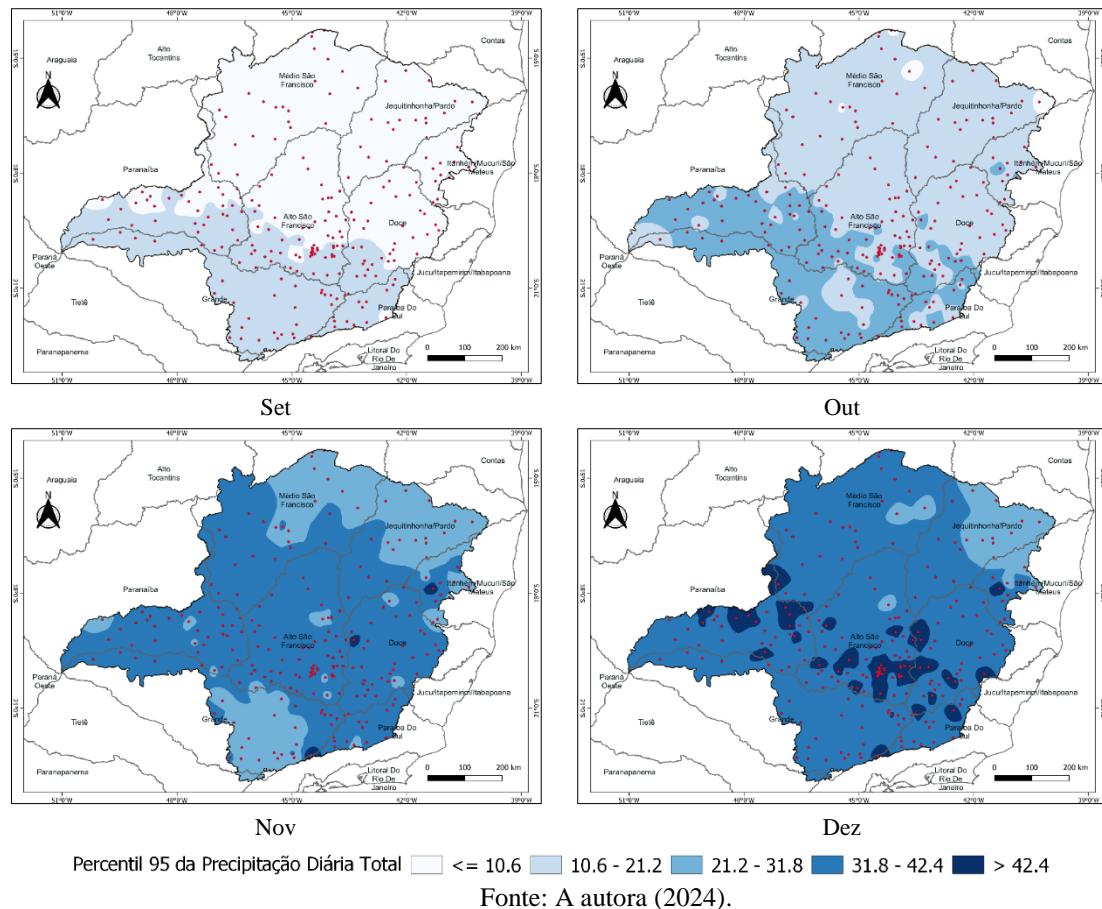
Maio e setembro são meses de transição, onde o primeiro apresenta um declínio gradual nos máximos, concentrando eventos de menor magnitude em postos da região sul e sudeste do estado, para entrar na estação seca entre junho e agosto. O segundo apresenta um comportamento de aumento gradativo tanto na magnitude dos eventos, quanto na distribuição espacial dos mesmos já iniciando a entrada na estação chuvosa.

Junho e agosto ainda apresentam alguns postos com valores altos de máximos diários, porém com um nível de magnitude bem inferior aos meses chuvosos e em postos bem específicos espalhados principalmente na região sul, evidenciando o comportamento um tanto quanto mais chuvoso da região mesmo em meses mais secos e em localidades bem específicas, fazendo com que esses destaques de máximos sejam atribuídos ao pouco volume pluviométrico do período.

A Figura 2.16 traz a distribuição espacial do P95 de precipitação diária para o estado de Minas Gerais para cada mês, considerando todos os anos da série histórica.

Figura 2.16 - Distribuição espacial dos percentis 95 de precipitação diária no estado de Minas Gerais por mês para a série histórica (1977 - 2021).





Com vistas aos percentis 95 mostrados nos mapas da Figura 2.16, tanto no aspecto sazonal quanto espacial, para os totais diários de precipitação, os valores ficam entre aproximadamente 10 e 42 mm diários.

A variabilidade sazonal se mantém, mostrando os valores mais altos no P95 para os meses de novembro, dezembro e janeiro, com valores superiores a 42 mm diários. Espacialmente, os postos que apresentam tais valores estão distribuídos em algumas regiões do estado que abrangem principalmente o Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Central Mineira, RMBH, Zona da Mata e Oeste de Minas formando uma espécie de ‘cinturão’. Os meses de fevereiro e março já não apresentam valores tão altos no P95, ficando abaixo dos 20 mm diários em boa parte do Jequitinhonha e Norte de Minas, abaixo dos 30 mm na faixa mais central do estado e um pouco acima dos 30 mm, principalmente na região do Noroeste, Triângulo Mineiro e uma Campo das Vertentes e RMBH. Em março a concentração de valores mais altos ficam cada vez mais concentradas em algumas estações, já mostrando que os extremos começam a diminuir.

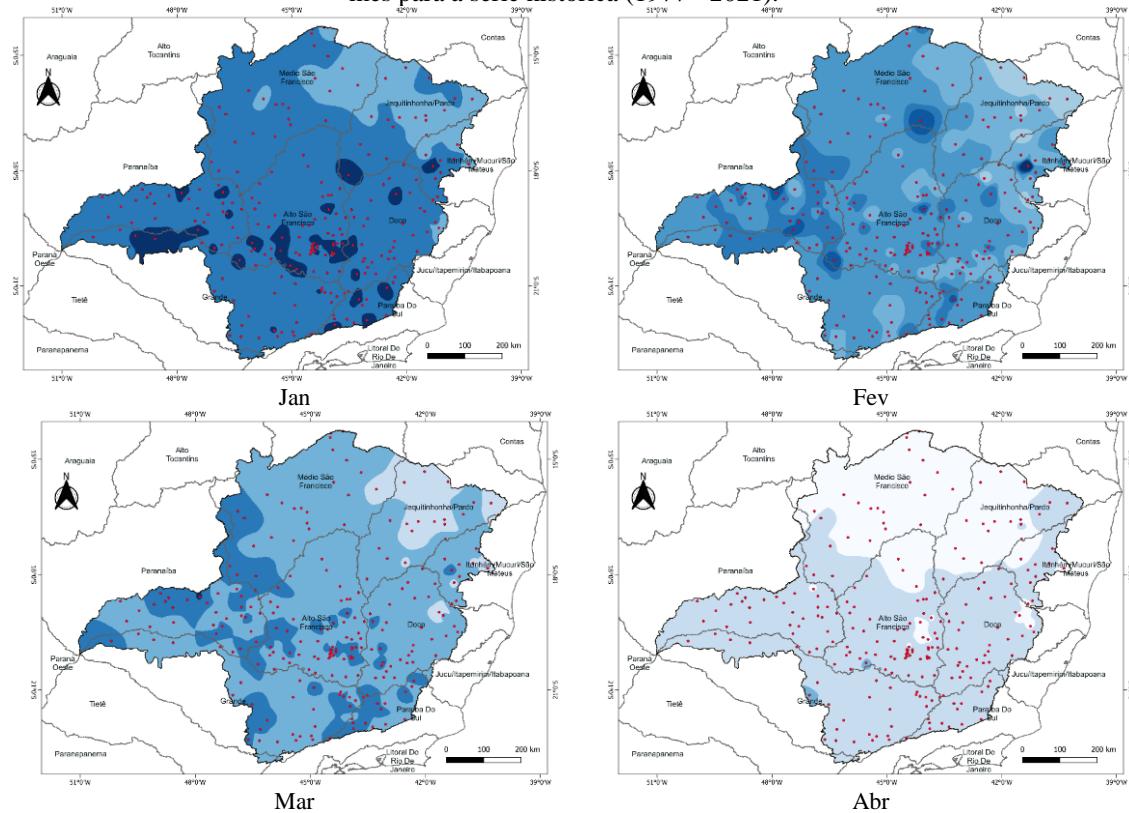
Os meses de abril, maio, junho, julho e agosto não apresentam postos com valores superiores aos 25 mm diários, evidenciando que o efeito dos extremos na estação está

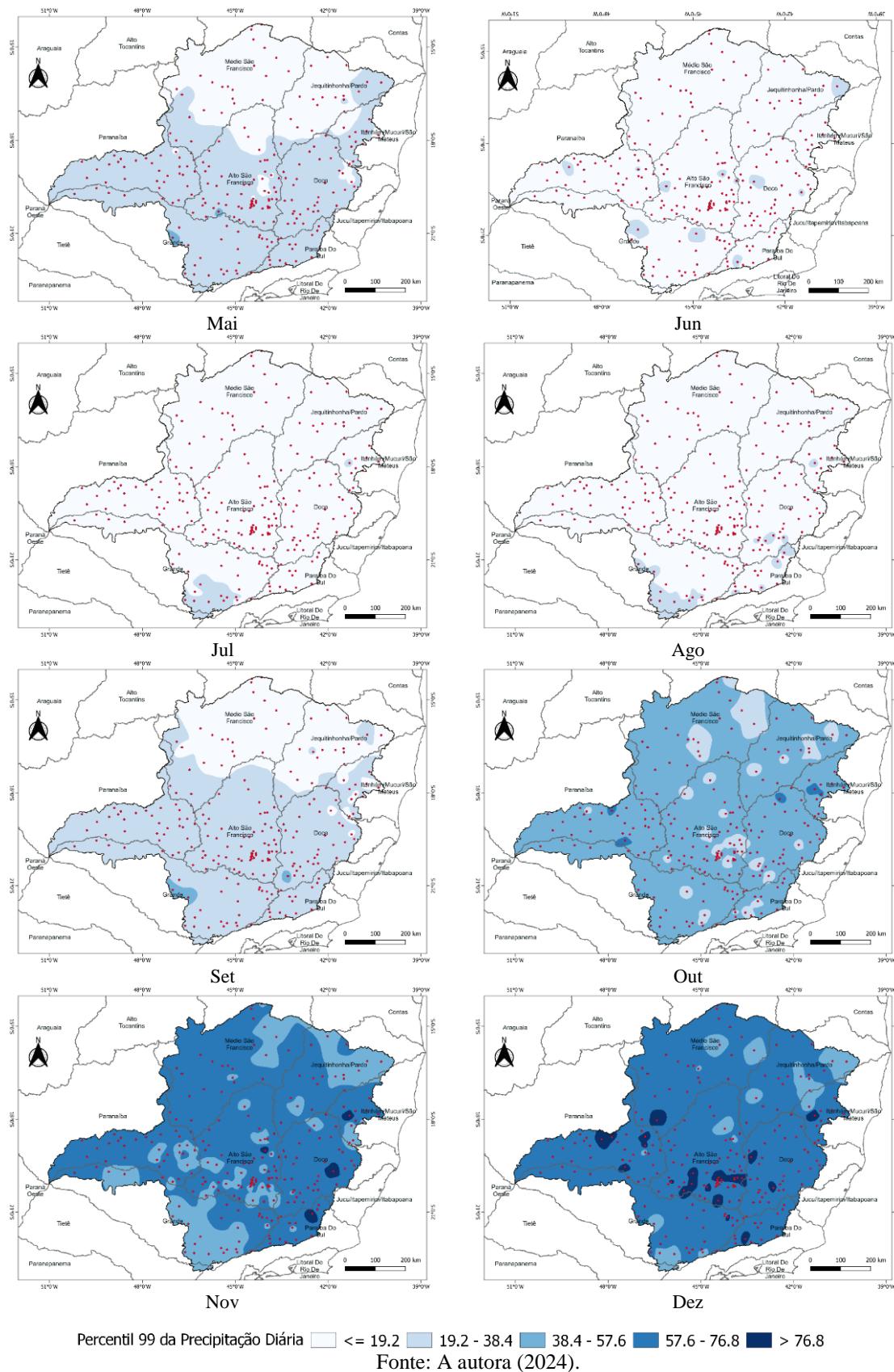
terminando. Setembro e outubro agora passam a ser os meses de transição para a volta da temporada dos extremos, porém ainda não mostram valores superiores aos 20 mm para todo estado, com pouquíssima variabilidade tanto espacial quanto na magnitude desses extremos.

Em novembro os valores voltam a bater a marca dos 35 mm diárias em grande parte do estado, mas ainda não mostram concentrações extremas, com um único posto mostrando valores nos 45 mm, na RMBH. Dezembro então, já começa a mostrar a formação do ‘cinturão’ de extremos que vai do Noroeste de Minas, uma porção do Triângulo Mineiro até a Zona da Mata.

A Figura 2.17 traz a distribuição espacial do P99 de precipitação diária para o estado de Minas Gerais para cada mês, considerando todos os anos da série histórica.

Figura 2.17 - Distribuição espacial dos percentis 99 de precipitação diária no estado de Minas Gerais por mês para a série histórica (1977 - 2021).





Os mapas da Figura 2.17, mostram que tanto no padrão sazonal quanto no padrão espacial é notável que as superfícies mantêm o mesmo comportamento do percentil 95,

com maior incidência de extremos nos meses de outubro a março, com uma redução drástica nos meses de junho e julho, passando por abril, maio e setembro como meses de transição, com volumes pluviométricos que variam de 19 a 77mm.

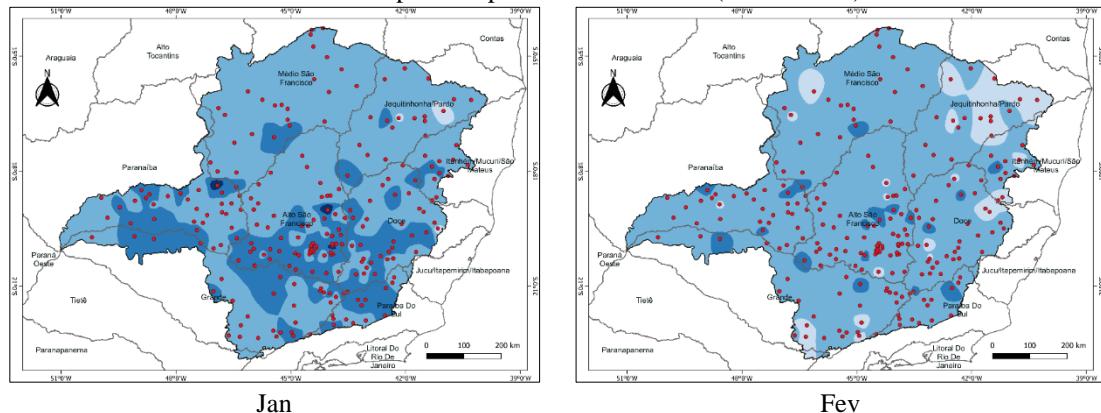
Porém, o número de localidades (estações pluviométricas) atingidas por eventos pluviométricos diários extremos diminuíram apesar de manterem o padrão espacial. No entanto, as magnitudes desses eventos praticamente duplicam, como por exemplo: em estações onde os P95 mostram chuvas em torno de 43 mm em janeiro passam a apresentar 85mm diários no P99. O mesmo ocorre no mês de março, quando o P95 mostra 35mm e no P99 superam os 65mm. Isso ocorre para todos os meses, com exceção de junho e julho, onde a amplitude pluviométrica reduz drasticamente, ficando em torno de 10 mm de diferença entre os percentis 95 e 99.

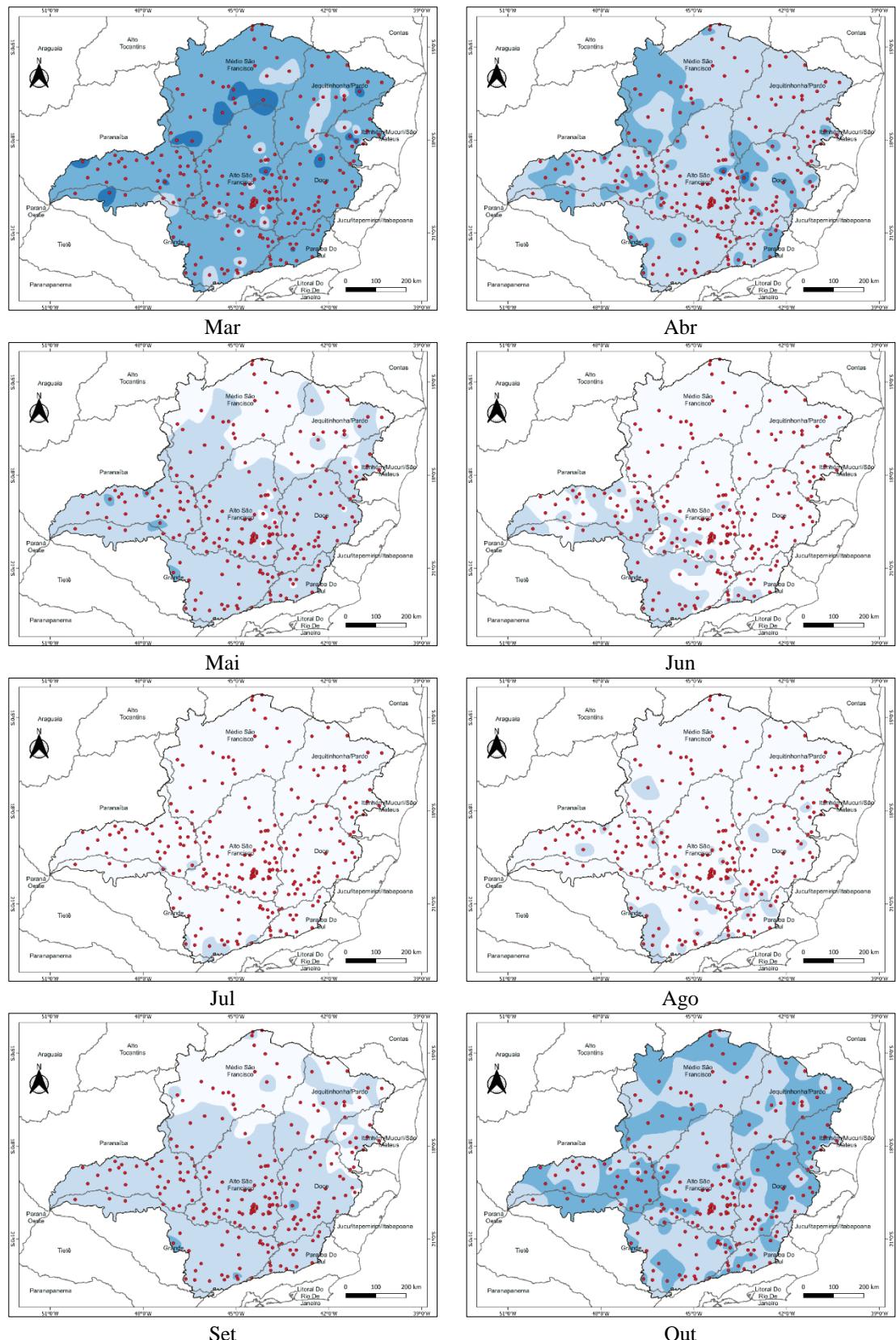
Os eventos de precipitação no percentil 99 dos valores máximos são mais raros e significativamente mais intensos do que os do percentil 95. Essa diferença é crucial para a compreensão e gestão dos riscos associados a eventos climáticos extremos (ANDRADE e LIMA, 2013; COSTA et al., 2015; GERMANO et al., 2016).

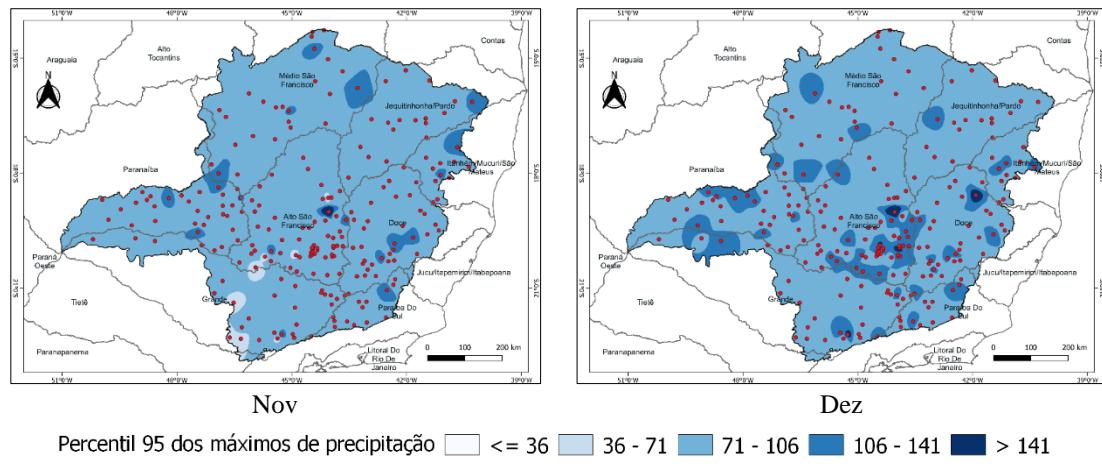
2.2.2.2 Análise da distribuição espacial dos extremos pluviométricos: abordagem Block Maxima

Os mapas mostrados na Figura 2.18 trazem a distribuição espacial da precipitação nos P95, calculados utilizando apenas os valores máximos de precipitação (Block Maxima), indicando o valor abaixo do qual 95% dos máximos se encontram.

Figura 2.18 - Distribuição espacial dos percentis 95 de precipitação por Block Maxima no estado de Minas Gerais por mês para a série histórica (1977 - 2021).







Enquanto os percentis diários tendem a ser menores porque consideram toda a gama de valores diários de precipitação, incluindo muitos dias com precipitação baixa ou sem nenhuma precipitação, os percentis dos máximos apresentam valores maiores, pois consideram apenas os dias com precipitação máxima, que são, por definição, valores mais altos.

No P95 dos máximos, Figura 2.18, a precipitação varia de valores inferiores a 30 mm a superiores que 140mm. Tanto o padrão sazonal quanto o padrão espacial se mantêm em relação aos percentis diários geral, porém para os meses mais chuvosos (outubro a março), o método de BM foi capaz de capturar eventos de magnitudes muito superiores aos mostrados anteriormente. É possível identificar as áreas onde os máximos são consistentemente mais altos.

No mês de janeiro por exemplo, a diferença entre a magnitude dos eventos extremos mais altos (partes em azul mais escuro nos mapas), identificados pelos dois métodos, foi de mais de 100 mm para alguns postos. No mês de fevereiro essa amplitude diminui um pouco, mas se mantém considerável, entre 80 e 100 mm de diferença, assim como para março. Em abril, um mês de transição entre a temporada de extremos e a sua redução, diversas estações, principalmente no Noroeste de Minas, RMBH e Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, onde anteriormente as estações não mostravam os eventos de grande magnitude, agora mostram e com uma diferença de mais de 60 mm entre o método convencional e o de BM.

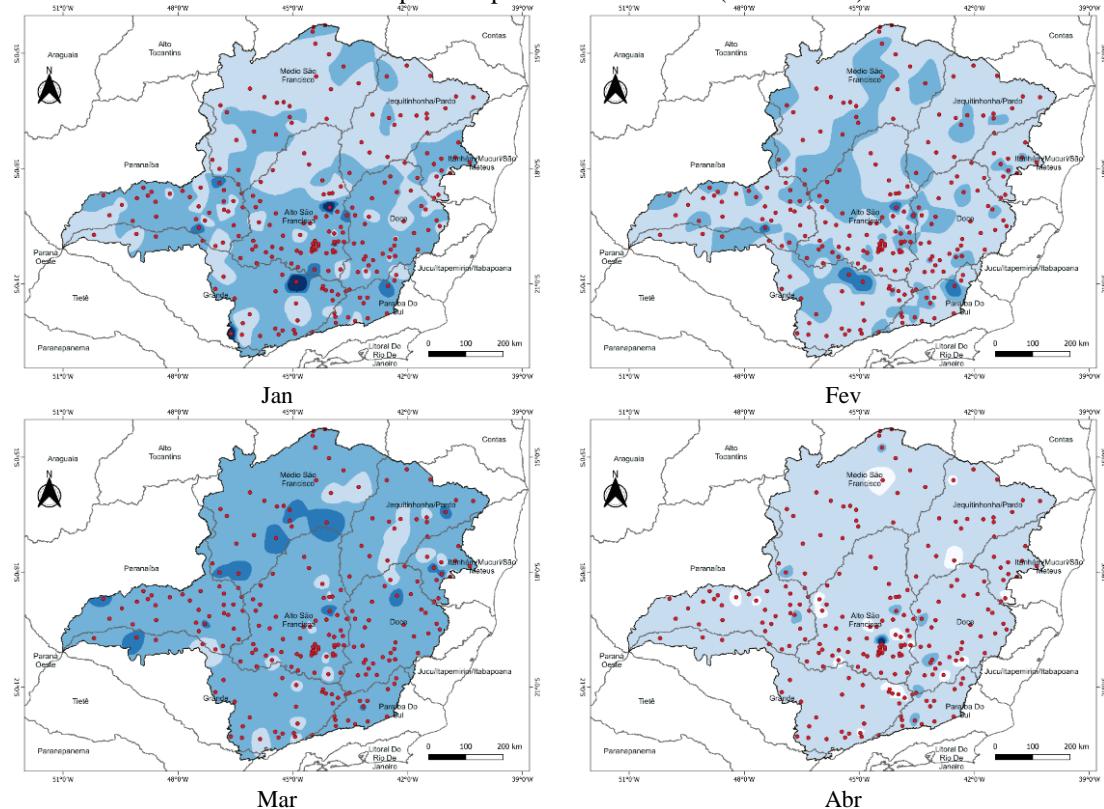
A diferença de magnitude nos meses de maio, junho, julho e agosto, considerados secos, reduziu drasticamente ficando na casa dos 30 mm nos postos considerados pontos quentes para a ocorrência de extremos. O mês de setembro, também um mês de transição,

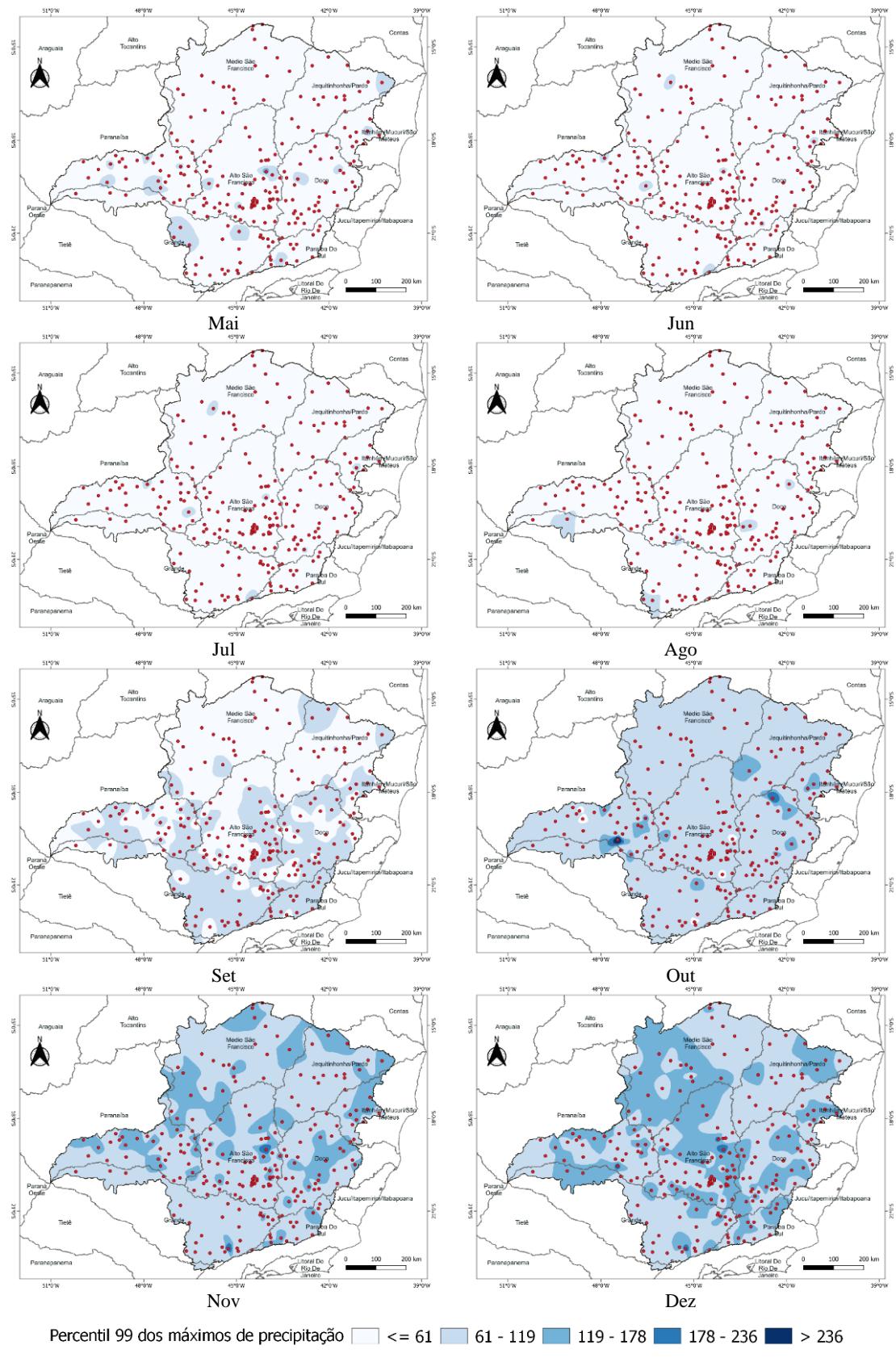
para a entrada na temporada de extremos pluviométricos, mostra a retomada das ocorrências na maior parte do estado, com uma amplitude pluviométrica entre os dois métodos utilizados de mais de 60 mm. O mês de outubro mostra um comportamento espacial um pouco diferente entre os métodos. Na análise dos P95 para os dados diários pelo método convencional, os eventos de maior magnitude ficam em torno dos 23 mm e se concentram na parte Sudoeste/Sul, Oeste, Zona da Mata, Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e RMBH. Já para os mapas com base no método de BM, os eventos de maior magnitude ficam em torno de 70, 80 e até 100 mm distribuídos por postos em todas as regiões do estado.

Para o mês de novembro os valores variam de 40 e 50 mm, mostrados no primeiro método, a mais de 150 mm em alguns postos, o mesmo ocorrendo para o mês de dezembro com os valores extremos evidenciados pelo método de BM, superando os 180mm.

Nos mapas da Figura 2.19 observa-se a distribuição espacial da precipitação no P99, calculados usando o método de BM, indicando o valor abaixo do qual 99% dos máximos se encontram.

Figura 2.19 - Distribuição espacial dos percentis 99 de precipitação por Block Maxima no estado de Minas Gerais por mês para a série histórica (1977 - 2021).





Com base no P99 mostrado nos mapas da Figura 2.19, para o mês de janeiro, é

possível confirmar a consistência da magnitude dos extremos de algumas estações em relação ao método anterior. As estações pluviométricos que antes mostraram valores extremos altos no P99 para os meses de janeiro fevereiro e março, agora são realçados mostrando quais deles de fato tiveram eventos extremos de grande potencial destrutivo, evidenciando novamente a sensibilidade dos métodos de BM. A diferença entre os valores obtidos nos dois métodos em janeiro, por exemplo, supera os 200mm. No mês de abril, como já esperado, a diferença entre os P99 obtidos, não ultrapassa os 20 mm, com valores extremos entre 30 mm no primeiro método e 50 mm no segundo. O mês de maio, chama a atenção para um posto pluviométrico na região Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, o qual no P99 obtido com os valores gerais apresentou 25 mm e no P99 obtido após a aplicação do BM mostrou um valor de 125mm, 100 mm de diferença na identificação de extremos de um para o outro, mostrando a sensibilidade do P99 calculado após a divisão em blocos de máximos em captar a amplitude entre os extremos. Junho, julho, agosto e setembro não mostram diferenças superiores a 20 mm, mantendo o padrão espacial, porém ‘acendendo’ estações que mostram consistência na ocorrência de grandes extremos. Outubro, novembro e dezembro voltam a mostrar grandes diferenças entre os valores de P99 identificados pelos dois métodos. Em alguns postos a diferença ultrapassa os 150m.

CONCLUSÕES

Os percentis calculados a partir dos dados diários oferecem uma visão abrangente da distribuição diária da precipitação, enquanto os percentis calculados a partir dos máximos mensais e anuais destacam a intensidade dos eventos extremos de precipitação mais raros. Ambos são úteis, mas em contextos diferentes, dependendo da natureza da análise e do tipo de planejamento.

Em relação à variação temporal, os percentis diários fornecem uma visão detalhada sobre como a precipitação diária varia ao longo do tempo. Eles permitem identificar padrões sazonais e tendências de longo prazo, observando como a distribuição dos valores de precipitação está mudando ao longo dos meses e anos. Por incluírem todos os dados diários, podem ajudar a identificar a frequência de eventos de precipitação intensa que ocorrem em qualquer dia, mês ou ano.

Por outro lado, os percentis dos máximos destacam as mudanças nos eventos de precipitação mais intensos ao longo do tempo. Estes percentis são indicativos de como os

eventos extremos de precipitação variam ao longo dos anos e são úteis para análises de tendências em eventos extremos, podendo mostrar se há um aumento na intensidade ou na frequência dos eventos de precipitação máxima.

Nos percentis totais, a maior variabilidade e diferença nas médias reflete que os eventos extremos estão mais distantes dos eventos intensos regulares, com maior variação entre os percentis 95 e 99. No entanto, a variabilidade relativa (CV) nos percentis totais é menor no percentil 99, sugerindo que os eventos extremos são mais concentrados e menos dispersos do que os eventos intensos comuns (percentil 95). Nos percentis dos máximos, embora as diferenças percentuais entre as médias e os desvios ainda sejam significativas, elas são menores do que nos percentis totais, refletindo que os eventos máximos de precipitação tendem a ser mais uniformes. Além disso, a variabilidade relativa (CV) no percentil 99 é maior, indicando que os eventos mais extremos dentro do conjunto de máximos são mais dispersos e menos previsíveis. Essas diferenças mostram como a análise dos percentis totais pode destacar variações globais de precipitação, enquanto a análise dos percentis dos máximos se concentra nas maiores intensidades e suas respectivas variabilidades. Ambas as análises são complementares e fornecem uma visão abrangente da dinâmica das chuvas extremas.

A análise espacial dos percentis dos dados diários para cada estação permitiu identificar regiões que frequentemente experimentam precipitação intensa. Isso revelou padrões espaciais de precipitação extrema, identificando áreas que podem estar mais vulneráveis a enchentes e outros problemas relacionados a eventos extremos de precipitação. A comparação entre diferentes regiões do estado mostrou as variações na intensidade da precipitação diária.

Os percentis dos máximos mostraram quais regiões experimentam os eventos mais extremos de precipitação, confirmando os ‘pontos quentes’ para ocorrências de eventos com magnitudes potencialmente destrutivas de forma mais consistente. Isso é crucial para o planejamento de infraestrutura, como sistemas de drenagem e barragens, em áreas mais propensas a esses tipos de eventos extremos de precipitação. Identificar áreas onde os máximos são consistentemente altos pode ajudar na priorização de recursos para mitigação de desastres e planejamento urbano.

Considerando a amplitude e a sensibilidade de ambos os métodos, os percentis dos dados diários incluem uma ampla gama de valores, refletindo a distribuição geral da precipitação. No entanto, podem não captar totalmente a frequência de eventos extremos, subestimando-os, pois, a inclusão de dias com pouca ou nenhuma precipitação dilui a

percepção dos eventos extremos. Já os percentis dos máximos focam exclusivamente nos valores máximos de precipitação, permitindo uma melhor identificação de anos com precipitação extremamente alta, eliminando os ‘ruídos’ dos dias sem chuva. Como consideram apenas os máximos mensais ou anuais, são mais sensíveis a eventos de precipitação extrema, resultando em uma identificação mais clara e frequente desses eventos.

Na identificação dos anos extremamente chuvosos, verificou-se que os percentis dos dados diários não destacaram todos os anos com eventos extremos, especialmente porque esses eventos são raros em relação à totalidade dos dados diários. Por outro lado, os percentis dos máximos (BM) melhoraram a detecção de anos com eventos extremos, mostrando todos os anos que apresentaram chuvas acima da média, pois qualquer ocorrência de precipitação máxima é imediatamente refletida nos cálculos dos percentis.

Como recomendações futuras, com base nos resultados obtidos e nas metodologias aplicadas neste estudo, várias direções podem ser sugeridas para aprofundar a análise dos extremos de precipitação em Minas Gerais. Recomenda-se a aplicação do teste de Mann-Kendall para avaliar tendências na escala diária, a utilização da Distribuição Generalizada de Valores Extremos (DGVE) e a aplicação de Cadeias de Markov para modelar a dependência temporal dos eventos extremos. Aplicar essas metodologias nas áreas mais vulneráveis ajudará a detectar tendências, modelar extremos e entender a dependência temporal dos eventos, fornecendo uma base sólida para a gestão de recursos hídricos e planejamento urbano resiliente.

REFERÊNCIAS

ABREU, M. C. *et al.* Daily Rainfall Disaggregation to Estimate the Intensity-Duration-Frequency Relationship in Minas Gerais State, Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s. l.], v. 65, 2022. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2022210694>

ALLAN, R. P. *et al.* **Summary for Policymakers**. [S. l.]: Cambridge University Press, 2023.

ALMAZROUI, M. Rainfall trends and extremes in Saudi Arabia in recent decades. **Atmosphere**, [s. l.], v. 11, n. 9, 2020. <https://doi.org/10.3390/atmos11090964>

ANDRADE, M. de M.; LIMA, K. C. Revista Brasileira de Geografia Física Projeção Climática da Frequência de Eventos de Precipitação Intensa no Nordeste do Brasil: resultados preliminares. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.6, n, [s. l.], v. 5, p. 1158–1173, 2013. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v6.5.p1158-1173>

AVILA-DIAZ, A. *et al.* Climatological aspects and changes in temperature and precipitation extremes in viçosa-Minas Gerais. **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, [s. l.], v. 92, n. 2, p. 1–19, 2020. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020190388>

BARROS, V. *et al.* Influence of the South Atlantic convergence zone and South Atlantic Sea surface temperature on interannual summer rainfall variability in Southeastern South America. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 67, n. 3–4, p. 123–133, 2000. <https://doi.org/10.1007/s007040070002>

CAMPOS, B. de *et al.* Extreme rainfall weather events in the Southern Minas Gerais State, Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 9, n. 7, 2016. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160166>

CAMUFFO, D.; BECHERINI, F.; DELLA VALLE, A. Relationship between selected percentiles and return periods of extreme events. **Acta Geophysica**, [s. l.], v. 68, n. 4, p. 1201–1211, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00452-x>

CAMUFFO, D.; BECHERINI, F.; DELLA VALLE, A. The Beccari series of precipitation in Bologna, Italy, from 1723 to 1765. **Climatic Change**, [s. l.], v. 155, n. 3, p. 359–376, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02482-x>

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 15, n. 17, p. 2377–2394, 2002. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2377:EPEISS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2377:EPEISS>2.0.CO;2)

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone : Intensity , Form , Persistence , and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. [s. l.], v. 17, p. 88–108, 2004.

CERESETTI, D. *et al.* Evaluation of classical spatial-analysis schemes of extreme rainfall. **Natural Hazards and Earth System Science**, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 3229–

3240, 2012. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3229-2012>

COSTA, R. L. *et al.* Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, [s. l.], v. 28, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100254>

COSTA, M. da S. *et al.* Tendências observadas em extremos de precipitação sobre a região Semiárida do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 1321–1334, 2015.

CPTEC/INPE. **CPTEC/INPE - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos**. [s. l.], 2024.

CUNNIGHAN, C. *et al.* Climate change and drought in Brazil. **ResearchGate**, [s. l.], v. 19, n. November, 2017.

SILVA, R. C.; MARENKO, J. A.; RUV LEMES, M. Analysis of extreme rainfall and landslides in the metropolitan region of the Paraíba do Sul River Valley and North Coast of São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], 2024. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3513624/v1>

DALAGNOL, R. *et al.* Extreme rainfall and its impacts in the Brazilian Minas Gerais state in January 2020: Can we blame climate change?. **Climate Resilience and Sustainability**, [s. l.], v. 1, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.1002/cli2.15>

DONAT, M. G. *et al.* More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 508–513, 2016. <https://doi.org/10.1038/nclimate2941>

DOS SANTOS, A. L. M. *et al.* Space–Time Characterization of Extreme Precipitation Indices for the Semiarid Region of Brazil. **Climate**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 1–17, 2024. <https://doi.org/10.3390/cli12030043>

FONSECA DE ALBUQUERQUE CAVALCANTI, I. *et al.* **Tempo e Clima no Brasil**. [s. l.: s. n.], 2016.

GERMANO, A. da S. *et al.* Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis que provocaram precipitações extremas nas cidades de Recife e Maceió no período de 2011 a 2015. **Biblioteca.Ibge.Gov.Br**, [s. l.], v. 09, n. 07, p. 1984–2295, 2016.

GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G. ENSO and extreme rainfall events in South America. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 22, n. 7, p. 1589–1609, 2009. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2429.1>

GUEDES, G. *et al.* Profiling sociodemographic attributes and extreme precipitation events as mediators of climate-induced disasters in municipalities in the state of Minas Gerais, Brazil. **Frontiers in Human Dynamics**, [s. l.], v. 5, 2023. <https://doi.org/10.3389/fhmd.2023.1138277>

HARVEY, D. O espaço como palavra-chave. **Revista Em Pauta**, [s. l.], v. 13, n. 35, p. 126–152, 2015. <https://doi.org/10.12957/rep.2015.18625>

HOSSEINZADEHTALAEI, P.; TABARI, H.; WILLEMS, P. Climate change impact on short-duration extreme precipitation and intensity–duration–frequency curves over Europe. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 590, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125249>

HU, Z. *et al.* Modified Mann-Kendall trend test for hydrological time series under the scaling hypothesis and its application. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 65, n. 14, p. 2419–2438, 2020. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1810253>

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas - Igam. [S. l.], 2024.

IPCC. **IPCC Sixth Assessment Report - Synthesis Report**. [S. l.: s. n.], 2022.

IRI. **IRI - International Research Institute for Climate and Society**. [S. l.], 2024.
Disponível em: <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/enso/>..

KRISHNAMURTHY, C. K. B.; LALL, U.; KWON, H. H. Changing frequency and intensity of rainfall extremes over India from 1951 to 2003. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 22, n. 18, p. 4737–4746, 2009. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2896.1>

LIMA, S. S.; ARMOND, N. B. Chuvas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: caracterização, eventos extremos e tendências. **Sociedade & Natureza**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 1–19, 2022. <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-64770>

MAIDMENT, D. R. **Handbook of Hydrology**. [S. l.]: McGraw-Hill Professional, 2002.

MALLICK, J. *et al.* Analysing the trend of rainfall in Asir region of Saudi Arabia using the family of Mann-Kendall tests, innovative trend analysis, and detrended fluctuation analysis. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 143, n. 1–2, p. 823–841, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03448-1>

MARENGO, J. A. *et al.* Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 2029, n. March 2008, p. 2011–2029, 2009.

MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. da. Modelagem estatística da precipitação mensal e anual e no período seco para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 68–74, 2008.
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000100010>

NATIVIDADE, U. A. *et al.* Tendência dos Índices de Extremos Climáticos Observados e Projetados no Estado de Minas Gerais Trend of Observed and Projected Extreme Climate Indices in Minas Gerais State. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 600–614, 2016. <https://doi.org/10.1590/0102-7786324008>

NETO, J. L. S. Por uma Geografia do Clima - Antecedentes históricos, paradigmas contemporâneos e uma nova razão para um novo conhecimento. **Terra Livre**, [s. l.], v. 17, n. 2º semestre, p. 49–62, 2001. https://doi.org/10.62516/terra_livre.2001.339

NÉTO, N. C. G.; SANTOS, E. B. Análise Espaço-Temporal dos Eventos de Precipitação Intensa no Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 89–97, 2022. <https://doi.org/10.1590/0102-77863710081>

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variationns of Sea Surface Temperature, Wind Stress and Rainfall over the TRopical Atantic and South America. **Journal of Climate**, [s. l.], 1996. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<2464:VOSSSTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<2464:VOSSSTW>2.0.CO;2)

OLIVEIRA, P. T.; SANTOS E SILVA, C. M.; LIMA, K. C. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 130, n. 1–2, p. 77–90, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1865-z>

OMM. **Boletins Climáticos da OMM (Organização Meteorológica Mundial)**. [S. l.], 2024.

PAPALEXIOU, S. M.; KOUTSOYIANNIS, D.; MAKROPOULOS, C. How extreme is extreme? An assessment of daily rainfall distribution tails. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 851–862, 2013. <https://doi.org/10.5194/hess-17-851-2013>

PEREIRA, G. *et al.* Análise Da Variabilidade Da Precipitação Para O Estado De Minas Gerais (1981-2017). **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 1, p. 213–229, 2018. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.61028>

PEREZ, L. P. *et al.* Climate change and disasters: Analysis of the Brazilian regional inequality. **Sustentabilidade em Debate**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 260–277, 2020. <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33813>

QUINTÃO, A. F. *et al.* Social, Environmental, and Health Vulnerability to Climate Change: The Case of the Municipalities of Minas Gerais, Brazil. **Journal of Environmental and Public Health**, [s. l.], v. 2017, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2821343>

RAO, V. B. *et al.* An update on the rainfall characteristics of Brazil: Seasonal variations and trends in 1979-2011. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 291–302, 2016. <https://doi.org/10.1002/joc.4345>

REBOITA, M. S. *et al.* Caracterização Atmosférica Quando Da Ocorrência De Eventos Extremos De Chuva Na Região Sul De Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 21, n. 2012, p. 20–37, 2017. <https://doi.org/10.5380/abclima.v21i0.47577>

REIS, A. L. dos *et al.* Climatologia e eventos extremos de precipitação no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 07, n. 1, n. ISSN 0034, p. 82, 2018.

ROPELENWSKI, C. F.; M. S. HALPERT. Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El. **Jurnal Sains dan Seni ITS**, [s. l.], v. 6, n. 115, p. 1606–1626, 1987. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2)

S. SILVA, V. B.; KOUSKY, V. F. **The South American Monsoon System: Climatology and Variability.** [S. l.: s. n.], 2012. <https://doi.org/10.5772/38565>

SANTOS, S. A. F. dos; BERTOLINO, A. V. F. A.; CORBO, A. R. Caracterização Da Precipitação a Partir Da Técnica Dos Quantis E Da Frequência De Chuva Durante O Período De 2006 a 2022 Em São Pedro Da Serra – Município De Nova Friburgo (Rj). **Revista Tamoios**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 8–30, 2024. <https://doi.org/10.12957/tamoios.2024.75573>

SARAILIDIS, G.; TSIOUNGKOS, S. Rainfall frequency analysis using block maxima and peaks over threshold approaches. **EasyChair Preprints**, [s. l.], 2018. <https://doi.org/10.29007/b61p>

SEDEC. **S2ID**. [S. l.], 2024.

SILVA DIAS, M. A. F. *et al.* Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. **Climatic Change**, [s. l.], v. 116, n. 3–4, p. 705–722, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0504-7>

SILVA, P. N.; ESCOBAR, G. C. J.; REBOITA, M. S. Eventos extremos de precipitação no estado de Minas Gerais associados com a ocorrência de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1013–1023, 2020.

SONDERMANN, M. *et al.* Climate change projections and impacts on the eucalyptus plantation around the Doce River basin, in Minas Gerais, Brazil. **Climate Services**, [s. l.], v. 28, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100327>

SUN, Q. *et al.* A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 243–258, 2021. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0892.1>

TAVARES, M. G. **Analysis of Trends in Extreme Precipitation in the State of Minas Gerais**. [S. l.: s. n.], 2024. <https://doi.org/10.1590/0102-77863910033>

TEIXEIRA, M. da S.; SATYAMURTY, P. Trends in the frequency of intense precipitation events in southern and southeastern Brazil during 1960–2004. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 24, n. 7, p. 1913–1921, 2011. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3511.1>

TRENBERTH, K. E. Understanding climate change through Earth's energy flows. **Journal of the Royal Society of New Zealand**, [s. l.], v. 50, n. 2, p. 331–347, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03036758.2020.1741404>

VAN DE VYVER, H. On the estimation of continuous 24-h precipitation maxima. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, [s. l.], v. 29, n. 3, p. 653–663, 2015b. <https://doi.org/10.1007/s00477-014-0912-5>

VANDESKOG, S. M. *et al.* Modelling Sub-daily Precipitation Extremes with the Blended Generalised Extreme Value Distribution. **Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 598–621, 2022.

<https://doi.org/10.1007/s13253-022-00500-7>

VIOLA, M. R., DE MELLO, C. R., CHOU, S. C., YANAGI, S. N. M., & GOMES, J. L. Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 35, p. 1378–1391, 2015. <https://doi.org/10.1002/joc.4038>

WASKO, C. *et al.* Evidence of shorter more extreme rainfalls and increased flood variability under climate change. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 603, n. PB, p. 126994, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126994>

ZAKARIA, R.; AHMAD RADI, N. F.; SATARI, S. Z. Extraction method of extreme rainfall data. In: , 2017. **Journal of Physics: Conference Series**. [S. l.]: Institute of Physics Publishing, 2017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/890/1/012154>

CAPÍTULO 3 – ANÁLISES DE TENDÊNCIAS DE PRECIPITAÇÃO EXTREMA: UMA ABORDAGEM DE DOWNSCALING ESTATÍSTICO

RESUMO

Este estudo analisou a estacionariedade, a tendência e magnitude dos extremos pluviométricos em Minas Gerais, Brasil, utilizando testes como ADF (*Augmented Dickey-Fuller*), KPSS (*Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin*), Mann-Kendall e Mann-Kendall Modificado, complementarmente. O fato de os testes ADF e KPSS para verificar a estacionariedade, enquanto o teste de Mann-Kendall para verificar tendências, serem usados em conjunto, gerou uma abordagem metodológica sólida. Os percentis 95 e 99 foram utilizados para identificar os extremos de precipitação em 232 estações pluviométricas ao longo de 44 anos (1977-2021). Os resultados mostraram a concordância entre os resultados dos testes de ADF, KPSS e Mann-Kendall, o que validou a robustez da análise realizada. Sobre as tendências os resultados mostraram que todas as séries temporais para janeiro em todo estado apresentaram tendências de diminuição nos extremos de precipitação, os meses de fevereiro e março, mesmo com um número reduzido de estação com tendência significativa, a maioria apresentou aumento na tendência dos extremos, assim como outubro, novembro de dezembro, com destaque para os dois últimos. Em relação a análise espacial, a região central de Minas Gerais possui maior estabilidade nos padrões de precipitação extrema, enquanto as regiões leste e nordeste apresentam maior variabilidade e tendências de diminuição. Esses resultados sugerem que as mudanças climáticas podem estar influenciando os fatores meteorológicos locais na distribuição e intensidade das chuvas extremas no estado. A aplicação dos testes de estacionariedade e tendências revelaram a importância de considerar a variabilidade em escala local, tanto temporal quanto espacialmente de eventos extremos para a gestão de recursos hídricos e a elaboração de estratégias de mitigação de desastres. Este estudo contribui para o entendimento dos padrões de precipitação extrema em Minas Gerais e serve como base para futuras pesquisas sobre a influência das mudanças climáticas na região.

Palavras-chave: Precipitação extrema, Estacionariedade, Tendência, Teste de Mann-Kendall, Mudanças climáticas.

This study analyzed the stationarity, trends, and magnitude of extreme precipitation events in Minas Gerais, Brazil, using tests such as ADF (*Augmented Dickey-Fuller*), KPSS (*Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin*), Mann-Kendall, and Modified Mann-Kendall in a complementary fashion. The combination of ADF and KPSS tests for verifying stationarity, along with the Mann-Kendall test for detecting trends, provided a solid methodological approach. The 95th and 99th percentiles were used to identify extreme precipitation events in 232 weather stations over a 44-year period (1977-2021). The results showed agreement between the ADF, KPSS, and Mann-Kendall tests, validating the robustness of the analysis. Regarding trends, the results indicated that all time series for January across the state exhibited decreasing trends in extreme precipitation. In February and March, despite a smaller number of stations with significant trends, most showed an increase in extremes, as did October, November, and December, with a notable emphasis on the last two months. In terms of spatial analysis, the central region of Minas Gerais demonstrated greater stability in extreme precipitation patterns, while the eastern and northeastern regions exhibited greater variability and trends of decline. These findings suggest that climate change may be influencing local meteorological factors affecting the distribution and intensity of extreme rainfall in the state. The application of stationarity and trend tests revealed the importance of considering variability on a local scale, both temporally and spatially, in extreme event management for water resource planning and disaster mitigation strategies. This study contributes to understanding extreme precipitation patterns in Minas Gerais and provides a foundation for future research on the influence of climate change in the region.

Keywords: Extreme precipitation, Stationarity, Trend, Mann-Kendall Test, Climate change.

3.1. INTRODUÇÃO

O clima da região Sudeste do Brasil apresenta uma estação chuvosa, que vai de outubro a março e uma estação seca, de abril a setembro, com a maior parte dos extremos pluviométricos concentrados entre dezembro e março (Matsuoka, Ferreira & Rofatto, 2024). A variabilidade espacial da precipitação na região é notável, com áreas montanhosas recebendo mais chuva do que áreas planas, reflexo da sua localização em latitudes tropicais e subtropicais e da heterogeneidade topográfica (Ferreira & Reboita, 2022). Durante a estação chuvosa, o regime pluviométrico é influenciado pela convecção local e pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), uma banda de nebulosidade que atravessa o Brasil desde a Amazônia até o Atlântico Sul, desempenhando um papel fundamental na geração de chuvas intensas (Carvalho, Jones & Liebmann, 2004; Silva; Escobar & Reboita, 2020).

Eventos extremos de precipitação são comuns nesse período, resultando em chuvas acima da média histórica (Reis *et al.*, 2018; Silva & Jardim, 2017). Em Minas Gerais, esses extremos são especialmente críticos, pois a combinação de variabilidade climática, topografia accidentada e uso intensivo do solo torna a região suscetível a inundações, enchentes e deslizamentos de terra. Esses eventos impactam fortemente a infraestrutura e o meio ambiente, além de afetar de forma desproporcional as comunidades de baixa renda (Oliveira *et al.*, 2022; Pereira *et al.*, 2020; Climate change and disasters: Analysis of the Brazilian regional inequality Perez *et al.*, 2020b; Vasquez-Arroyo *et al.*, 2020).

Estudos recentes sugerem que a intensificação desses eventos extremos está relacionada à variabilidade climática induzida pelas mudanças globais, o que torna essencial uma análise aprofundada desses fenômenos para a mitigação de desastres (Silva, Marengo & Ruv Lemes, 2024; Donat *et al.*, 2016; IPCC, 2022; Marengo *et al.*, 2024). Para investigar essas tendências, o teste de Mann-Kendall (MK) é amplamente utilizado, pois, sendo não paramétrico, não exige suposições sobre a distribuição dos dados (Kendall, 1975; Mann, 1945). Esse teste é particularmente eficaz para detectar tendências monotônicas em séries temporais hidrológicas e climáticas.

Embora o teste de Mann-Kendall (MK) seja amplamente eficaz, ele depende da suposição de que os dados são independentes (Wasserstein; Schirm; Lazar, 2019). A correlação serial, presente em muitas séries temporais hidrológicas e climáticas (Tian *et al.*, 2018; Tian, Xu & Wang, 2018), pode aumentar a taxa de falsos positivos, levando à

rejeição incorreta da hipótese nula (Cox; Stuart, 1955). Para corrigir essa influência, duas abordagens são propostas: o pré-branqueamento (*pre-whitening*), que remove a correlação serial antes de aplicar o MK (Kulkarni; Storch, 1995; Storch; Navarra, 1999), e o uso do Mann-Kendall Modificado, que ajusta a variância do teste para levar em conta a autocorrelação (Hamed e Rao, 1998). No entanto, o pré-branqueamento pode aumentar o risco de erro Tipo II (Yue *et al.*, 2002), enquanto o *Trend-Free Pre-Whitening* (TFPW) foi proposto como uma alternativa mais eficiente, removendo a tendência antes de aplicar o PW (Serinaldi; Kilsby, 2016). O debate sobre a melhor forma de lidar com a correlação serial continua, já que há um equilíbrio delicado entre a significância dos resultados e o poder do teste MK.

Outra questão a ser considerada é a não estacionariedade em séries temporais de precipitação, que pode comprometer a precisão dos resultados do teste MK. A não estacionariedade ocorre quando parâmetros estatísticos, como a média e a variância, variam ao longo do tempo, refletindo mudanças no comportamento da série. Fatores como mudanças climáticas e variabilidade natural do clima podem introduzir persistência serial nos dados, afetando diretamente a robustez do teste MK. Segundo Yue *et al.* (2002), a correlação serial positiva, comum em dados hidrológicos, pode inflacionar a significância dos resultados e levar à rejeição equivocada da hipótese nula de ausência de tendência, aumentando a taxa de falsos positivos.

A verificação da estacionariedade antes da aplicação de testes de tendência, como o MK, é fundamental. Em Minas Gerais, onde os padrões climáticos variam consideravelmente, a análise de tendências em extremos pluviométricos precisa considerar essa não estacionariedade para garantir a confiabilidade dos resultados. A literatura sugere o uso de testes como o ADF (*Augmented Dickey-Fuller*) e o KPSS (*Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin*) para verificar a estacionariedade. Esses testes permitem uma análise mais detalhada, identificando a presença de raiz unitária ou se a série é estacionária em torno de uma média ou tendência linear (Dickey; Fuller, 1979; Kwiatkowski *et al.*, 1992). Wang *et al.* (2020) destacam que a combinação desses testes com o MK é crucial para evitar erros de interpretação relacionados à não estacionariedade.

A revisão da literatura nacional revela que a maioria dos estudos, aplicam o teste de Mann-Kendall para identificar tendências em dados de precipitação sem antes verificar a autocorrelação ou estacionariedade, o que pode comprometer a validade dos resultados. Exemplos disso incluem os trabalhos (Baldo *et al.*, 2021; Benabdellouahab *et al.*, 2020;

de Brito *et al.*, 2022; Júnior *et al.*, 2020; Junqueira *et al.*, 2020; Pinheiro; Graciano; Severo, 2013). Ao ignorar a autocorrelação, esses estudos correm o risco de interpretar variações naturais ou ciclos climáticos como tendências significativas, o que pode levar a decisões inadequadas no planejamento de políticas de gestão de desastres e recursos hídricos, como já discutido anteriormente. Em contrapartida, estudo como os de (Almazroui, 2020; Ballarin; Anache; Wendland, 2022; Bezerra *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2020; Likinaw; Alemayehu; Bewket, 2023; Seenu; Jayakumar, 2021), utilizam testes de autocorrelação para garantir que as tendências encontradas refletem de fato a realidade dos dados.

Para garantir a robustez dos resultados neste capítulo, são utilizados os testes de ADF e KPSS, juntamente com o teste de Mann-Kendall, para verificar a estacionariedade das séries temporais de precipitação extrema em Minas Gerais. Essa abordagem permite identificar tendências reais, distinguindo-as de padrões cíclicos ou processos não estacionários subjacentes. Além disso, a espacialização dos resultados por meio do QGIS permite identificar as áreas de Minas Gerais onde as tendências de precipitação extrema são mais evidentes e onde a autocorrelação desempenha um papel significativo (Lemenkova, 2020).

Em suma, esta pesquisa oferece uma abordagem metodológica integrada para a análise de extremos pluviométricos, utilizando o teste de Mann-Kendall em conjunto com testes de estacionariedade e autocorrelação. A metodologia adotada visa garantir resultados precisos e fornecer subsídios sólidos para a gestão de desastres e planejamento de infraestrutura hídrica no estado de Minas Gerais.

3.1.1. OBJETIVOS DO CAPÍTULO

3.1.1.1 *Objetivo Geral*

Analizar as séries temporais de precipitação em Minas Gerais, identificando padrões de estacionariedade, tendências e autocorrelação, realizando a decomposição de séries não estacionárias para uma melhor compreensão dos extremos pluviométricos e de padrões associados às mudanças climáticas.

3.1.1.2 Objetivos Específicos

1. **Testar a Estacionariedade:** Aplicar os testes ADF e KPSS para verificar a estacionariedade das séries temporais e confrontar esses resultados com os obtidos nos testes de tendência.
2. **Verificar as Tendências:** Utilizar os testes Mann-Kendall e Mann-Kendall modificado para detectar tendências monotônicas nas séries temporais, considerando a possível presença de autocorrelação.
3. **Verificação cruzada:** Utilizar os testes ADF, KPSS e MK e MK_m em conjunto para verificar estacionariedade e tendência.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. TESTES DE ESTACIONARIEDADE E TENDÊNCIA

Uma série temporal é considerada estacionária quando os dados aleatórios flutuam em torno de um valor fixo. Um processo estacionário possui a característica de que a média, a variância e a estrutura de autocorrelação permanecem constantes ao longo do tempo (DINIZ, CARVALHO & NDRADE, 1998).

Os testes de estacionariedade KPSS (*Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin*) (Kwiatkowski *et al.*, 1992) e ADF (*Augmented Dickey-Fuller*) (Dickey & Fuller, 1979), são amplamente utilizados para verificar se uma série temporal é estacionária ou não, ou seja, se suas propriedades estatísticas, como a média e a variância, permanecem constantes ao longo do tempo. Esses testes são frequentemente aplicados em estudos relacionados a dados de precipitação, devido à importância de entender a estacionariedade das séries temporais no contexto de mudanças climáticas e modelagem hidrológicas (Bezerra *et al.*, 2023).

Para avaliar a estacionariedade da série histórica dos extremos pluviométricos, P95 e P99 para as 232 estações pluviométricas foram utilizados ambos os testes. A abordagem combinada é recomendada por fornecer uma análise mais robusta da estacionariedade (Moravej, 2016).

Se o ADF não rejeitar a hipótese nula (indicando não estacionariedade) e o KPSS rejeitar a hipótese nula (indicando não estacionariedade), há uma forte evidência de que

a série é de fato não estacionária. Essa abordagem combinada é destacada por que sugere o uso de testes complementares para superar as limitações de cada método individualmente.

No teste ADF, a hipótese nula de que a série não é estacionária é verificada, sendo rejeitada quando o p-valor é menor que 0,05; caso contrário, a série é considerada estacionária. Já no teste KPSS, os resultados dentro de um nível de confiança de 95%, devem apresentar um p-valor superior a 0,05, indicando que a série é estacionária. Isso significa que não há evidências de autocorrelação nos dados, e os resíduos devem não apresentar dados explicativos faltantes na série temporal.

Para confirmar a presença da estacionariedade em torno da tendência, caso exista, os testes de Mann-Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945) e Mann-Kendall Modificado (Hamed & Rao, 1998) também foram utilizados, assim como o *Sen's Slope* (Sen, P. K., 1968) para estimar a taxa de variação dos índices de precipitação.

3.2.1.1 Dickey-Fuller (ADF)

O teste ADF é uma extensão do teste *Dickey-Fuller*, que incorpora termos autorregressivos para corrigir autocorrelações na série temporal. A forma geral da equação do teste ADF pode ser expressa como na equação (3.1):

$$\Delta y_t = \alpha + \beta_t + \gamma_{t-1} + \sum_{i=1}^p \delta_i \Delta y_{t-i} + \epsilon_t \quad (3.1)$$

Onde:

- Δy_t : é a primeira diferença da série temporal y_t ;
- α : é um intercepto;
- β_t : representa uma tendência determinística (opcional);
- γ_{t-1} : é o termo de raiz unitária que estamos testando (hipótese nula: $\gamma=0$);
- $\sum_{i=1}^p \delta_i \Delta y_{t-i}$: são os termos autorregressivos para corrigir autocorrelações;
- ϵ_t : são os termos autorregressivos para corrigir autocorrelações.

Se o valor estimado de γ for estatisticamente diferente de zero, rejeitamos a hipótese nula de que a série possui uma raiz unitária (não estacionária), indicando que a série é estacionária.

Hipóteses:

- Hipótese nula (H_0): A série temporal possui uma raiz unitária, ou seja, é não estacionária ou possui raiz unitária.
- Hipótese alternativa (H_1): A série temporal é estacionária ou não possui raiz unitária.

Interpretação:

- Rejeitar H_0 (valor $p < 0,05$): Se o valor p for menor que o nível de significância, rejeita-se a hipótese nula, indicando que a série é estacionária.
- Não rejeitar H_0 (valor $p > 0,05$): Se o valor p for maior que 0,05, não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula, sugerindo que a série pode ser não estacionária.

3.2.1.3. Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS)

O teste KPSS verifica a hipótese nula de que a série temporal é estacionária em torno de uma média (ou uma tendência linear) contra a hipótese alternativa de que a série tem uma raiz unitária. A estatística do teste KPSS é baseada na soma cumulativa dos resíduos da regressão, equação (3.2):

$$KPSS = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^t \hat{u}_i \right)^2 / \hat{\sigma}^2 \quad (3.2)$$

Onde:

- T : é número de observações;
- \hat{u}_i : são os resíduos da regressão da série
- y_t : é uma constante (ou constante e tendência) implícita em \hat{u}_i ;
- $\hat{\sigma}^2$: é uma estimativa da variância dos resíduos.

Se a estatística KPSS é maior que um valor crítico, rejeitamos a hipótese nula, sugerindo que a série não é estacionária.

Hipóteses:

- Hipótese nula (H_0): A série temporal é estacionária em torno de uma média ou tendência.
- Hipótese alternativa (H_1): A série temporal é não estacionária (possui uma

raiz unitária).

Interpretação:

- Rejeitar H_0 ($KPSS > 0,05$): Se a estatística do teste KPSS for maior que o valor crítico para um determinado nível de significância, rejeita-se a hipótese nula, sugerindo que a série é não estacionária.
- Não rejeitar H_0 ($KPSS < 0,05$): Se a estatística KPSS for menor ou igual ao valor crítico, não se rejeita a hipótese nula, indicando que a série é estacionária.

Baseando-se em um nível de significância de 0,05 e no valor p do teste KPSS, há evidências para rejeitar a hipótese nula em favor da alternativa. Portanto, a série é não estacionária de acordo com o teste KPSS.

É sempre melhor aplicar ambos os testes para garantir que a série seja verdadeiramente estacionária.

3.2.1.4. Mann Kendall (MK)

O teste de Mann-Kendall (MK) é uma ferramenta não paramétrica amplamente utilizada para detectar tendências monotônicas em séries temporais. Ele é particularmente útil em estudos ambientais e climáticos, onde a identificação de tendências de longo prazo é essencial para a análise de mudanças climáticas, hidrologia e ecologia. A versão modificada do teste de Mann-Kendall, Mann Kendall Modificado (MK_m) foi desenvolvida para lidar com problemas de autocorrelação nas séries temporais, o que pode distorcer os resultados do teste original (Sa'adi *et al.*, 2017).

O teste de Mann-Kendall compara cada valor da série com todos os valores subsequentes, verificando a quantidade de pares em que o valor subsequente é maior (ou menor) que o valor atual. A estatística de teste S é calculada segundo a Equação 3.3:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sgn(x_j - x_i) \quad (3.3)$$

Onde:

- x_j e x_i : são os valores da série temporal.
- sgn é a função sinal, que retorna 1 se $x_j > x_i$, -1 se $x_j < x_i$ e 0 se $x_j = x_i$.

Para séries temporais grandes ($n > 10$), a estatística S segue aproximadamente uma distribuição normal com média zero e variância dada por:

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3.4)$$

O valor de S é então padronizado para obter a estatística Z do teste:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

O valor de Z é então comparado a um nível de significância (α) para determinar se a tendência é estatisticamente significativa:

- Hipótese Nula (H_0): Não há tendência monotônica na série temporal.
- Hipótese Alternativa (H_1): Existe uma tendência monotônica (crescente ou decrescente) na série temporal.

3.2.1.5. Mann Kendall Modificado (MK_m)

O teste de MK_m foi desenvolvido por (Hamed; Rao, 1998), para lidar com a presença de autocorrelação em séries temporais, o que pode influenciar os resultados do teste de MK tradicional. A autocorrelação ocorre quando os valores de uma série temporal estão correlacionados com seus próprios valores defasados (*lags*), o que pode violar a suposição de independência dos dados, crucial para a validade do teste de MK.

As principais motivações para a modificação no teste original são: a autocorrelação positiva pode inflar a variância da estatística de teste S , levando a uma maior probabilidade de rejeitar a hipótese nula, ou seja, aumentando o risco de um erro do tipo I (falso positivo); o teste de MK_m ajusta a variância da estatística de teste S para considerar o efeito da autocorrelação, proporcionando um resultado mais robusto. Por esse motivo a autocorrelação foi realizada antes da aplicação dos testes de tendência.

No teste de Mann-Kendall modificado, a variância $Var(S)$ é ajustada para refletir a autocorrelação da série temporal. Isso é feito através de um fator de correção (FC), que é aplicado à variância original, Equação (3.6):

$$Var'(S) = Var(S) * FC \quad (3.6)$$

O fator de correção é calculado considerando as autocorrelações ρ_k até um *lag* m:

Onde:

- ρ_k são os coeficientes de correlação até o *lag* m.
- n é o tamanho da amostra.

Com a variância ajustada, a estatística Z modificada pode ser calculada de forma semelhante ao teste original, mas agora com a nova variância $Var'(S)$. Isso fornece uma medida mais precisa da significância da tendência em séries temporais autocorrelacionadas.

O teste de Mann-Kendall e sua versão modificada são amplamente utilizados em estudos de séries temporais, especialmente em campos como hidrologia, climatologia, e ciências ambientais (Almazroui, 2020; Ballarin, Anache & Wendland, 2022; Júnior *et al.*, 2020; Junqueira *et al.*, 2020; Likinaw, Alemayehu & Bewket, 2023; Néto & Santos, 2022; Pinheiro, Graciano & Severo, 2013; Sa'adi *et al.*, 2017; Seenu & Jayakumar, 2021), entre outros. Eles são particularmente úteis para detectar tendências de longo prazo em séries temporais que podem estar sujeitas a variações sazonais ou a efeitos de autocorrelação, desde que sejam aplicados corretamente.

3.2.2. SEN'S SLOPE OU ESTIMADOR DE THEIL-SEN

O estimador de inclinação de *Theil-Sen* (Sen, Pranab Kumar, 1968; Theil, 1950) é um método robusto para calcular a inclinação de uma tendência linear em séries temporais. Ele é amplamente utilizado em análises não paramétricas por sua resistência a valores atípicos e à distribuição dos resíduos, sendo uma alternativa ao método dos mínimos quadrados.

Dada uma série temporal (x_i, y_i) , onde $i = 1, 2, \dots, n$, o estimador de inclinação de *Theil-Sen* calcula a inclinação de todos os pares de pontos da amostra. A inclinação β é a mediana de todas as inclinações calculadas entre cada par de observações i e j. Isso pode ser expresso como, Equação (3.7):

$$\beta_{ij} = mediana \left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \right) \text{ para } 1 \leq i < j \leq n \quad (3.7)$$

Ou seja, o estimador de inclinação $\hat{\beta}$ é a mediana de todas as inclinações calculadas entre cada par de observações i e j . Isso pode ser expresso pela Equação (3.8):

$$\hat{\beta} = \text{mediana} \left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \right) \text{ para } 1 \leq i < j \leq n \quad (3.8)$$

O valor $\hat{\beta}$ é a estimativa final da inclinação. Ao utilizar a mediana em vez da média, o estimador *Theil-Sen* torna-se robusto contra *outliers*, uma vez que a mediana é menos sensível a valores extremos em comparação com a média.

O estimador de *Theil-Sen* tem algumas propriedades desejáveis, incluindo:

- **Robustez contra valores atípicos:** Como mencionado, a mediana utilizada no cálculo das inclinações torna o método mais resistente a *outliers* em comparação ao método de mínimos quadrados.
- **Não paramétrico:** Diferentemente do método de mínimos quadrados, que assume uma distribuição normal dos erros, o estimador *Theil-Sen* é não paramétrico e, portanto, não requer essas suposições.
- **Eficiência assintótica:** Para dados com erros independentes e normalmente distribuídos, o estimador de *Theil-Sen* é quase tão eficiente quanto o estimador de mínimos quadrados (Sen, 1968).

Devido à sua robustez, o estimador de *Theil-Sen* é amplamente utilizado em estudos de séries temporais hidrológicas e climáticas, onde dados frequentemente apresentam *outliers* e distribuição assimétrica (Sen, 1968). Além disso, é comum que o estimador *Theil-Sen* seja utilizado em conjunto com o teste de Mann-Kendall para detectar tendências em séries temporais, especialmente na análise de extremos climáticos.

No contexto de análise de extremos pluviométricos, o estimador *Theil-Sen* pode ser usado para:

1. Quantificar a taxa de mudança dos extremos ao longo do tempo. Por exemplo, se houver uma tendência crescente na intensidade dos eventos de precipitação extrema (como chuvas acima do percentil 99), o estimador pode fornecer uma medida precisa da inclinação dessa tendência.
2. Detectar mudanças espaciais e temporais: Quando aplicado a diferentes locais ou períodos, o estimador permite comparar tendências entre diferentes estações pluviométricas ou épocas, ajudando a identificar áreas mais suscetíveis ao aumento ou diminuição de extremos.

O estimado de *Theil-Sen (Sen's Slope)* é uma ferramenta valiosa e robusta para a análise de tendências em valores extremos pluviométricos, permitindo identificar e quantificar de forma precisa as mudanças temporais em eventos de precipitação extrema. Sua robustez contra *outliers* e seu caráter não paramétrico o tornam particularmente adequado para dados climáticos, onde a variabilidade e os extremos são comuns, como no caso desse estudo.

3.2.3 TESTES DE AUTOCORRELAÇÃO

3.2.3.1. Teste *Ljung Box*

O teste foi proposto por Ljung e Box em 1978 como uma melhoria do teste de Box-Pierce. Ele é projetado para avaliar se os resíduos de um modelo de série temporal ou os dados em uma série temporal são independentes ao longo do tempo, o que implica na ausência de autocorrelação significativa (Ljung & Box, 1978). A autocorrelação pode indicar que há informações não capturadas pelo modelo ou pela análise inicial, o que pode levar a interpretações erradas em análises subsequentes, como testes de tendência.

É uma ferramenta estatística amplamente utilizada na análise de séries temporais para detectar a presença de autocorrelação, que é a correlação entre os valores de uma série temporal em diferentes *lags*. Verificar a autocorrelação é um passo crucial em muitas análises de séries temporais, incluindo a preparação para testes de tendência, modelagem de séries temporais e validação de modelos ajustados (Albuquerque et al., 2020; Mwangi, Koske & Kosgei, 2021; Martínez-Acosta et al., 2020).

A estatística de teste Q do teste de *Ljung-Box* é dada por (Equação 3.9):

$$Q = n * (n + 2) \sum_{k=1}^m \frac{\hat{\rho}_k^2}{n - k} \quad (3.9)$$

Onde:

n é o tamanho da amostra;

m é o número de *lags* incluídos no teste;

$\hat{\rho}_k^2$ é a autocorrelação amostral no lag k.

Sob a hipótese nula H_0 : que afirma que não há autocorrelação até o *lag m*, a estatística Q segue uma distribuição qui-quadrado com m graus de liberdade.

No contexto do teste de *Ljung-Box*, formulam-se as seguintes hipóteses:

- **Hipótese nula H_0 :** Não existe autocorrelação na série temporal até o *lag* m . Isto significa que os valores na série temporal são independentes no tempo.
- **Hipótese alternativa H_1 :** Existe autocorrelação significativa em pelo menos um dos *lags* até m , sugerindo que os valores na série temporal estão correlacionados.

A decisão de rejeitar ou não a hipótese nula é baseada no valor da estatística Q e no valor de p associado.

O valor de p é a probabilidade de obter uma estatística de teste tão extrema quanto a observada, ou mais extrema, assumindo que a hipótese nula é verdadeira à um determinado nível de significância, geralmente de 95% ou 0,05.

Em termos práticos:

- Se o valor de p for menor que o nível de significância, rejeita-se a hipótese nula (H_0), indicando que há evidências de autocorrelação na série temporal.
- Se o valor de p for maior que o nível de significância, aceita-se a hipótese nula, sugerindo que não há evidências suficientes para afirmar a existência de autocorrelação na série temporal.

A verificação da autocorrelação é fundamental antes de realizar análises subsequentes, como testes de tendência. A presença de autocorrelação nos dados pode violar as suposições de independência dos erros em muitos modelos estatísticos, levando a inferências incorretas. Por exemplo, se a autocorrelação não for detectada e tratada, pode resultar em uma falsa indicação de tendência (erro Tipo I) ou na subestimação da significância de uma tendência verdadeira.

O teste de *Ljung-Box* é sensível à escolha do número de *lags* m incluídos no teste. A seleção inadequada de m pode levar a resultados enganosos. Por isso, é comum realizar uma análise prévia para determinar um número apropriado de *lags* ou combinar o teste com outras análises complementares para assegurar a robustez dos resultados.

O teste de *Ljung-Box* é uma ferramenta crucial para a verificação de autocorrelação em séries temporais. Ele garante que as inferências subsequentes sejam baseadas em dados que atendem à suposição de independência temporal, essencial para a validade de muitas análises estatísticas. A interpretação correta do valor de p no contexto desse teste é fundamental para decidir sobre a presença de autocorrelação e, consequentemente, sobre a necessidade de ajustes adicionais na análise da série temporal, (Almazroui, 2020; Ballarin; Anache; Wendland, 2022; Bezerra *et al.*, 2023; Hu *et al.*,

2020; Likinaw; Alemayehu; Bewket, 2023; Seenu; Jayakumar, 2021).

3.2.3. FAC (Função de Autocorrelação) e FACP (Função de Autocorrelação Parcial)

A Análise de Séries Temporais envolve a investigação da dependência temporal entre observações sequenciais, incluindo a aplicação correta dos testes de tendência temporal de Mann Kendall. Dois dos principais instrumentos para analisar essa dependência são as funções de Autocorrelação (FAC) e Autocorrelação Parcial (FACP), amplamente utilizadas na modelagem de séries temporais, especialmente em modelos autorregressivos (AR), de médias móveis (MA), e seus híbridos (ARMA, ARIMA).

De acordo com a definição matemática da Equação (3.10), sendo y_t uma série temporal com média μ e variância σ^2 , a autocorrelação para um *lag* k , dada por ρ_k :

$$\rho_k = \frac{Cov(y_t, y_{t-k})}{\sigma^2} = \frac{\sum_{t=k+1}^n (y_t - \mu)(y_{t-k} - \mu)}{\sum_{t=k+1}^n (y_t - \mu)^2} \quad (3.2)$$

Onde:

- ρ_k : representa o coeficiente de autocorrelação do *lag* k ;
- $Cov(y_t, y_{t-k})$: é a covariância entre y_t e y_{t-k} ;
- σ^2 : é a variância da série temporal.

De acordo com (Box, Jenkins & Reinsel, 1994), a FAC é útil para identificar a presença de dependência temporal e determinar a ordem dos modelos de médias móveis (MM). Em um modelo MM (q), a FAC apresenta cortes significativos até o *lag* q , com valores próximos de zero nos lags seguintes, indicando a ordem do modelo.

- Se a FAC decresce lentamente ao longo dos *lags*, pode indicar que a série temporal é não estacionária.
- Se a FAC corte abruptamente após um determinado *lag*, pode indicar a presença de um modelo de médias móveis.

A FAC é frequentemente utilizada para determinar a ordem q de um modelo MM, onde o corte na FAC indica a ordem do modelo. No caso do presente estudo, a FAC foi utilizada apenas para verificar se existe ou não a presença de autocorrelação significativa e definir qual dos testes de tendência seria aplicado.

A Função de Autocorrelação Parcial (FACP) mede a correlação entre uma

observação e suas defasagens, eliminando o efeito das defasagens intermediárias. A FACP é especialmente útil na identificação da ordem de modelos autoregressivos (AR).

O coeficiente de autocorrelação parcial para um *lag* k , denotado por ϕ_{kk} , pode ser calculado resolvendo o sistema de equações de Yule-Walker:

$$\phi_{kk} = \rho_k - \sum_{j=1}^{k-1} \phi_{kj} \rho_{k-j} \quad (3.11)$$

Onde:

- ϕ_{kk} : é o coeficiente de autocorrelação parcial no *lag* k .
- ρ_k : é o coeficiente de autocorrelação do *lag* k .

Hamilton (1994) descreve a FACP como uma ferramenta para isolar o efeito direto de um *lag* específico, removendo as influências indiretas dos lags intermediários. Isso é crucial para identificar a ordem p de um modelo AR, onde a FACP corta após o *lag* p , indicando a ordem do modelo.

Todos os cálculos das respectivas etapas descritas nesse capítulo foram implementados utilizando a linguagem de programa PYTHON, enquanto a espacialização dos dados, gerando mapas, foi realizada utilizando o banco de dados implementado no *software* QGis 3.24, utilizando os resultados obtidos.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estudos regionais, como o de Santos et al. (2020), que investigam a variabilidade climática no Brasil, indicam que o sudeste brasileiro experimenta uma tendência geral de aumento na frequência de chuvas intensas. No entanto, apesar dos múltiplos aprimoramentos dos modelos e dos cenários de emissões, os erros associados à modelagem são uma realidade, uma vez que não conseguem descrever o sistema climático completamente e em toda a sua complexidade (Almazroui et al., 2021; IPCC, 2022; Knutti, 2008). Esses erros refletem nas incertezas das simulações, sobretudo às simulações das precipitações, principalmente na identificação de aumento ou diminuição das tendências em eventos extremos de chuva (Almazroui et al., 2021; IPCC, 2022).

A análise aqui realizada, tem foco em tendências para os meses mais chuvosos (outubro a março), envolvendo o ano hidrológico, separadamente, para percentis 95 e 99 em Minas Gerais, tornando-se assim mais detalhada e específica, em uma escala local. Permitindo entender como mudanças locais e mensais afetam a precipitação extrema em um estado com grande variabilidade climática e topográfica.

3.3.1 ESTACIONARIDADE, TENDÊNCIAS E MAGNITUDES NAS SÉRIES TEMPORAIS DE EXTREMOS PLUVIOMÉTRICOS

As análises de estacionariedade e tendência foram realizadas para as séries temporais de precipitação diária extrema, por meses, de acordo com os percentis 95 e 99 definidos no capítulo anterior, para as 232 estações pluviométricas de Minas Gerais. Aplicando os testes ADF, KPSS e o teste de Mann-Kendall para os percentis 95 e 99 nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro. Esses meses foram escolhidos por serem os mais chuvosos e apresentarem os maiores valores de extremos pluviométricos segundo (Matsuoka, Ferreira & Rofatto, 2024). A verificação da estacionariedade é essencial para garantir a validade dos resultados na análise de tendências, uma vez que a presença de não estacionariedade pode comprometer as inferências.

Porém, no caso da presente pesquisa, a presença de não estacionariedade nas séries pode ser interessante, trazendo à tona reflexões relevantes. O conceito de estacionariedade na análise de extremos não considera a mudança da média e da variância ao longo do tempo. No entanto, esse conceito deveria ser ampliado para incluir as mudanças temporais de uma série temporal devido às mudanças climáticas (AghaKouchak *et al.*, 2013).

Os resultados dos testes ADF e KPSS foram avaliados com base nos seguintes critérios:

- Caso 1: Ambos os testes indicam que a série não é estacionária — Conclui-se que a série é não estacionária.
- Caso 2: Ambos os testes indicam que a série é estacionária — A série é considerada estacionária.
- Caso 3: O teste KPSS indica estacionariedade e o teste ADF indica não estacionariedade — A série é estacionária em tendência, necessitando da remoção da tendência para que seja estritamente estacionária. A série sem tendência deve

ser verificada para estacionariedade.

- Caso 4: O teste KPSS indica não estacionariedade e o teste ADF indica estacionariedade — A série é estacionária por diferenciação, e a diferenciação deve ser aplicada para tornar a série estritamente estacionária. A série diferenciada deve ser verificada novamente.

Com base nesses resultados, pode-se inferir que, em muitos casos, as séries apresentam estacionariedade em tendência (ET); estacionariedade por diferenciação (ED), ou seja, requerem a diferenciação para torná-las estritamente estacionárias, corroborando com os resultados dos testes de MK. Mas, apenas algumas delas apresentam comportamento não estacionário, para os testes ADF e KPSS, com tendências significativas para os MK e MK_m, as quais particularmente tornam-se interessantes para modelagem de valores extremos no contexto das mudanças climáticas.

A aplicação do teste de Mann-Kendall reforça os resultados sobre o comportamento da estacionariedade nas séries, uma vez que o teste é utilizado para detectar tendências monotônicas nas séries temporais.

Os resultados detalhados, incluindo tabelas e mapas, com a distribuição espacial das estações que apresentam diversos comportamentos em relação à estacionariedade das séries, são apresentados a seguir, permitindo uma análise mais precisa das regiões de Minas Gerais mais suscetíveis a eventos de precipitação extrema.

Quando o teste de Mann-Kendall detecta uma tendência, mas a série é classificada como "estacionária" pelos testes ADF e KPSS, isso indica que a série pode ser estacionária à curto prazo, mas com uma tendência significativa no longo prazo.

Mesmo que os dados sejam estacionários com base nos testes tradicionais, é importante considerar a tendência identificada pelo Mann-Kendall, especialmente para modelagem de longo prazo e análise de mudanças climáticas.

A estacionariedade nas séries temporais de cada estação, foram classificadas em três classes, como dito acima Estacionária em Tendência (ET), Estacionária por Diferenciação (ED) e Não Estacionária (NE).

As estações classificadas como Estacionária em Tendência (ET) em ambos os percentis indicam que, apesar de uma tendência de diminuição ou de aumento, a série temporal mantém um comportamento mais previsível e estável ao longo do tempo. As estações classificadas como Estacionária por Diferenciação (ED) mostram maior variabilidade, o que pode indicar que as condições climáticas locais estão mudando de maneira mais abrupta. Essas estações podem estar em áreas com variação maior de

precipitação ao longo dos anos, como regiões mais suscetíveis a mudanças sazonais.

As estações Não Estacionárias (NE), sugerem que essas regiões podem estar experimentando mudanças mais drásticas nos regimes pluviométricos, sem um padrão claro ou com mudanças abruptas.

A Tabela 3.1 mostra os resultados da classificação de estacionariedade e tendências presentes na série temporal para o percentil 95, além dos p-valores e das magnitudes (*slope*) para cada estação selecionada durante essa etapa, para o mês de janeiro. Das 232 analisadas apenas 63 apresentaram tendência e estacionariedade significativas, sendo que as tendências são de diminuição, sugerindo que os volumes de chuva extrema têm se tornado menos frequentes e/ou menos intensos ao longo do tempo para o mês de janeiro nessas estações.

Tabela 3.1 – Estações com tendência e estacionariedade presente na série temporal para o P95 no mês de janeiro.

Nº	Município	Estação	MK/MK_m P95	p_valor P95	Slope P95	ADF/KPSS P95
1	Arinos	Arinos - Montante	diminuição	0,030	-0,426	ET
2	Centralina	Avantiquara	diminuição	0,012	-0,458	ED
3	Tumiritinga	Barra do Cuieté - Jusante	diminuição	0,014	-0,498	ED
4	Mateus Leme	Barro Preto	diminuição	0,012	-0,415	ET
5	Tuaciguara	Brilhante	diminuição	0,028	-0,316	ET
6	Buritzeiro	Cachoeira do Paredão	diminuição	0,027	-0,471	ED
7	Capelinha	Capelinha	diminuição	0,011	-0,452	ET
8	Montalvânia	Capitânea	diminuição	0,048	-0,407	ET
9	Carbonita	Carbonita	diminuição	0,000	-0,524	ET
10	Carlos Chagas	Carlos Chagas	diminuição	0,007	-0,450	ED
11	Central de Minas	Central de Minas	diminuição	0,032	-0,417	ET
12	Conceição do Mato Dentro	Conceição do Mato Dentro	diminuição	0,037	-0,449	ED
13	Coroaci	Coroaci	diminuição	0,001	-0,747	ED
14	Coronel Murta	Coronel Murta	diminuição	0,007	-0,439	ED
15	Estrela do Sul	Estrela do Sul	diminuição	0,018	-0,466	ET
16	Monte Alegre de Minas	Fazenda Cachoeira	diminuição	0,017	-0,385	ET
17	Almenara	Fazenda Cajueiro	diminuição	0,019	-0,341	ET
18	Grão Mogol	Fazenda Jambeiro - Grão Mogol	diminuição	0,002	-0,533	ED
19	Jequitibá	Fazenda Vargem Bonita	diminuição	0,025	-0,406	ET
20	Ataléia	Fidelândia - Montante	diminuição	0,028	-0,440	ED
21	Gouveia	Gouveia	diminuição	0,004	-0,539	NE
22	Guanhães	Guanhães	diminuição	0,040	-0,493	ET
23	Guarani	Guarani	diminuição	0,004	-0,481	ED
24	Ibiá	Ibiá	diminuição	0,033	-0,275	ET
25	Águas Vermelhas	Itamarati	diminuição	0,015	-0,430	ET

26	Itaobim	Itaobim	diminuição	0,049	-0,380	ET
27	Itinga	Itinga	diminuição	0,014	-0,407	ED
28	Onça de Pitangui	Jaguaruna - Jusante	diminuição	0,005	-0,369	ET
29	Nova Porteirinha	Janaúba	diminuição	0,014	-0,461	ED
30	Jequitinhonha	Jequitinhonha	diminuição	0,027	-0,416	ED
31	Lassance	Lassance	diminuição	0,047	-0,458	ET
32	Carmo do Paranaíba	Major Porto	diminuição	0,007	-0,409	NE
33	Diamantina	Mendanha - Montante	diminuição	0,002	-0,873	ED
34	Miravânia	Miravânia	diminuição	0,023	-0,402	ET
35	Morro do Pilar	Morro do Pilar	diminuição	0,023	-0,530	ET
36	Pedras de Maria Da Cruz	Pedras de Maria Da Cruz	diminuição	0,001	-0,608	ED
37	Teófilo Otoni	Pedro Versiani (EFBM)	diminuição	0,006	-0,713	ED
38	Vargem da Lapa	Pega	diminuição	0,008	-0,426	ED
39	Rio Novo	Piau	diminuição	0,013	-0,492	ED
40	Cordisburgo	Pirapama	diminuição	0,000	-1,265	NE
41	Presidente Juscelino	Ponte do Licinio - Jusante	diminuição	0,003	-0,609	ED
42	Presidente Olegário	Ponte Firme	diminuição	0,027	-0,514	ED
43	Mateus Leme	Ponte Nova do Paraopeba	diminuição	0,035	-0,435	ET
44	Pratinha	Pratinha	diminuição	0,024	-0,370	ED
45	Presidente Olegário	Presidente Olegário	diminuição	0,039	-0,361	ET
46	Rio Pardo de Minas	Rio Pardo de Minas	diminuição	0,007	-0,435	ED
47	Caratinga	Santo Antonio do Manhuaçu	diminuição	0,022	-0,551	ED
48	Santo Hipólito	Santo Hipólito	diminuição	0,011	-0,502	ED
49	Urucuia	Santo Inácio	diminuição	0,028	-0,490	ET
50	Sao Goncalo do Abaeté	Sao Goncalo do Abaeté	diminuição	0,012	-0,360	ED
51	Montes Claros	Sao Joao da Vereda	diminuição	0,033	-0,422	ED
52	Sao Pedro do Suaçuí	Sao Pedro do Suaçuí	diminuição	0,017	-0,644	ED
53	Aimorés	São Sebastião da Encruzilhada	diminuição	0,045	-0,354	ED
54	Tapiraí	Tapiraí - Jusante	diminuição	0,001	-0,702	ED
55	Tiros	Tiros	diminuição	0,005	-0,551	ED
56	Unaí	Unaí	diminuição	0,015	-0,419	ED
57	Gouveia	Usina Paraúna	diminuição	0,025	-0,411	ED
58	Fortaleza de Minas	Usina Santana	diminuição	0,039	-0,279	ET
59	Santana do Riacho	Vau da Lagoa	diminuição	0,013	-0,267	ET
60	Mathias Lobato	Vila Matias - Montante	diminuição	0,017	-0,515	ED
61	Bocaiúva	Vila Terra Branca - Jusante	diminuição	0,010	-0,547	ED
62	Urucuia	Vila Urucuia	diminuição	0,015	-0,400	ED
63	Santa Juliana	Zelândia	diminuição	0,042	-0,510	ET

Fonte: A autora (2024).

A Tabela 3.2, mostra os resultados da classificação de estacionariedade e tendência presente na série temporal, no percentil 99, assim como os p-valores e as magnitudes (*slope*) para cada estação, também no mês de janeiro. Igualmente ao percentil 95, todas as estações mostram uma tendência de diminuição ("*decreasing*"), também sugerindo que os volumes de chuva extrema têm se tornado menos frequentes e/ou menos intensos ao longo do tempo para essas estações nesse mês. O número de estações com tendência e estacionariedade significativas no percentil 99 é muito menor que no percentil 95, quase a metade. Das 232 estações, apenas 37 mostram algum tipo de estacionariedade e tendência.

Tabela 3.2 – Estações com tendência e estacionariedade presente na série temporal para o P99 no mês de janeiro.

Nº	Município	Estação	MK/MK_m P99	P_Valor P99	Slope P99	ADF/KPSS P99
1	Abaeté	Abaeté	diminuição	0,038	-0,485	ET
2	Conceição do Mato Dentro	Conceição do Mato Dentro	diminuição	0,047	-0,678	ET
3	Coroaci	Coroaci	diminuição	0,005	-1,063	ED
4	Coronel Murta	Coronel Murta	diminuição	0,017	-0,571	ED
5	Dom Cavati	Dom Cavati	diminuição	0,035	-0,602	ET
6	Estrela do Sul	Estrela do Sul	diminuição	0,011	-0,778	ED
7	Grão Mogol	Fazenda Jambeiro – Grão Mogol	diminuição	0,010	-0,608	ED
8	Ataléia	Fidelândia - Montante	diminuição	0,008	-0,417	ET
9	Carlos Chagas	Francisco Sa (EFBM)	diminuição	0,036	-0,627	ET
10	Gouveia	Gouveia	diminuição	0,000	-0,705	ED
11	Guarani	Guarani	diminuição	0,014	-0,508	ED
12	Águas Vermelhas	Itamarati	diminuição	0,014	-0,674	ED
13	Itinga	Itinga	diminuição	0,040	-0,587	ET
14	Nova Porteirinha	Janaúba	diminuição	0,005	-0,688	ED
15	Jequitinhonha	Jequitinhonha	diminuição	0,010	-0,640	ED
16	Tiros	Lagoa do Gouveia	diminuição	0,049	-0,490	ET
17	Diamantina	Mendanha - Montante	diminuição	0,009	-1,015	ED
18	Pedras de Maria Da Cruz	Pedras de Maria Da Cruz	diminuição	0,023	-0,671	ET
19	Teófilo Otoni	Pedro Versiani (EFBM)	diminuição	0,001	-1,100	NE
20	Rio Novo	Piau	diminuição	0,005	-0,767	ED
21	Piranga	Piranga	diminuição	0,003	-0,817	ED
22	Cordisburgo	Pirapama	diminuição	0,000	-1,498	ED
23	Presidente Juscelino	Ponte do Licinio - Jusante	diminuição	0,026	-0,599	ED
24	President Olegário	Ponte Firme	diminuição	0,049	-0,595	ED
25	Mateus Leme	Ponte Nova do Paraopeba	diminuição	0,000	-0,375	ET

26	Pratinha	Pratinha	diminuição	0,034	-0,431	ET
27	Presidente Olegário	Presidente Olegário	diminuição	0,013	-0,631	ET
28	Patos de Minas	Santana de Patos	diminuição	0,025	-0,584	ED
29	Santo Hipólito	Santo Hipólito	diminuição	0,006	-0,791	ED
30	Montalvânia	Sao Goncalo	diminuição	0,024	-0,440	ET
31	Sao Goncalo do Abaeté	Sao Goncalo do Abaeté	diminuição	0,004	-0,585	ED
32	Itaobim	Sao Joao Grande	diminuição	0,045	-0,495	ET
33	Aimorés	Sao Sebastião da Encruzilhada	diminuição	0,028	-0,376	ED
34	Tiros	Tiros	diminuição	0,000	-0,899	ED
35	Santana do Riacho	Vau da Lagoa	diminuição	0,012	-0,464	ET
36	Bocaiúva	Vila Terra Branca - Jusante	diminuição	0,001	-0,924	ED
37	Santa Juliana	Zelândia	diminuição	0,017	-0,815	ED

Fonte: A autora (2024).

Em ambos os percentis algumas estações apresentaram comportamentos não estacionários, porém com tendência significativa nos testes de MK ou MK_m, sugerindo que a precipitação não é constante em torno da média ou da variância ao longo do tempo, sugerindo a ocorrência de uma mudança no padrão de extremos nessas estações à longo prazo, o que deve ser investigado. No P95, as estações de Gouveia, Major Porto e Pirapama; e no P99, a estação de Pedro Versiani, apresentaram esse comportamento, exigindo uma maior investigação em análises futuras.

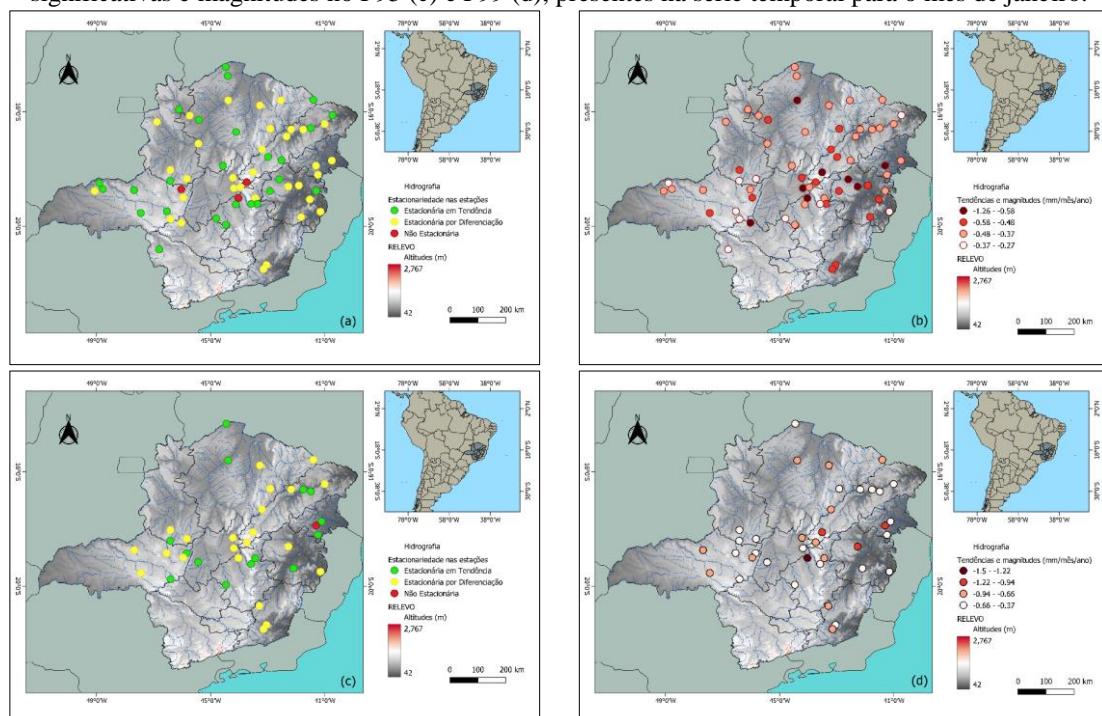
A diferença para os resultados do número de estações pluviométricas para o mês de janeiro, considerando 63 estações no percentil 95 e 37 no percentil 99, podem ser explicadas pela natureza dos eventos extremos e pelos diferentes processos climáticos que influenciam a ocorrência desses extremos durante o citado mês. Esses percentis representam diferentes intensidades de precipitação, e as respostas das séries temporais de precipitação variam de acordo com as características dos eventos que eles representam. Além disso, os resultados de estacionariedade e tendências observados em cada percentil indicam como esses processos se manifestam de maneira distinta.

Os percentis 95 e 99 representam diferentes níveis de eventos extremos de precipitação. O primeiro, geralmente inclui eventos de precipitação intensa, mas mais frequentes, enquanto o segundo, representa os eventos mais raros e extremos. Essa diferença de frequência e intensidade pode explicar por que mais estações apresentam tendências no percentil 95 do que no 99.

Os mapas da Figura 3.1 (a, b, c e d), mostram os resultados da espacialização da estacionariedade (a e c), tendências e magnitudes (b e d) dos P95 e P99 de precipitação

intensa, respectivamente para o mês de janeiro, fornecendo uma visão detalhada das tendências regionais de extremos pluviométricos. A tendência de diminuição para o mês de janeiro, podem ser contextualizadas e comparadas com estudos anteriores sobre mudanças climáticas no Brasil e, mais especificamente, no estado de Minas Gerais, corroborando com (Tavares, 2024; Velasco Holender; Barbosa Santos, 2023) em uma escala local e com (IPCC, 2022; Marrafon e Reboita, 2020) no que concerne uma escala continental. Reis *et al.* (2018); Salviano, Groppo & Pellegrino (2016) e Avila-Diaz *et al.* (2020), porém usando dados de reanálise e de satélites, para analisar o comportamento por estações do ano, encontraram tendência de aumento nos extremos de precipitação, o que pode ser explicado pelo grau de suavização dos dados nos respectivos estudos, tanto espacial quanto temporalmente, influenciando nos resultados das tendências no mês específico da presente pesquisa.

Figura 3.1 – Localização das estações com estacionariedade no P95 (a) e P99 (b), tendências significativas e magnitudes no P95 (c) e P99 (d), presentes na série temporal para o mês de janeiro.



Fonte: A autora (2024).

Em relação aos fenômenos atmosféricos que afetam a região, (Escobar & Reboita, 2022; Ferreira & Reboita, 2022; Reboita et al., 2010) também destacam as mudanças no padrão das chuvas extremas em parte do Sudeste do Brasil, particularmente associada a mudanças nos padrões de circulação atmosférica, como a posição da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A predominância de estações classificadas como

Estacionária em Tendência (ET) na região central de Minas Gerais sugere que, embora haja uma tendência de diminuição dos eventos de precipitação extrema, o regime pluviométrico nesta região tem se mantido relativamente estável.

As estações na região Leste e Nordeste de Minas Gerais, que aparecem como Estacionária por Diferenciação (ED) e algumas como Não Estacionária (NE) no P95 e no P99, apontam para uma maior variabilidade e uma mudança mais acentuada no regime de chuvas extremas. A maior instabilidade nesta região pode estar relacionada ao relevo e à dinâmica atmosférica, que influencia a precipitação em áreas montanhosas, já que o relevo montanhoso pode influenciar significativamente os padrões de precipitação. De acordo com o IPCC (2022) e Oliveira, Reboita & Rocha (2018), áreas montanhosas e regiões próximas ao litoral podem ser mais suscetíveis a variações extremas em precipitação, o que pode explicar a presença de maior variabilidade nas estações do leste de Minas Gerais.

Silva, Galvíncio & Nóbrega (2011), discutem que as regiões mais ao norte e nordeste de Minas Gerais, especialmente na BH do Rio São Francisco, podem estar sofrendo os impactos das variações nos padrões de precipitação associadas à Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) e El Niño/La Niña, que afetam a distribuição de chuvas no estado. Já no sul de Minas Gerais, as estações predominantemente classificadas como ED, especialmente no P95, mostram uma maior variabilidade e sugerem que o regime de chuvas extremas nesta região está passando por uma transição mais significativa. (Reboita *et al.*, 2018) apontam que, em algumas partes do Sudeste, incluindo o sul de Minas Gerais, houve uma intensificação dos eventos extremos de seca, intercalados por períodos de chuvas intensas, o que pode explicar a variabilidade observada nas estações dessa região.

Além disso, Tavares *et al.* (2019) destaca que mudanças nos padrões de precipitação em Minas Gerais podem estar relacionadas à mudança do comportamento das frentes frias e do avanço da massa de ar polar, o que afeta a distribuição e a intensidade das chuvas extremas. Esse comportamento é especialmente evidente na região sul do estado, onde a interação entre frentes frias e a topografia pode amplificar as variações nas chuvas extremas.

O cenário de diminuição dos eventos extremos de precipitação em Minas Gerais, no mês de janeiro, especialmente nos percentis 95 e 99, está em consonância com as projeções do IPCC (2022), que indicam uma tendência de redução de precipitações extremas em várias partes do mundo, incluindo o Brasil. Em especial, o Sudeste brasileiro que é identificado como uma área onde a variabilidade climática pode aumentar,

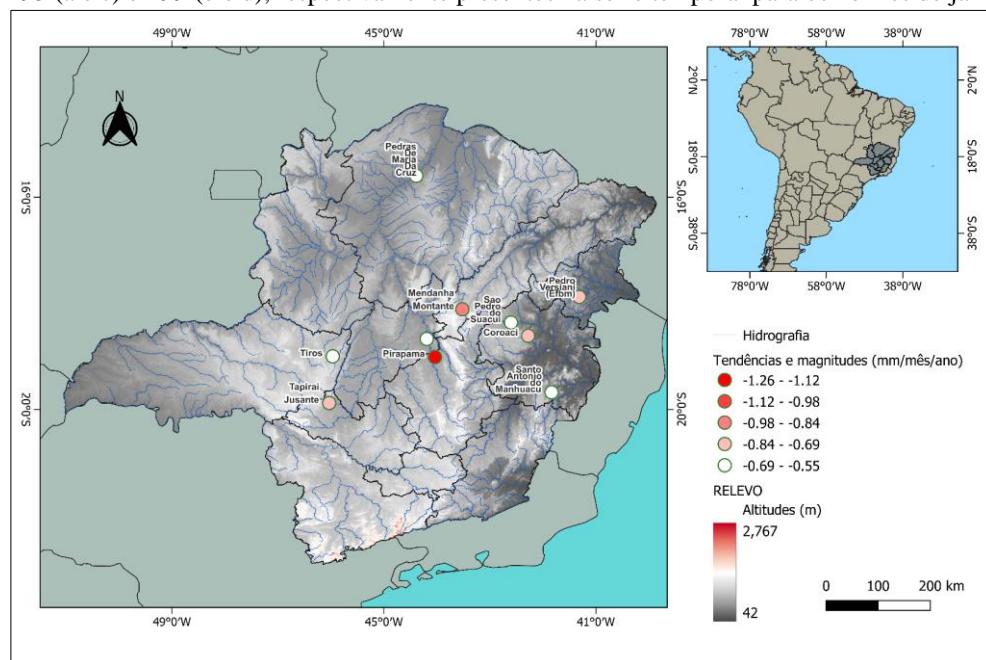
alternando entre secas severas e chuvas intensas, mas com uma tendência de diminuição dos eventos mais extremos no longo prazo.

Por outro lado, a variabilidade crescente em algumas regiões, como o norte e leste de Minas Gerais, que apontam que o aumento da variabilidade pode ser um reflexo de uma combinação de fatores locais (como a topografia e mudanças no uso do solo) e globais (como o aquecimento global e a variabilidade natural do clima).

As análises dos percentis 95 e 99 para o mês de janeiro, juntamente com a espacialização das estações, indicam que as mudanças nos extremos de precipitação em Minas Gerais nesse mês, não são uniformes. Enquanto regiões como o centro do estado apresentam uma maior estabilidade, áreas no leste, nordeste e sul estão experimentando uma maior variabilidade, com algumas estações mostrando mudanças mais abruptas nos padrões de chuva.

Para uma análise mais detalhada, o mapa da Figura 3.2 mostra as dez estações com as maiores mudanças nas magnitudes de precipitação extrema em Minas Gerais, ou seja, com os maiores valores de diminuições.

Figura 3.2 – Localização das estações com estacionariedade, tendência e magnitudes significativas para os P95 (a e c) e P99 (b e d), respectivamente presentes na série temporal para os no mês de janeiro.



Fonte: A autora (2024).

A análise das estações com as maiores mudanças na precipitação extrema em Minas Gerais reflete padrões consistentes com estudos climáticos sobre a região e o

Brasil. Os resultados indicam uma redução significativa dos eventos de precipitação extrema em várias regiões do estado, especialmente no norte e leste de Minas Gerais.

1. **PIRAPAMA** (Slope: -1.264, P-valor: 0.000027): está localizada no Sudeste do estado, em uma região influenciada pelo clima tropical de altitude e mostra uma acentuada redução nos eventos de precipitação extrema. Isso pode estar associado a mudanças nos padrões da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que influencia fortemente as chuvas intensas no Sudeste. De acordo com (Ferreira e Reboita, 2022), a posição e intensidade da ZCAS têm mostrado variações nos últimos anos, o que pode explicar a redução observada na precipitação extrema.
2. **MENDANHA - MONTANTE** (Slope: -0.873, P-valor: 0.002016): localizada mais ao norte, no Vale do Jequitinhonha, caracterizada por ser uma região semiárida e com baixa precipitação anual. A redução nos eventos extremos de precipitação pode exacerbar a desertificação, que já é uma ameaça crescente em áreas secas do Brasil. A intensificação de secas e a diminuição de chuvas extremas são tendências observadas em regiões semiáridas, que relacionam essas mudanças a variações na Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) e aos efeitos do fenômeno ENOS, como já citado anteriormente.
3. **COROACI** (Slope: -0.747, P-valor: 0.001427): está situada em uma região montanhosa próxima à Mata Atlântica, no Leste do estado – Vale do Rio Doce, depende de frentes frias e da ZCAS para chuvas intensas. A variabilidade da precipitação em janeiro é notável, com alguns anos apresentando chuvas intensas que podem ultrapassar 450 mm (Pereira *et al.*, 2018). Essa variabilidade climática tem alterado a dinâmica desses sistemas no Sudeste, levando a uma diminuição nas chuvas intensas. Essa região apresentou o terceiro maior valor de diminuição nos extremos pluviométricos na presente pesquisa. A Mata Atlântica, que exerce influência na recarga hídrica dessa região, pode estar sofrendo com a menor quantidade de eventos extremos de chuva, o que pode impactar ainda mais a biodiversidade e os recursos hídricos.
4. **PEDRO VERSIANI (EFBM)** (Slope: -0.713, P-valor: 0.005759): no Vale do Mucuri, Centro-leste de Minas Gerais, está experimentando uma redução significativa nos eventos extremos, o que pode impactar a agricultura e a recarga hídrica. Pereira *et al.* (2018), indicam que a variabilidade climática na região não é uniforme, resultando em eventos extremos de precipitação que podem ocorrer de forma esporádica, como chuvas

intensas seguidas de longos períodos de seca. Esses eventos extremos podem ser exacerbados por fenômenos como o El Niño e bloqueios atmosféricos, que influenciam a distribuição e a intensidade das chuvas.

5. **TAPIRAI - JUSANTE** (Slope: -0.702, P-valor: 0.000912): localizada no Centro-sul de Minas Gerais, Tapiraí, apresenta uma acentuada diminuição com um alto nível de consistência, essa diminuição das chuvas extremas pode estar associada a uma menor intensidade da ZCAS e frentes frias.

6. **SÃO PEDRO DO SUAÇUÍ** (Slope: -0.644, P-valor: 0.016972): No Leste de Minas Gerais, assim como Coroaci, São Pedro do Suaçuí está localizada em uma área influenciada por sistemas atmosféricos tropicais e um relevo montanhoso.

7. **PONTE DO LICÍNIO - JUSANTE** (Slope: -0.609, P-valor: 0.002758): Centro-sul de Minas Gerais. A redução na precipitação extrema em Ponte do Licínio é consistente com os padrões observados para o sudeste, onde a intensidade das chuvas de verão está diminuindo. Isso pode impactar tanto a agricultura quanto a geração de energia hidrelétrica, que depende de eventos de precipitação intensos para manter os reservatórios em níveis adequados.

8. **PEDRAS DE MARIA DA CRUZ** (Slope: -0.608, P-valor: 0.001465): No Norte do estado, essa região, sendo uma área semiárida, já enfrenta desafios hídricos significativos. A redução nos extremos de chuva observada em Pedras de Maria da Cruz pode estar ligada ao agravamento das secas, com secas prolongadas e a diminuição da variabilidade interanual de chuvas em áreas semiáridas.

9. **SANTO ANTÔNIO DO MANHUAÇU** (Slope: -0.551, P-valor: 0.022057): Leste de Minas Gerais, próximo à Serra do Caparaó. Essa área é tradicionalmente úmida, com chuvas frequentes, mas a diminuição dos extremos pode estar associada a mudanças na dinâmica das frentes frias. As frentes frias, que antes traziam chuvas intensas, podem estar se tornando menos frequentes ou menos intensas, conforme (Cardozo, Reboita & Garcia, 2015).

10. **TIROS** (Slope: -0.551, P-valor: 0.004697): situada no Oeste de Minas Gerais, em uma região de transição entre o Cerrado e a Mata Atlântica, onde as chuvas sazonais desempenham um papel crucial na agricultura.

A Tabela 4.3 apresenta as estações que exibiram estacionariedade e tendências significativas para o percentil 95 (P95) no mês de fevereiro. Observou-se que o número de estações foi significativamente menor em comparação ao mês anterior, o que já era esperado. De acordo com o estudo de (Matsuoka, Ferreira & Rofatto, 2024), fevereiro apresentou uma redução considerável no número de eventos extremos tanto para o P95 quanto para o P99.

Para o P95, seis estações mostraram estacionariedade e tendências: quatro delas são classificadas como estacionárias com tendência (ET) e apresentaram uma tendência significativa de aumento, enquanto duas foram classificadas como estacionárias com diferenciação e tendência de diminuição (ED), indicando uma tendência de redução dos extremos. As quatro estações com tendências de aumento estão localizadas no sul e sudoeste do estado, regiões que não haviam apresentado tendências significativas no mês anterior, mas que se apresenta como uma das região de grande concentração de extremos (Matsuoka, Ferreira & Rofatto, 2024).

A estação Pedro Versiani, que havia mostrado tendência de diminuição no mês anterior, manteve essa tendência e passou a ser classificada como ET, demonstrando consistência na diminuição dos extremos nesse percentil com tendência a longo prazo. A segunda estação com tendência de diminuição, Guarani, localizada na Zona da Mata, anteriormente não havia apresentado uma tendência significativa, mas agora está classificada como ED, o que pode indicar uma alta variabilidade nos dados, exigindo uma atenção especial para essa localidade.

Tabela 3.3 – Estações com tendência e estacionariedade presente na série temporal para o P95 no mês de fevereiro.

Nº	Município	Estação	MK/MK_m P95	p_Valor P95	Slope P95	ADF/KPSS P95
1	Sacramento/ Tapira	Desemboque	aumento	7,06E-06	2,04E-01	ET
2	Passa Tempo	Fazenda Campo Grande	aumento	7,37E-03	2,17E-01	ET
3	Guarani	Guarani	diminuição	3,46E-02	-2,99E-01	ED
4	Ituiutaba	Ituiutaba	aumento	4,68E-02	3,11E-01	ET
5	Teófilo Otoni	Pedro Versiani (EFBM)	diminuição	3,32E-02	-4,17E-01	ET
6	Santa Barbara	Santa Barbara	aumento	2,70E-02	4,42E-01	ET

Fonte: A autora (2024).

A Tabela 3.4 apresenta as estações que exibiram estacionariedade e tendências significativas para o percentil 99 (P99) no mês de fevereiro.

O número de estações com esses resultados também foi significativamente inferior em comparação ao mês anterior, pelos motivos já explicados. Apenas nove estações mostraram estacionariedade e tendências, sendo que cinco apresentaram tendência de aumento e quatro de diminuição, variando entre as classificações de estacionárias com tendência (ET) e estacionárias com diferenciação (ED) em ambos os casos.

A estação Pedro Versiani manteve a tendência de diminuição observada anteriormente e, com o aumento da magnitude dessa tendência, tornou-se mais pronunciada. Pirapama também continuou como ED, com tendência de diminuição para o P99, reforçando a consistência dessa tendência para a localidade.

A estação de Conselheiro Lafaiete, por outro lado, apresentou uma tendência de aumento e foi classificada como não estacionária (NE), indicando uma mudança abrupta em algum momento ao longo do tempo na média e na variância dos dados, sugerindo uma alteração no regime pluviométrico da região.

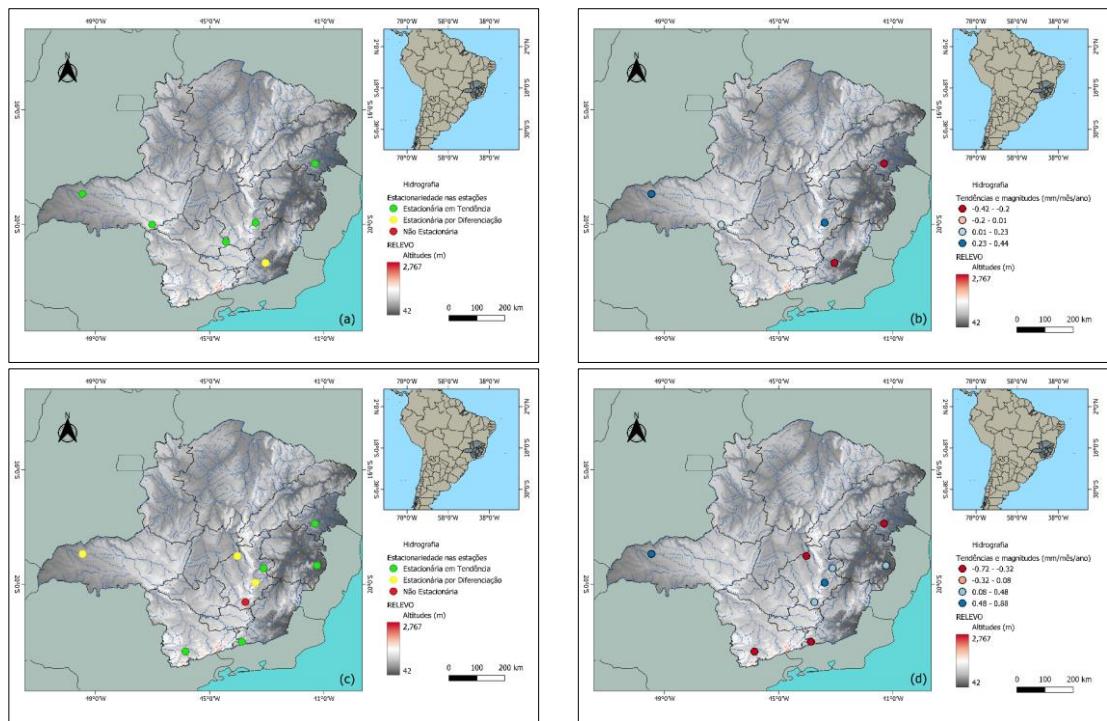
Tabela 3.4 – Estações com tendência e estacionariedade presente na série temporal para o P99 no mês de fevereiro.

Nº	Município	Estação	MK/MK_m P99	p_valo r P99	slope_Percent il 99	ADF/KPS S P99
1	Conselheiro Lafaiete	Conselheiro Lafaiete	aumento	0,021	0,352	NE
2	Rio Preto	Fazenda Sao Gabriel	diminuição	0,043	-0,347	ET
3	Ituiutaba	Ituiutaba	aumento	0,006	0,694	ED
4	Teófilo Otoni	Pedro Versiani (EFBM)	diminuição	0,025	-0,664	ET
5	Cordisburgo	Pirapama	diminuição	0,036	-0,718	ED
6	Cachoeira de Minas	Ponte do Rodrigues	diminuição	0,039	-0,568	ET
7	Resplendor	Resplendor - Jusante	aumento	0,044	0,422	ET
8	Santa Barbara	Santa Barbara	aumento	0,005	0,880	ED
9	Santa Maria do Itabira	Santa Maria do Itabira	aumento	0,033	0,355	ET

Fonte: A autora (2024).

A Figura 3.3 (a, c, b e d), mostram a distribuição espacial da estacionariedade e tendências para ambos os percentis para fevereiro, onde observa-se que a maioria das estações estão distribuídas na parte sul, sudeste e sudoeste do estado e apenas uma mais a nordeste do estado.

Figura 3.3 – Localização das estações com estacionariedade no P95 (a) e P99 (c), tendências significativas e magnitudes no P95 (b) e P99 (d), presentes na série temporal para os no mês de fevereiro.



Fonte: A autora (2024).

A Tabela 3.5, mostra as estações com estacionariedade e tendências significativas para o P95 no mês de março, mês de fechamento do período chuvoso que mostra um comportamento transicional. No P95, onze estações apresentaram tendências significativas, sendo sete delas com tendências de aumento e quatro com diminuição. Pirapama apresenta tendência de diminuição e comportamento ED, mostrando a consistência na tendência, porém uma alta variabilidade dos dados ao longo do tempo. Apenas uma se mostrou NE (Ponte do Rodrigues), a qual requer uma análise mais aprofundada devido a aparente mudança no padrão do regime de eventos extremos pluviométricos.

Tabela 3.5 – Estações com tendência e estacionariedade presente na série temporal para o P95 no mês de março.

Nº	Município	Estação	MK/MK_m P95	p_valor P95	Slope P95	ADF/KPSS P95
1	Tupaciguara	Brilhante	aumento	0,009	0,466	ET
2	São Gonçalo do Abaeté	Canoeiros	aumento	0,041	0,501	ET
3	Cascalho Rico	Cascalho Rico	diminuição	0,049	-0,490	ET
4	Itanhandu	Ipiacu	aumento	0,032	0,317	ED
5	Lassance	Lassance	aumento	0,019	0,381	ED
6	Padre Paraiso	Padre Paraiso	aumento	0,011	0,394	ED
7	Cordisburgo	Pirapama	diminuição	0,003	-0,861	ED
8	Paraopeba	Ponte da Taquara	aumento	0,023	0,332	ED
9	Cachoeira de Minas	Ponte do Rodrigues	diminuição	0,015	-0,256	NE
10	Ponte Nova	Ponte Nova Jusante	diminuição	0,037	-0,228	ED
11	Santa Bárbara	Santa Barbara	aumento	0,024	0,361	ED

Fonte: A autora (2024).

A Tabela 3.6 mostra as estações com estacionariedade e tendências significativas no P99 para o mês de março. Doze estações mostraram estacionariedade e tendências significativas, das quais seis com tendência de aumento e 6 com diminuição, com Pirapama mantendo a tendência de diminuição com ED. Duas se mostraram NE, Ponte Nova Jusante e Torrões, devendo ser analisadas com mais cuidado em relação às mudanças de padrão no regime pluviométrico.

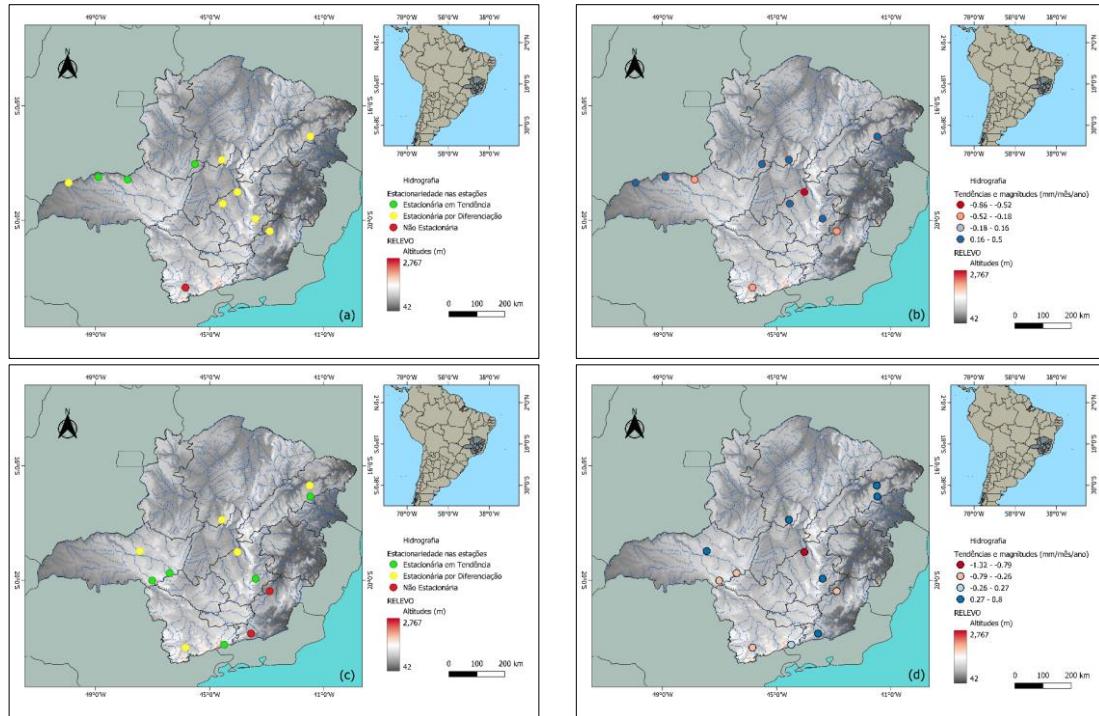
Tabela 3.6 – Estações com tendência e estacionariedade presente na série temporal para o P99 no mês de março.

Nº	Município	Estação	MK/MK_m P99	p_valor P99	Slope P99	ADF/KPSS P99
1	Sacramento	Desemboque	diminuição	0,0471	-0,288	ET
2	Irai de Minas	Irai de Minas	aumento	0,0008	0,341	ED
3	Lassance	Lassance	aumento	0,0471	0,435	ED
4	Bocaina de Minas	Mirantão (Capelinha das Flores)	diminuição	0,0372	-0,260	ET
5	Padre Paraiso	Padre Paraiso	aumento	0,0229	0,562	ET
6	Cordisburgo	Pirapama	diminuição	0,0001	-1,323	ED
7	Cachoeira de Minas	Ponte do Rodrigues	diminuição	0,0244	-0,278	ED
8	Ponte Nova	Ponte Nova Jusante	diminuição	0,0214	-0,564	NE
9	Pratinha	Pratinha	diminuição	0,0291	-0,458	ET
10	Santa Barbara	Santa Barbara	aumento	0,0306	0,539	ET
11	Itaobim	São João Grande	aumento	0,0227	0,495	ED
12	Juiz de Fora	Torreões	aumento	0,0071	0,795	NE

Fonte: A autora (2024).

A Figura 3.4 (a, b, c e d), mostram a distribuição espacial da estacionariedade (a e c) e tendências (b e d), para ambos os percentis para março.

Figura 3.4 – Localização das estações com estacionariedade no P95 (a) e P99 (c), tendências significativas e magnitudes no P95 (b) e P99 (d), presentes na série temporal para os no mês de março.



Fonte: A autora (2024).

Pode-se notar que algumas estações com tendência de aumento nos extremos de precipitação, tanto no percentil 95 (P95) quanto no percentil 99 (P99), estão localizadas no “cinturão” de extremos identificado por (Matsuoka, Ferreira & Rofatto, 2024). Além disso, o número de estações com tendência de aumento superou o número de estações com tendência de diminuição no P95. As estações com comportamentos de não estacionariedade (NE) e estacionariedade diferenciada (ED) não seguem um padrão espacial consistente, nem apresentam regularidade em relação aos outros meses ou entre os percentis, exceto pela estação de Pirapama. Essa falta de padrão reflete a variabilidade dos dados ao longo do tempo e do espaço, sugerindo mudanças nos padrões pluviométricos e nos fenômenos atmosféricos.

A Tabela 3.7 traz as estações que mostraram estacionariedade e tendências para o mês de outubro no P95, que assim como março é um mês de comportamento transicional, entre o período seco e o chuvoso, por isso apresenta uma alta variabilidade nos dados de extremos. Das doze estações com tendências significativas, apenas quatro foram de aumento e oito de diminuição, porém todas as estações com tendência de aumento

possuem comportamento ET, ou seja, apresentam uma tendência significativa em torno da média.

Tabela 3.7 – Estações com tendência e estacionariedade presente na série temporal para o P95 no mês de outubro.

Nº	Município	Estação	MK/MK_m P95	p_Valor P95	Slope P95	ADF/KPSS P95
1	Belo Horizonte	Belo Horizonte (Horto)	aumento	0,035	0,260	ET
2	Campo Florido	Campo Florido	diminuição	0,040	-0,234	ET
3	Candeias	Candeias	aumento	0,044	0,261	ET
4	Grão Mogol	Fazenda Jambeiro Grão Mogol	diminuição	0,010	-0,350	ED
5	Ataléia	Fazenda São Gabriel	aumento	0,007	0,078	ET
6	Itaobim	Itaobim	diminuição	0,032	-0,238	ED
7	Jequitinhonha	Jequitinhonha	diminuição	0,016	-0,272	ED
8	Teófilo Otoni	Mucuri	diminuição	0,026	-0,273	ET
9	Pedras De Maria Da Cruz	Pedras De Maria Da Cruz	diminuição	0,035	-0,289	ED
10	José Raydan	Santa Maria Do Suaçuí	diminuição	0,004	-0,298	ED
11	Santo Antônio Do Amparo	Santo Antônio Do Amparo	aumento	0,047	0,217	ET
12	Mathias Lobato	Vila Matias - Montante	diminuição	0,008	-0,293	ED

Fonte: A autora (2024).

A Tabela 3.8 mostram as estações com estacionariedade e tendências significativas para o mês de outubro no P99. Treze estações mostraram tendências significativas, apenas quatro foram de aumento e nove de diminuição, porém todas as estações com tendência de aumento possuem comportamento ET, ou seja, apresentam uma tendência significativa em torno da média.

Algumas estações se repetem nos percentis 95 e 99, Campo Florido, Fazendo Jambeiro Grão Mogol, Santa Maria do Suaçuí e Vila Matias Montante, com tendência de diminuição se mantendo em ambos. A magnitude para três de delas aumenta em torno de 0,2 mm/mês/ano para cada uma, com exceção da estação Sta. Maria do Suaçuí.

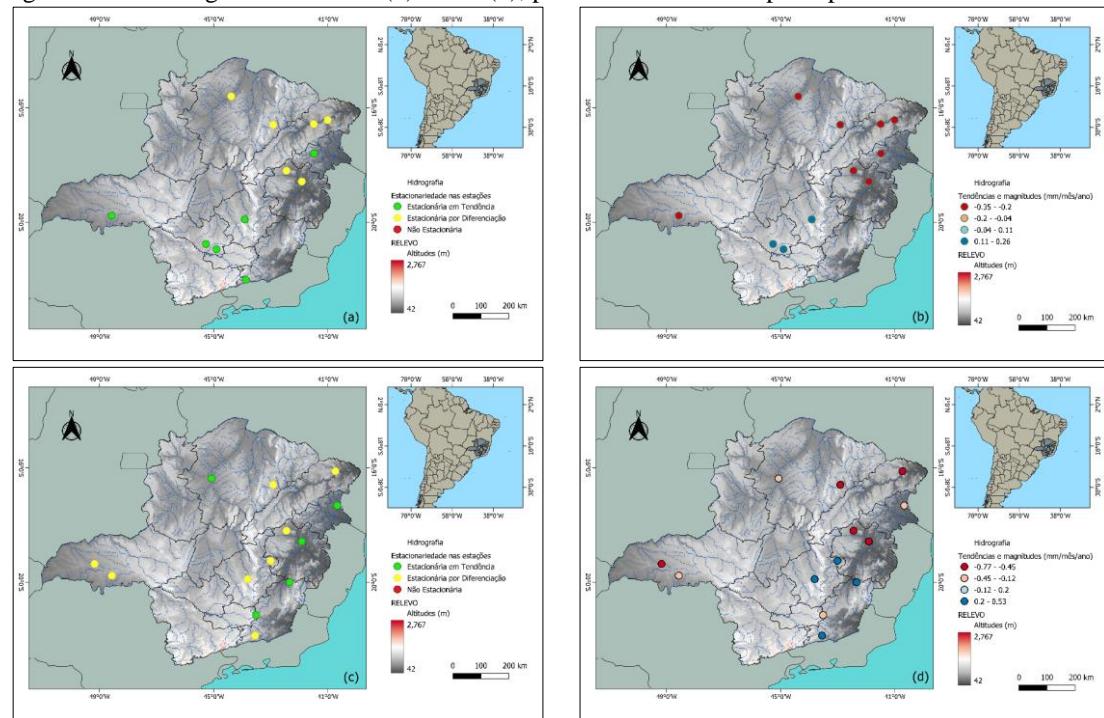
Tabela 3.8 – Estações com tendência e estacionariedade presente na série temporal para o P99 no mês de outubro.

Nº	Município	Estação	MK/MK_m P99	p_Valor P99	Slope P99	ADF/KPSS P99
1	Campo Florido	Campo Florido	diminuição	0,017	-0,435	ED
2	Desterro do Melo	Desterro do Melo	diminuição	0,002	-0,131	ET
3	Prata	Fazenda Buriti do Prata	diminuição	0,045	-0,561	ED
4	Almenara	Fazenda Cajueiro	diminuição	0,020	-0,476	ED
5	Gão Mogol	Fazenda Jambeiro Grão Mogol	diminuição	0,033	-0,509	ED
6	Ferros	Ferros	aumento	0,024	0,429	ED
7	Sabará	Sabará	aumento	0,044	0,267	ED
8	José Raydan	Santa Maria Do Suaçuí	diminuição	0,004	-0,773	ED
9	Umburatiba	São Pedro Do Pampa	diminuição	0,039	-0,431	ET
10	São Romão	São Romão	diminuição	0,006	-0,222	ET
11	Juiz de Fora	Torreões	aumento	0,009	0,526	ED
12	Raul Soares	Vermelho Velho	aumento	0,034	0,441	ET
13	Mathias Lobato	Vila Matias - Montante	diminuição	0,001	-0,477	ET

Fonte: A autora (2024).

A Figura 3.5 (a, b, c e d), mostram a distribuição espacial da estacionariedade (a e c) e tendências (b e d), para ambos os percentis em outubro. A maioria das estações com tendência de diminuição estão localizadas na parte nordeste do estado, no Vale do Rio Doce, Jequitinhonha e Mucuri. A estação Santa Maria do Suaçuí, com a maior diferença de magnitude na diminuição entre os percentis, de quase 0,5 mm/mês/ano. Das estações com tendência de diminuição tanto no P95 quanto no P99, fazem parte da região nordeste do estado, apenas duas delas Campo Florido e Fazenda Buriti do Prata se encontram na região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba; e Desterro de Melo no extremo leste do Campo das Vertentes, em uma área montanhosa.

Figura 3.5 – Localização das estações com estacionariedade no P95 (a) e P99 (c), tendências significativas e magnitudes no P95 (b) e P99 (d), presentes na série temporal para os no mês de outubro.



Fonte: A autora (2024).

A Tabela 3.9 traz as estações com estacionariedade e tendências para o mês de novembro no P95. O número de estações nessas condições aumentou gradativamente, assim como a quantidade de ocorrências de extremos para esse mês. Das quinze estações com estacionariedade e tendência, onze mostraram tendências de aumento nos extremos do P95 e apenas quatro, tendência de diminuição. Nas estações com tendência de aumento, estão aumentando em magnitudes entre 0,336 e 0,473 mm/mês/ano, ou seja, os extremos acima do P95, aumentaram entre 15 a mais de 21 mm em 44 anos. Três delas, Santa Bárbara, Tapira e Torreões, apresentaram comportamento NE, sugerindo também, mudanças no padrão dos extremos pluviométricos no P95.

Tabela 3.9 – Estações com tendência e estacionariedade presente na série temporal para o P95 no mês de novembro.

Nº	Município	Estação	MK/MK_m P95	p_Valor P95	Slope P95	ADF/KPSS P95
1	Baependi	Baependi	diminuição	0,006	-0,341	ET
2	Conselheiro Lafaiete	Conselheiro Lafaiete	aumento	0,002	0,336	ED
3	Divinópolis	Divinópolis	diminuição	0,031	-0,258	ET
4	Entre Rios de Minas	Entre Rios de Minas	aumento	0,008	0,277	ED
5	Prata	Fazenda Buriti do Prata	aumento	0,010	0,315	ED
6	Carlos Chagas	Francisco Sa (EFBM)	aumento	0,036	0,407	ED
7	Guimarânia	Guimarânia	aumento	0,033	0,473	ED
8	Jaboticatubas	Jaboticatubas	diminuição	0,027	-0,500	ET
9	Rio Pardo de Minas	Rio Pardo de Minas	aumento	0,022	0,363	ED
10	Santa Barbara	Santa Barbara	aumento	0,000	0,518	NE
11	Santa Juliana	Santa Juliana	aumento	0,049	0,258	ET
12	Montes Claros	São Joao da Vereda	diminuição	0,011	-0,436	ET
13	Simão Pereira	Sobraji	aumento	0,010	0,262	ET
14	Tapira	Tapira	aumento	0,025	0,437	NE
15	Juiz de Fora	Torreões	aumento	0,034	0,475	NE

Fonte: A autora (2024).

A Tabela 3.10 mostra as estações com estacionariedade e tendências para o mês de novembro no P99. Das dezoito estações dez mostraram tendência de aumento no P99, sendo que Conselheiro Lafaiete aparece novamente entre elas, reforçando a constância na tendência, porém agora ela se torna NE, o que pode sugerir que houve alterações no padrão pluviométrico dessa estação no P99 ao longo dos anos.

A estação Fazendo Buriti do Prata chama a atenção, pois para o mês de outubro mostrou tendência de diminuição no P99 e em novembro o comportamento foi de aumento em ambos os percentis, o que pode mostrar uma mudança no comportamento pluviométrico da região (central do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba).

As tendências opostas, para essa estação, entre outubro e novembro, com diminuição no P99 em outubro e aumento em ambos os percentis (P95 e P99) em novembro, pode ser explicada por uma série de fatores climáticos e dinâmicos locais, por exemplo, as alterações climáticas globais podem estar alterando os padrões pluviométricos, especialmente em relação à frequência e intensidade de eventos extremos; a variabilidade interanual pode estar refletida no comportamento dos extremos pluviométricos; padrões atmosféricos globais como El Niño ou La Niña, também podem afetar os padrões de chuva localmente, influenciando as mudanças nas tendências de um

mês para o outro; variação sazonal, outubro e novembro estão próximos do início da estação chuvosa em muitas regiões de Minas Gerais, e é possível que as condições climáticas estejam mudando drasticamente entre esses meses.

Tabela 3.10 – Estações com tendência e estacionariedade presente na série temporal para o P99 no mês de novembro.

No	Município	Estação	MK/MK_m P99	p_valor P99	Slope P99	ADF/KPSS P99
1	Ataleia	Ataleia	aumento	0,038	0,603	ET
2	Buritizeiro	Cachoeira do Paredão	aumento	0,031	0,535	ED
3	Carlos Chagas	Carlos Chagas	aumento	0,003	0,596	ED
4	Conselheiro Lafaiete	Conselheiro Lafaiete	aumento	0,000	0,476	NE
5	Prata	Fazenda Buriti do Prata	aumento	0,010	0,563	ED
6	Itamogi	Fazenda Carvalhais	diminuição	0,025	-0,412	ED
7	Irai De Minas	Irai De Minas	aumento	0,028	0,405	ET
8	Rio Novo	Piau	diminuição	0,040	-0,384	ET
9	Cordisburgo	Pirapama	diminuição	0,001	-1,103	ED
10	Brasilândia de Minas	Porto da Extrema	diminuição	0,003	-0,343	ET
11	Santa Bárbara	Santa Bárbara	aumento	0,000	0,973	NE
12	Santa Juliana	Santa Juliana	aumento	0,000	0,170	ET
13	São Gonçalo Do Abaeté	São Gonçalo Do Abaete	diminuição	0,034	-0,462	ED
14	Montes Claros	São João Da Vereda	diminuição	0,028	-0,577	ET
15	Tapira	Tapira	aumento	0,037	0,593	ED
16	Juiz de Fora	Torreões	aumento	0,004	0,739	NE
17	Santana do Riacho	Vau Da Lagoa	diminuição	0,031	-0,465	ED
18	Vespasiano	Vespasiano	diminuição	0,045	-0,438	ET

Fonte: A autora (2024).

As chuvas intensas e os fenômenos associados ocorrem em diferentes meses ao longo do ano em Minas Gerais, com algumas características específicas, o verão (novembro a março), é marcado por chuvas convectivas, que são comuns devido ao calor e à umidade elevada. Durante esses meses, a ocorrência de chuvas intensas é mais frequente, especialmente nas regiões leste e noroeste, influenciadas pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), (Silva, Reboita & Rocha, 2014; Mello & Viola, 2013).

Novembro pode marcar um período de intensificação das chuvas devido à maior disponibilidade de umidade e mudanças nos padrões de circulação atmosférica; fatores como frentes frias, zonas de convergência do Atlântico Sul (ZCAS), ou sistemas de baixa pressão podem ter maior influência em novembro, trazendo chuvas mais intensas,

enquanto outubro pode ter sido um mês relativamente mais seco, ou com eventos de chuva mais dispersos.

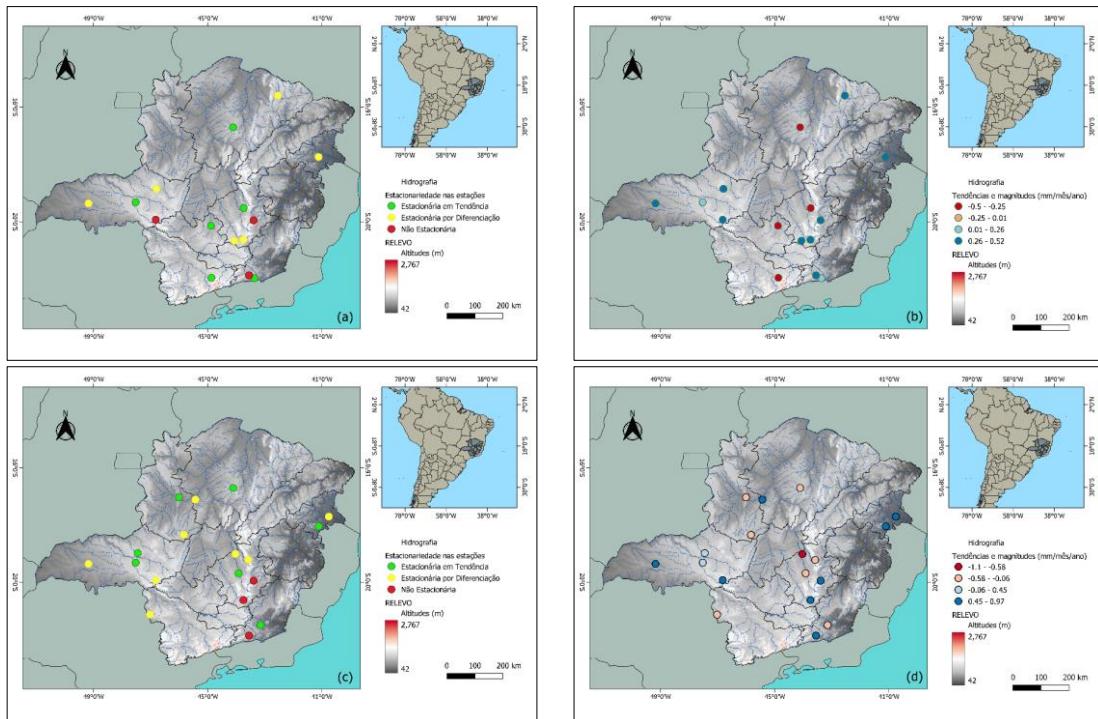
A Figura 3.6 (a, b, c e d), mostra a localização das estações identificadas com estacionariedade (a e c) e tendência significativa (b e d), para os P95 e 99 respectivamente. A localização das estações com tendência de aumento se dispersaram pelo estado, como é possível observar, mas ainda se concentram na região sul e sudoeste. Dentre as estações com tendência de diminuição, Pirapama mantém a sua consistência.

Na região do Triângulo Mineiro e sul do estado, as frentes frias desempenham um papel fundamental no regime climático, especialmente no que diz respeito à distribuição das chuvas e à queda de temperatura. Essa é uma região de transição entre o clima tropical e o clima subtropical, o que a torna suscetível à influência das frentes frias que se formam no sul do Brasil, (Nogueira, Machado & Reboita, 2024).

As áreas mais ao sudoeste do Triângulo Mineiro, região onde se encontra a estação Fazenda Buriti do Prata, geralmente recebem uma influência mais direta das frentes frias. Nessa região, a chegada de uma frente fria tende a causar uma mudança mais abrupta no clima, com queda de temperatura e chuvas mais intensas no verão. Quando uma frente fria interage com o ar quente e úmido característico do verão, ela pode gerar tempestades severas, com possibilidade de granizo, raios e ventos fortes. Essas tempestades costumam ser rápidas, mas podem causar danos à agricultura e à infraestrutura da região, (YNOUE et al., 2017).

O Triângulo Mineiro tem um período de seca bastante definido, que vai de maio a setembro, com pouca ou nenhuma chuva. As primeiras frentes frias do final de setembro e início de outubro marcam o início da transição para a estação chuvosa. Essa transição é gradual, com as frentes frias trazendo chuvas intermitentes até que o padrão de chuvas se estabeleça completamente em novembro, o que pode explicar a mudança também na tendência entre o mês de outubro e novembro, sugerindo um atraso na chegada das frentes frias que ao estado em outubro, mas uma intensidade maior após o estabelecimento da estação chuvosa em novembro.

Figura 3.6 – Localização das estações com estacionariedade no P95 (a) e P99 (c), tendências significativas e magnitudes no P95 (b) e P99 (d), presentes na série temporal para os no mês de novembro.



Fonte: A autora (2024).

Na Tabela 3.11 tem-se as estações que mostraram estacionariedade e tendências significativas no P95 para o mês de dezembro. Das quatorze estações, sete mostraram tendência de aumento. Desemboque que em fevereiro mostrou diminuição na tendência, em março mostrou diminuição e agora mostra aumento, reforçando a questão da variabilidade climática e da influência da chegada dos sistemas atmosféricos nos meses de transição (fevereiro e março) e de seus estabelecimentos nos meses de novembro e dezembro. Campo Florido, Torreões e Pirapama mantiveram os padrões de diminuição, sendo que Torreões mantém o padrão NE, reforçando a ideia da mudança de padrões do regime de extremos pluviométricos.

Tabela 3.11 – Estações com tendência e estacionariedade presente na série temporal para o P95 no mês de dezembro.

No	Município	Estação	MK/MK_m P95	p_valor P95	Slope P95	ADF/KPSS P95
1	Campo Florido	Campo Florido	diminuição	0,049	-0,224	ET
2	Lima Duarte	Conceição do Ibitipoca	aumento	0,043	0,267	ET
3	Sacramento	Desemboque	aumento	0,049	0,244	ED
4	Ferros	Ferros	aumento	0,003	0,185	ET
5	Guimarânia	Guimarânia	aumento	0,035	0,646	ET
6	Irai de Minas	Irai de Minas	aumento	0,013	0,324	ED
7	Itanhandu	Itanhandu	diminuição	0,044	-0,347	ET
8	Rio Novo	Piau	diminuição	0,025	-0,317	ED
9	Cordisburgo	Pirapama	diminuição	0,000	-0,782	ED
10	Cachoeira de Minas	Ponte do Rodrigues	diminuição	0,027	-0,296	ED
11	Pouso Alto	Pouso Alto	diminuição	0,028	-0,311	NE
12	Santa Barbara	Santa Barbara	aumento	0,000	0,449	ED
13	Juiz de Fora	Torreões	aumento	0,042	0,308	NE
14	Fortaleza de Minas	Usina Santana	diminuição	0,017	-0,246	ET

Fonte: A autora (2024).

A Tabela 3.12 mostra as estações com estacionariedade e tendências significativas no P99 para o mês de dezembro. Das vinte e uma estações com tendência significativa, quatorze mostram aumento e apenas sete diminuições. Pirapama, Ponte do Rodrigues, entre outras, mantiveram suas tendências de diminuição, enquanto Conselheiro Lafaiete, Desemboque, Fazenda Buriti do Prata e Torreões, mantiveram o padrão de aumento dos extremos pluviométricos no P99. As estações Canoeiros e Ponte do Rodrigues, que apresentam comportamento NE, devem ser melhor analisadas, por sugerirem mudanças de padrões ao longo da série.

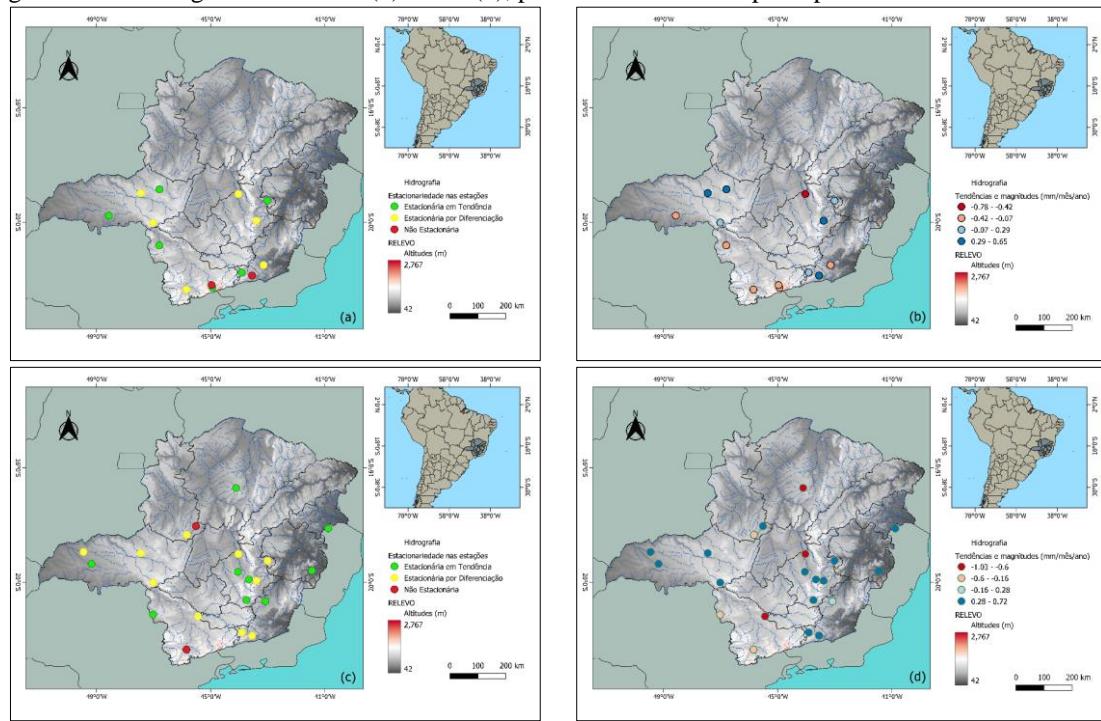
Tabela 3.12 – Estações com tendência e estacionariedade presente na série temporal para o P99 no mês de dezembro.

No	Município	Estação	MK/MK_m P99	p_valor P99	Slope P99	ADF/KPSS P99
1	Pocrane	Assaraí - Montante	aumento	0,047	0,382	ET
2	Caeté	Caeté	aumento	0,000	0,397	ET
3	São Gonçalo do Abaeté	Canoeiros	aumento	0,045	0,426	NE
4	Lima Duarte	Conceição do Ibitipoca	aumento	0,010	0,371	ED
5	Conselheiro Lafaiete	Conselheiro Lafaiete	aumento	0,041	0,281	ET
6	Coqueiral	Coqueiral	diminuição	0,023	-0,621	ED
7	Sacramento	Desemboque	aumento	0,002	0,647	ED
8	Prata	Fazenda Buriti do Prata	aumento	0,007	0,529	ET
9	Itamogi	Fazenda Carvalhais	diminuição	0,036	-0,337	ET
10	Ataléia	Fazenda São Mateus	aumento	0,042	0,417	ET
11	Ferros	Ferros	aumento	0,012	0,508	ED
12	Irai de Minas	Irai de Minas	aumento	0,012	0,574	ED
13	Ituiutaba	Ituiutaba	aumento	0,013	0,622	ED
14	Pedro Leopoldo	Pedro Leopoldo	aumento	0,020	0,383	ET
15	Cordisburgo	Pirapama	diminuição	0,000	-1,034	ED
16	Cachoeira de Minas	Ponte do Rodrigues	diminuição	0,044	-0,368	NE
17	Presidente Olegário	Porto Firme	aumento	0,029	0,271	ET
18	Santa Barbara	Santa Barbara	diminuição	0,045	0,471	ED
19	São Gonçalo do Abaeté	São Gonçalo do Abaete	diminuição	0,017	-0,441	ED
20	Montes Claros	São João da Vereda	diminuição	0,006	-0,766	ET
21	Juiz de Fora	Torreões	aumento	0,004	0,717	ED

Fonte: A autora (2024).

Na Figura 3.7 (a, b, c e d), estão as localizações das estações identificadas com estacionariedade (a e c) e tendência significativa (b e d), para os P95 e 99 respectivamente. No mês de dezembro o período chuvoso já está instalado e se mostra consistente, as estações com tendências de aumentos no P99 estão concentradas na região Sul e Sudoeste do estado, onde as chuvas mais extremas mostram sinais de intensificação e aumento, o que deve ser levado em consideração para tomadas de decisão para prevenção e mitigação dos impactos que podem ser gerados, principalmente no que concerne áreas urbanas e agricultura.

Figura 3.7 – Localização das estações com estacionariedade no P95 (a) e P99 (c), tendências significativas e magnitudes no P95 (b) e P99 (d), presentes na série temporal para os no mês de dezembro.



Fonte: A autora (2024).

A Tabela 3.12 apresentada mostra a análise da tendência de diminuição do percentil 95 de precipitação nas estações meteorológicas que se mostraram consistentes em mais de um mês. A análise abrange as estações Guarani, Pedro Versiani (EFBM), Pirapama, e Ponte do Rodrigues, detalhando os meses em que foi observada uma tendência decrescente significativa nos dados de precipitação.

Tabela 3.12 – Estações com tendência de diminuição dos extremos pluviométricos no P95 com persistência em diferentes meses da série temporal.

Estação	Long	Lat	Tendência P95	Taxa de Variação P95 (mm/ano)	Mês
GUARANI	-43,050	-21,355	diminuição	-0,480	Jan
GUARANI	-43,050	-21,355	diminuição	-2,99E-01	Fev
PEDRO VERSIANI (EFBM)	-41,314	-17,880	diminuição	-0,712	Jan
PEDRO VERSIANI (EFBM)	-41,314	-17,880	diminuição	-4,17E-01	Fev
PIRAPAMA	-44,036	-19,013	diminuição	-1,264	Jan
PIRAPAMA	-44,036	-19,013	diminuição	-0,861	Mar
PIRAPAMA	-44,036	-19,013	diminuição	-0,782	Dez
PONTE DO RODRIGUES	-45,853	-22,354	diminuição	-0,256	Mar
PONTE DO RODRIGUES	-45,853	-22,354	diminuição	-0,296	Dez

Fonte: A autora (2024).

A estação Guarani apresentou uma tendência de diminuição no percentil 95 de precipitação nos meses de janeiro e fevereiro. Isso indica que, para esses meses, houve uma redução progressiva dos valores extremos de precipitação ao longo do período analisado, com uma taxa de variação de -0,480 mm/ano em janeiro e -0,299 mm/ano em fevereiro. Essa tendência pode sinalizar uma possível mudança climática que afeta os meses do período chuvoso na região.

De forma semelhante à estação Guarani, Pedro Versiani (EFBM) também demonstraram uma tendência de diminuição nos mesmos meses de janeiro e fevereiro. A estação mostrou uma taxa de variação mais acentuada, com -0,712 mm/ano em janeiro e -0,417 mm/ano em fevereiro. Esses dados sugerem uma redução contínua na intensidade dos eventos de precipitação extrema no início do ano.

A estação Pirapama, cerca de 300 km da estação Pedro Versiani, mas ainda localizada na região nordeste do estado, destaca-se por apresentar uma tendência de diminuição ao longo de três meses distintos: janeiro, março e dezembro. Em janeiro, a taxa de variação foi de -1,264 mm/ano, a maior entre todas as estações analisadas, enquanto em março e dezembro, as taxas foram de -0,861 mm/ano e -0,782 mm/ano, respectivamente. Esses resultados sugerem que Pirapama tem experimentado uma redução consistente nos eventos extremos de precipitação ao longo de diferentes períodos do ano, abrangendo tanto o início quanto o final da estação chuvosa.

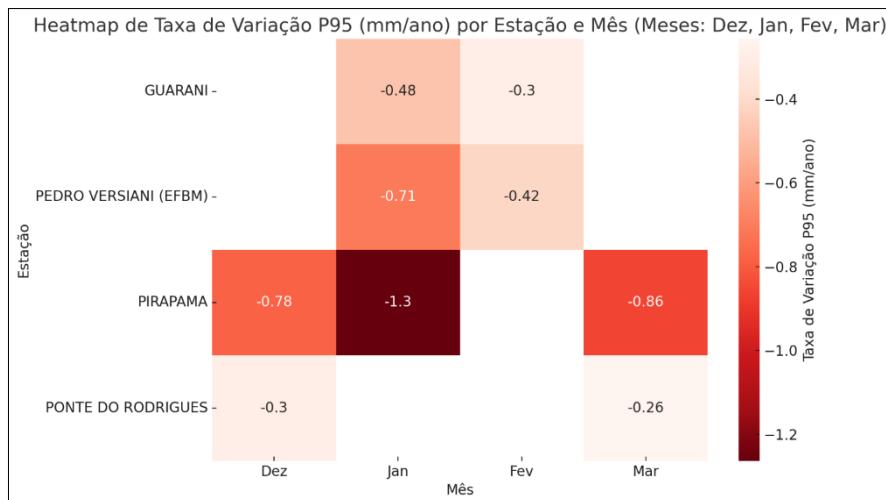
Para esta estação Ponte do Rodrigues, foi observada uma tendência de diminuição nos meses de março e dezembro, com taxas de variação de -0,256 mm/ano e -0,296 mm/ano, respectivamente, bem menores que nas anteriores. Embora as variações observadas sejam menores em comparação com as outras estações, a consistência nos dois meses indica uma possível redução nos eventos extremos de precipitação, especialmente nos períodos de transição entre estações seca e chuvosa.

De modo geral, a análise revela uma tendência de diminuição dos eventos extremos de precipitação em várias estações do estado de Minas Gerais, especialmente nos meses de janeiro e fevereiro. A estação Pirapama merece destaque, pois apresentou essa tendência em três meses diferentes, o que pode indicar um padrão mais amplo de redução de extremos ao longo da série. Esses resultados são importantes para entender as possíveis mudanças no regime pluviométrico da região e para subsidiar estratégias de adaptação às mudanças climáticas.

O *heatmap* da Figura 4.8 apresenta as taxas de variação de diminuição do percentil 95 de precipitação para quatro estações meteorológicas consistentes ao longo dos meses

de dezembro, janeiro, fevereiro e março. A cor vermelha mais intensa indica uma maior taxa de diminuição da precipitação extrema, enquanto tons mais claros indicam uma diminuição menos acentuada. Essa visualização facilita a comparação entre as estações e a intensidade da redução das chuvas extremas ao longo dos meses analisados.

Figura 3.8 - *Heatmap* das taxas de variação de diminuição no P95 para as estações consistentes em diferentes meses.



Fonte: A autora (2024)

A Tabela 3.14 mostra a análise da tendência de aumento para as estações Santa Barbara e Desemboque, as quais mostraram consistência, aparecendo em diferentes meses da estação chuvosa com tendência de aumento no percentil 95 de precipitação.

Tabela 3.14 – Estações com tendência de aumento dos extremos pluviométricos no P95 com persistência em diferentes meses da série temporal.

Estação	Long	Lat	Tendência P95	Taxa de Variação P95 (mm/ano)	Mês
SANTA BARBARA	-43,401	-19,945	aumento	4,42E-01	Fev
SANTA BARBARA	-43,401	-19,945	aumento	0,361	Mar
SANTA BARBARA	-43,401	-19,945	aumento	0,518	Nov
SANTA BARBARA	-43,401	-19,945	aumento	0,449	Dez
DESEMBOQUE	-47,019	-20,013	aumento	2,04E-01	Fev
DESEMBOQUE	-47,019	-20,013	aumento	0,244	Dez

Fonte: A autora (2024)

Para a estação Santa Barbara em fevereiro a taxa de variação do P95 é 0,442 mm/ano, indicando um aumento relativamente significativo da precipitação extrema neste mês. Fevereiro geralmente está associado ao final do período chuvoso, e um aumento nesse período pode resultar em mais eventos de chuvas intensas, o que pode ser um indicativo de mudanças sazonais na intensidade das chuvas. Em março a variação é de

0,361 mm/ano, um valor um pouco mais baixo do que em fevereiro, mas ainda indicando uma tendência crescente na precipitação extrema. Isso sugere que os eventos de chuva forte estão se intensificando em uma época que, em condições normais, já deveria estar com menores índices pluviométricos. A variação para novembro é de 0,518 mm/ano, um dos valores mais altos, mostrando um aumento acentuado no início da estação chuvosa. Isso pode implicar em mais chuvas intensas em um período crucial para a agricultura e controle de inundações. A variação de 0,449 mm/ano, em dezembro, também reforça a tendência de aumento no final do ano, mostrando que o período de chuvas está se intensificando de forma significativa.

A estação Santa Barbara apresenta um aumento consistente nos meses chaves da estação chuvosa. Podendo ser um indicativo de mudanças climáticas regionais, onde as chuvas intensas estão se tornando mais frequentes e intensas, possivelmente levando a mais enchentes ou danos em áreas vulneráveis. Esses aumentos podem pressionar a infraestrutura urbana e agrícola, além de afetar o manejo de recursos hídricos.

Para a estação Desemboque, a variação em fevereiro é de 0,204 mm/ano, um valor mais moderado, mas ainda assim indicando um aumento. Essa intensificação pode impactar áreas suscetíveis a inundações ou erosão do solo no final do ciclo chuvoso. A variação para dezembro é de 0,244 mm/ano, similar à de fevereiro, sugerindo um aumento das precipitações extremas no final do ano. Dezembro marca o período em que a estação chuvosa está consolidada, e essa mudança pode resultar em eventos de chuvas mais intensas, afetando o início do período agrícola e a gestão de água.

Embora os aumentos em Desemboque sejam mais moderados em comparação com Santa Barbara, ainda assim representam uma intensificação relevante das precipitações extremas. O aumento em fevereiro e dezembro pode significar um início de estação chuvosa mais intenso e um prolongamento das chuvas no começo do ano.

Ambas as estações mostram um claro aumento nas taxas de precipitação extrema (P95), o que pode ser um sinal de mudanças nos padrões climáticos regionais. Isso pode ter implicações sérias para a gestão de desastres naturais, como enchentes e deslizamentos de terra, especialmente em áreas vulneráveis.

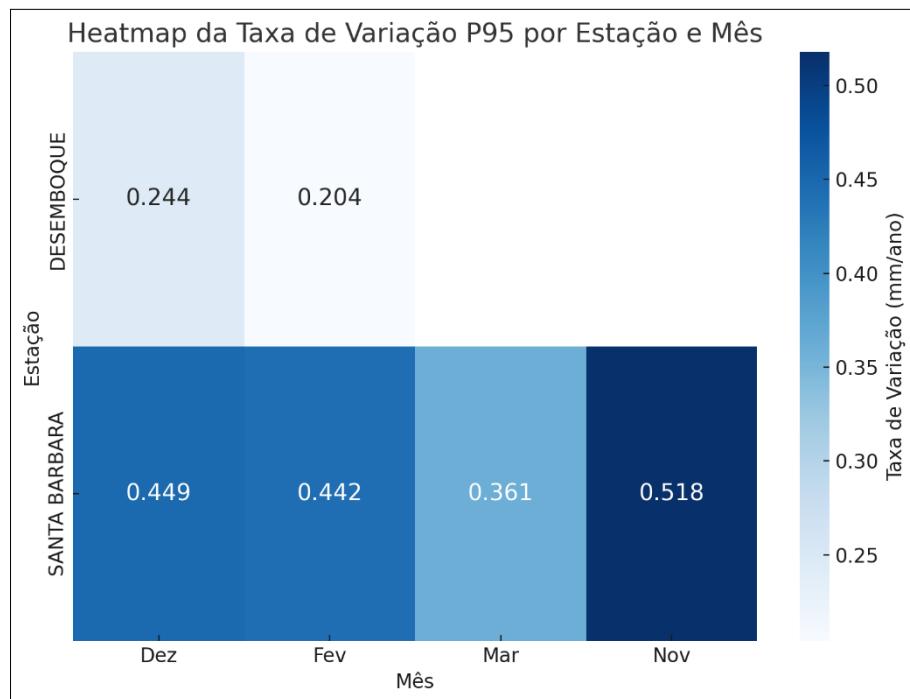
O aumento nas precipitações extremas pode impactar a disponibilidade e a gestão dos recursos hídricos, principalmente em bacias hidrográficas que já enfrentam pressões de uso. Isso pode levar a eventos extremos de cheia e períodos secos mais intensos, exigindo uma adaptação dos sistemas de manejo de água. Setores como a agricultura e a infraestrutura urbana podem sofrer com o aumento das chuvas intensas, gerando prejuízos

econômicos, especialmente em regiões que dependem da estabilidade climática para suas atividades. Essas mudanças podem ser indicativas de padrões climáticos alterados, com potencial para impactar de maneira significativa tanto o ambiente quanto as atividades econômicas e sociais na região.

É importante salientar que as estações em questão estão em regiões opostas do estado, Santa Bárbara está na região da BH do Vale do Rio Doce, sudoeste do estado e Desemboque, na BH do Paranaíba, oeste do estado, destacando a variabilidade espacial e a influência de fatores como topografia, uso e cobertura do solo e a influência na circulação atmosférica regional.

A Figura 3.9 apresenta um mapa de calor (*heatmap*) que ilustra a taxa de variação de aumento da precipitação extrema (P95) em milímetros por ano, distribuída pelas estações pluviométricas Santa Bárbara e Desemboque nos meses de fevereiro, março, novembro e dezembro. As cores variam em tons de azul, onde áreas mais escuras indicam taxas de variação mais elevadas, enquanto áreas mais claras representam taxas menores.

Figura 3.9 - *Heatmap* das taxas de variação de aumento no P95 para as estações consistentes em diferentes meses.



Fonte: A autora (2024)

A Tabela 3.15 mostra a análise da taxa da tendência diminuição para as estações, as quais mostraram consistência, aparecendo em diferentes meses da estação chuvosa no percentil 99 de precipitação.

Os dados mostram as estações pluviométricas que mostraram tendência de diminuição significativa nos valores extremos de precipitação (P99) em mais de um mês da série. A análise sugere que essas reduções podem ser atribuídas às mudanças climáticas ou variações nos padrões atmosféricos que afetam a região.

Tabela 3.15 – Estações com tendência de diminuição dos extremos pluviométricos no P99 com persistência em diferentes meses da série temporal.

Estação	Long	Lat	Tendência P99	Taxa de Variação P99	Mês
PEDRO VERSIANI (EFBM)	-41,314	-17,880	diminuição	-1,100	Jan
PEDRO VERSIANI (EFBM)	-41,314	-17,880	diminuição	-0,663	Fev
PIRAPAMA	-44,036	-19,013	diminuição	-1,498	Jan
PIRAPAMA	-44,036	-19,013	diminuição	-0,717	Fev
PIRAPAMA	-44,036	-19,013	diminuição	-1,323	Mar
PIRAPAMA	-44,036	-19,013	diminuição	-1,103	Nov
PIRAPAMA	-44,036	-19,013	diminuição	-1,034	Dez
PONTE DO RODRIGUES	-45,853	-22,354	diminuição	-0,278	Fev
PONTE DO RODRIGUES	-45,853	-22,354	diminuição	-0,567	Mar
PONTE DO RODRIGUES	-45,853	-22,354	diminuição	-0,368	Dez
PRATINHA	-46,411	-19,751	diminuição	-0,431	Jan
PRATINHA	-46,411	-19,751	diminuição	-0,4580	Mar
FAZ. JAMBEIRO - GRAO MOGOL	-42,918	-16,591	diminuição	-0,608	Jan
FAZ. JAMBEIRO - GRAO MOGOL	-42,918	-16,591	diminuição	-0,509	Out
SAO GONCALO DO ABAETE	-45,836	-18,343	diminuição	-0,585	Jan
SAO GONCALO DO ABAETE	-45,836	-18,343	diminuição	-0,462	Nov
SAO GONCALO DO ABAETE	-45,836	-18,343	diminuição	-0,441	Dez
VAU DA LAGOA	-43,588	-19,218	diminuição	-0,464	Jan
VAU DA LAGOA	-43,588	-19,218	diminuição	-0,465	Nov
FAZENDA CARVALHAIS	-47,021	-21,133	diminuição	-0,412	Nov
FAZENDA CARVALHAIS	-47,021	-21,133	diminuição	-0,337	Dez
SAO JOAO DA VEREDA	-44,117	-16,702	diminuição	-0,577	Nov
SAO JOAO DA VEREDA	-44,117	-16,702	diminuição	-0,766	Dez

Fonte: A autora (2024).

Na estação Pedro Versiani (EFBM), observa-se uma queda significativa nos extremos de precipitação, com destaque para o mês de janeiro, que apresenta uma redução de -1,100 mm/ano, e fevereiro, com -0,663 mm/ano. Isso sugere que os eventos extremos de chuva estão se tornando menos frequentes ou menos intensos nesses meses.

Na estação Pirapama, a diminuição dos extremos de precipitação é bastante acentuada ao longo de todos os meses analisados, com uma redução significativa de -1,498 mm/ano em janeiro e -1,323 mm/ano em março. Essa estação destaca-se por apresentar quedas consistentes nos extremos ao longo de janeiro, fevereiro, março,

novembro e dezembro, sugerindo uma mudança clara no comportamento da precipitação extrema durante quase todo o ano hidrológico.

Em Ponte do Rodrigues, a diminuição nos eventos extremos é mais moderada, com uma redução de $-0,567$ mm/ano em março e quedas menores em fevereiro e dezembro. A estação Pratinha apresenta uma tendência semelhante, com uma redução moderada de $-0,431$ mm/ano em janeiro e $-0,458$ mm/ano em março.

Na estação Fazenda Jambeiro (Grão Mogol), janeiro apresenta uma redução significativa de $-0,608$ mm/ano, enquanto em outubro a queda é de $-0,509$ mm/ano. Da mesma forma, a estação São Gonçalo do Abaeté experimenta quedas nos meses de janeiro ($-0,585$ mm/ano), novembro ($-0,462$ mm/ano) e dezembro ($-0,441$ mm/ano), o que pode indicar uma redução consistente dos extremos de precipitação ao longo do ano hidrológico.

A estação Vau da Lagoa também apresenta uma diminuição moderada nos extremos de precipitação em janeiro e novembro, com valores próximos de $-0,464$ mm/ano para ambos os meses. Já a Fazenda Carvalhais mostra uma redução mais pronunciada em novembro ($-0,412$ mm/ano) e uma leve diminuição em dezembro ($-0,337$ mm/ano).

Por fim, a estação São João da Vereda destaca-se por uma diminuição acentuada em dezembro, com uma taxa de $-0,766$ mm/ano, enquanto em novembro a redução é de $-0,577$ mm/ano.

A análise revela uma tendência clara de diminuição dos extremos de precipitação consistentes nas estações em questão. As maiores quedas ocorrem nas estações Pirapama e Pedro Versiani (EFBM), especialmente nos meses de janeiro e março, sugerindo uma mudança significativa nos padrões atmosféricos que causam os eventos mais intensos de chuva nessas regiões.

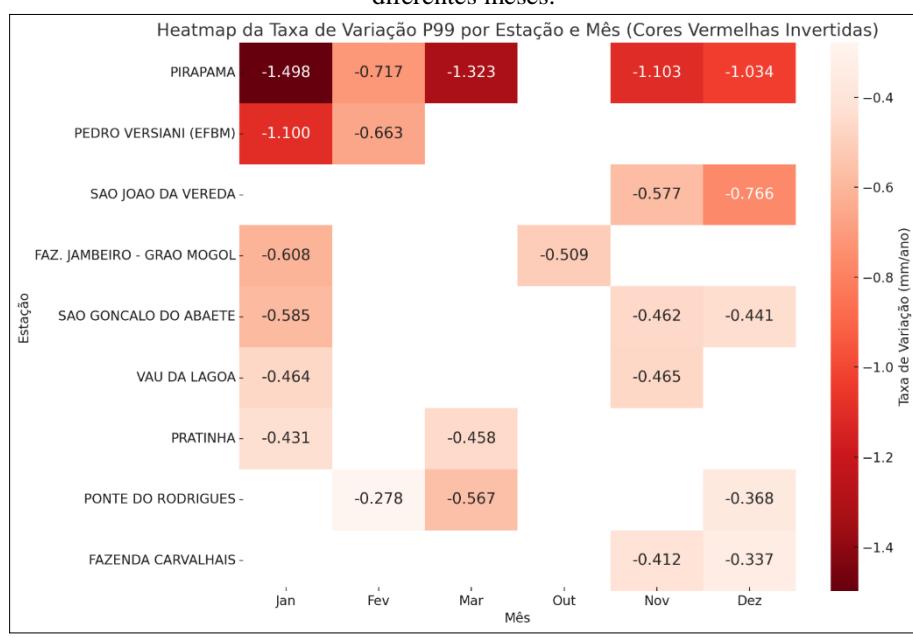
Além disso, a diminuição dos extremos de precipitação nos meses de novembro e dezembro em várias estações pode indicar uma mudança no regime pluviométrico durante o final do ano, o que pode ter implicações importantes para setores como a agricultura e o gerenciamento de recursos hídricos.

Em suma, as análises indicam que os eventos de precipitação extrema estão se tornando menos frequentes e menos intensos em grande parte de Minas Gerais, pois as estações estão localizadas em diferentes regiões hidrográficas, com variações significativas entre diferentes meses e localidades. No entanto, uma análise mais profunda

é necessária para determinar as causas exatas dessas mudanças e suas implicações a longo prazo.

A Figura 3.10 apresentada abaixo é um mapa de calor (*heatmap*) que ilustra a taxa de variação de diminuição dos extremos de precipitação (P99) em mm/ano, distribuída por diferentes estações pluviométricas de Minas Gerais ao longo dos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro. As cores variam em tons de vermelho, onde os valores mais escuros indicam maiores diminuições nos extremos de precipitação, e os valores mais claros representam menores reduções.

Figura 3.10 - *Heatmap* das taxas de variação de diminuição no P99 para as estações consistentes em diferentes meses.



Fonte: A autora (2024).

Os dados apresentados na Tabela 3.16 revelam a tendência de aumento nos valores extremos de precipitação (P99) nas estações pluviométricas que apresentaram repetições em mais de um mês.

A estação Conselheiro Lafaiete apresenta uma tendência de aumento dos extremos de precipitação em três dos seis meses analisados nessa pesquisa, com destaque para novembro, que tem uma taxa de variação de 0,476 mm/ano. Embora moderado, esse aumento indica uma intensificação dos eventos de chuva extrema, o que pode representar um risco crescente para a infraestrutura urbana e agrícola da região. Já em Ituiutaba, as taxas de variação são ainda mais altas, especialmente em fevereiro (0,694 mm/ano) e dezembro (0,622 mm/ano). Essas variações significam que os eventos de precipitação extrema estão aumentando rapidamente, o que eleva o risco de inundações e erosão do

solo, tanto em áreas urbanas quanto rurais. A intensificação das chuvas nesses meses chuvosos exige um planejamento adequado de drenagem e medidas de mitigação de desastres.

Tabela 3.16 – Estações com tendência de aumento dos extremos pluviométricos no P99 com persistência em diferentes meses da série temporal.

Estação	Long	Lat	Tendência P99	Taxa de Variação P99	Mês
CONSELHEIRO LAFAIETE	-43,753	-20,625	aumento	0,351	Fev
CONSELHEIRO LAFAIETE	-43,753	-20,625	aumento	0,476	Nov
CONSELHEIRO LAFAIETE	-43,753	-20,625	aumento	0,281	Dez
ITUIUTABA	-49,463	-18,941	aumento	0,694	Fev
ITUIUTABA	-49,463	-18,941	aumento	0,622	Dez
SANTA BARBARA	-43,401	-19,945	aumento	0,880	Fev
SANTA BARBARA	-43,401	-19,945	aumento	0,539	Mar
SANTA BARBARA	-43,401	-19,945	aumento	0,973	Nov
SANTA BARBARA	-43,401	-19,945	aumento	0,471	Dez
TORREOES	-43,555	-21,869	aumento	0,795	Mar
TORREOES	-43,555	-21,869	aumento	0,739	Nov
TORREOES	-43,555	-21,869	aumento	0,717	Dez

Fonte: A autora (2024).

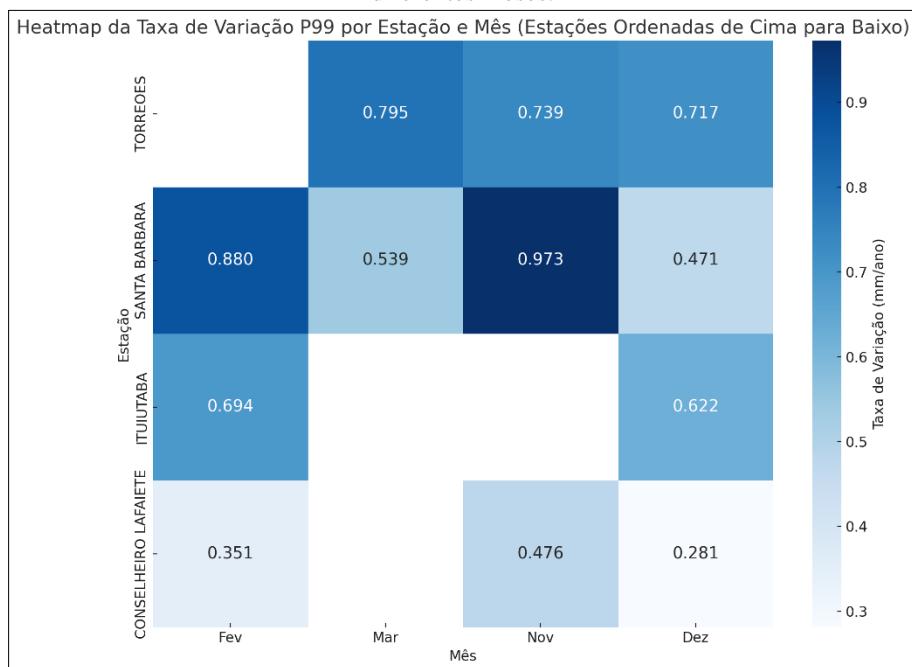
A estação Santa Bárbara é a que apresenta as maiores taxas de variação de precipitação extrema com persistência em quatro dos seis meses analisados, especialmente em novembro (0,973 mm/ano) e fevereiro (0,880 mm/ano). Esse aumento significativo pode estar associado a mudanças nos padrões climáticos, levando a eventos de precipitação mais intensos e concentrados. Isso pode agravar o risco de deslizamentos de terra e inundações rápidas, especialmente em áreas montanhosas, como é o caso da localização dessa estação. De maneira semelhante, a estação Torreões também mostra um aumento considerável nos extremos de precipitação, com destaque para março (0,795 mm/ano) e novembro (0,739 mm/ano). Esses aumentos refletem a intensificação dos períodos chuvosos, o que pode impactar diretamente atividades como a agricultura e aumentar o risco de danos à infraestrutura local.

De modo geral, todas as estações analisadas mostram um aumento nos eventos de precipitação extrema, com destaque para os meses de fevereiro, novembro e dezembro. O fato de várias estações apresentarem um crescimento acentuado no mês de novembro pode indicar uma mudança nos padrões sazonais de precipitação, com intensificação das chuvas no período pré-verão. Essa tendência de aumento tem implicações importantes para o planejamento regional, especialmente em áreas suscetíveis a desastres naturais. A

intensificação desses eventos pode levar a um aumento de inundações, deslizamentos de terra e outros impactos climáticos adversos, exigindo uma revisão nas estratégias de manejo de recursos hídricos, planejamento urbano e mitigação de riscos ambientais.

A Figura 3.11 apresentada abaixo mostra a taxa de variação de aumento dos extremos de precipitação (P99) em mm/ano para diferentes estações pluviométricas que se mostraram persistentes no estado de Minas Gerais, distribuídas pelos meses de fevereiro, março, novembro e dezembro.

Figura 3.11 - *Heatmap* das taxas de variação de aumento no P99 para as estações consistentes em diferentes meses.



Fonte: A autora (2024).

3.4 CONCLUSÕES

As análises conduzidas no presente capítulo demonstraram a complexidade e a variabilidade dos extremos pluviométricos em Minas Gerais ao longo dos 44 anos de dados analisados. O emprego dos testes de estacionariedade (ADF e KPSS) em conjunto com os testes de tendência (Mann-Kendall e Mann-Kendall Modificado) permitiu identificar comportamentos distintos das séries temporais de precipitação em diferentes regiões do estado e para os percentis 95 e 99.

Foi possível observar que a algumas das séries temporais apresentaram padrões de não estacionariedade, reforçando a influência das mudanças climáticas e a variabilidade natural do clima nos extremos pluviométricos localmente. A presença de

séries estacionárias, tanto por tendência quanto por diferenciação, indica que apesar de uma tendência clara, algumas regiões mantêm um comportamento relativamente previsível, enquanto outras apresentam maior variabilidade e mudanças abruptas.

Observou-se que em janeiro, a maioria das estações pluviométricas apresentou uma tendência de diminuição nos extremos de precipitação, tanto nos percentis 95 quanto 99. Esta redução foi mais evidente na região central de Minas Gerais e em partes do leste e nordeste, o que sugere que essas áreas estão experimentando uma diminuição na frequência e intensidade dos eventos de chuva extrema. Por outro lado, regiões do sul e sudoeste do estado mantiveram certa estabilidade, sendo classificadas como estacionárias em tendência (ET).

Fevereiro, por sua vez, apresentou uma redução no número de estações com tendências significativas, tanto de aumento quanto de diminuição, quando comparado a janeiro. As tendências de aumento foram mais concentradas na região sul e sudoeste, indicando que, durante este mês, essas áreas tiveram uma maior propensão a eventos extremos de precipitação. Em contrapartida, as estações que mostraram tendência de diminuição estavam distribuídas de forma mais dispersa pelo estado, principalmente no centro-leste e leste.

Março, considerado um mês de transição para o período seco, apresentou uma mescla de tendências de aumento e diminuição nos extremos pluviométricos. As regiões do centro-norte e oeste mostraram algumas das maiores tendências de aumento, enquanto áreas do leste e nordeste continuaram com a tendência de diminuição. A presença de estações classificadas como não estacionárias (NE) nesse mês reforça a variabilidade e a transição climática que ocorre no estado.

O período de outubro, que marca o início da estação chuvosa, revelou tendências de aumento em áreas da região sul e sudeste do estado, enquanto o leste e o nordeste, mais uma vez, apresentaram uma predominância de tendências de diminuição, especialmente para os percentis 95 e 99. Este comportamento sugere que a variabilidade climática e as mudanças nos padrões atmosféricos podem estar influenciando a distribuição e intensidade das chuvas extremas em diferentes épocas do ano.

Os meses de novembro e dezembro tiveram destaque para a tendência de aumento nos extremos pluviométricos. Novembro apresentou quinze estações com tendência significativa no P95, das quais onze mostraram aumento nas tendências, no P99 dezoito estações mostraram tendência significativa, dessas dez foram de aumento. No mês de dezembro, para o P95 quatorze estações possuem tendência significativa, sendo que

dessas sete mostraram aumento e sete diminuições, para o P99, vinte e uma estações mostraram tendência significativa sendo quatorze delas de aumento.

A distribuição espacial das estações com tendência de aumento para novembro e dezembro em ambos os percentis se concentram na porção leste e sudoeste do estado, enquanto as estações com tendência de diminuição, estão na faixa central do estado, numa faixa com sentido norte a sul. As regiões onde estão localizadas essas estações assim como os meses supracitados, precisam ser monitorados cuidadosamente, para prevenção de desastres e gerenciamento de recursos hídricos.

A espacialização dos resultados evidenciou que a região central do estado tem uma maior estabilidade nas tendências de precipitação extrema, enquanto o leste e nordeste apresentam uma variabilidade maior, com padrões mais acentuados de diminuição. Já o sudeste e sudoeste de Minas Gerais se destacaram como regiões que, em novembro e dezembro, mostraram um aumento nos extremos pluviométricos em ambos os percentis. Tais padrões destacam a influência da topografia e das condições climáticas locais sobre os extremos pluviométricos.

Essas observações são cruciais para o entendimento das mudanças nos regimes pluviométricos e indicam a necessidade de uma abordagem regionalizada ao planejar estratégias de adaptação e mitigação para eventos extremos de chuva e seca em Minas Gerais. A tendência geral de diminuição dos extremos pluviométricos em várias regiões reforça a importância do monitoramento contínuo e da elaboração de políticas de gestão hídrica que sejam resilientes a essas variações climáticas.

Por fim, a integração dos testes de estacionariedade, tendência e autocorrelação, associada à espacialização dos resultados, revelou-se uma abordagem eficaz para compreender a dinâmica dos extremos pluviométricos em Minas Gerais. Essa análise permite uma melhor compreensão dos impactos das mudanças climáticas nos regimes de precipitação do estado e fornece subsídios importantes para o planejamento e a gestão de recursos hídricos, bem como para a elaboração de estratégias de mitigação e adaptação a eventos extremos.

Esses resultados reforçam a necessidade de monitoramento contínuo e de análises futuras que considerem as mudanças climáticas em curso, visando a adaptação de práticas e políticas de gestão hídrica mais resilientes às tendências observadas no estado de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS

AGHAKOUCHAK, A. *et al.* **Extremes in a Changing Climate: Detection, Analysis and Uncertainty.** [S. l.: s. n.], 2013. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4479-0>

ALBUQUERQUE, R. C. de *et al.* Aplicação da metodologia Box & Jenkins em dados de precipitação na região do sertão do estado de Pernambuco – Brasil. [s. l.], v. 1, n. 1, p. 25–30, 2020.

ALMAZROUI, M. Rainfall trends and extremes in Saudi Arabia in recent decades. **Atmosphere**, [s. l.], v. 11, n. 9, 2020. <https://doi.org/10.3390/atmos11090964>

AVILA-DIAZ, A. *et al.* **Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections.** [S. l.: s. n.], 2020. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>

BALDO, M. C. *et al.* **Tendência da precipitação anual e do número de dias com chuva no município de Alto Piquiri - PR por meio do teste de mann kendall.** [S. l.: s. n.], 2021. <https://doi.org/10.33081/formacao.v28i53.8364>

BALLARIN, A. S.; ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E. Trends and abrupt changes in extreme rainfall events and their influence on design quantiles: a case study in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 149, n. 3–4, p. 1753–1767, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04139-9>

BENABDELOUAHAB, T. *et al.* Analysis and trends of rainfall amounts and extreme events in the Western Mediterranean region. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 141, n. 1–2, p. 309–320, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03205-4>

BEZERRA, A. P. *et al.* **Modelagem preditiva da precipitação para análise das inundações e suas consequências no município de Natal - RN.** [S. l.: s. n.], 2023.

BOX, G., JENKINS, G., REINSEL, G. **Box - Time Series Analysis 3rd ed.pdf.** [S. l.: s. n.], 1994.

CARDOZO, A. B.; REBOITA, M. S.; GARCIA, S. R. Climatologia de frentes frias na América do Sul e sua relação com o Modo Anular Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 11, p. 2237–8642, 2015.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone : Intensity , Form , Persistence , and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. [s. l.], v. 17, p. 88–108, 2004. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2)

COX, D. R.; STUART, A. Some quick sign tests for trend in location and dispersion. **Biometrika**, [s. l.], v. 42, p. 80–95, 1955. <https://doi.org/10.1093/biomet/42.1-2.80>

DA SILVA, R. C.; MARENGO, J. A.; RUV LEMES, M. Analysis of extreme rainfall and landslides in the metropolitan region of the Paraíba do Sul River Valley and North Coast of São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], 2024. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3513624/v1>

DA SILVA, L. J.; REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P. Relação Da Passagem De Frentes Frias Na Região Sul De Minas Gerais (Rsmg) Com a Precipitação E Eventos De Geadas. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 229–246, 2014.

<https://doi.org/10.5380/abclima.v14i1.36314>

DE BRITO, A. P. *et al.* Analysis of the Rain Anomaly Index and Precipitation Trend for Pluviometric Stations in Central Amazonia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 19–30, 2022. <https://doi.org/10.1590/0102-778637014521>

DE MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 37–44, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100004>

DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root. **Journal of the American Statistical Association**, [s. l.], v. 74, n. 366a, p. 427–431, 1979. <https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10482531>

DINIZ, H. A. L.; ARVALHO, A.; NDRADE, M. **Previsão de séries temporais utilizando redes neurais artificiais e modelos de Box e Jenkins**. [S. l.: s. n.], 1998.

DONAT, M. G. *et al.* More extreme precipitation in the worldâ €™ s dry and wet regions. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 508–513, 2016. <https://doi.org/10.1038/nclimate2941>

ESCOBAR, G. C. J.; REBOITA, M. S. Relationship between daily atmospheric circulation patterns and South Atlantic Convergence Zone (SACZ) events. **Atmosfera**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 1–25, 2022. <https://doi.org/10.20937/ATM.52936>

FERREIRA, G. W. S.; REBOITA, M. S. A New Look into the South America Precipitation Regimes: Observation and Forecast. **Atmosphere**, [s. l.], v. 13, n. 6, 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13060873>

HAMED, K. H.; RAO, A. R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. **Journal of Clinical Oncology**, [s. l.], p. 182–196, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)

HAMILTON, J. D. **James Douglas Hamilton-Time Series Analysis-Princeton University Press (1994).pdf**. [S. l.: s. n.], 1994. <https://doi.org/10.1515/9780691218632>

HARUN MWANGI, G.; KOSKE, J.; KOSGEI, M. Diagnostic Analysis of Weather Variables for Forecasting Rainfall Patterns in Kenya Using Bayesian Vector Autoregressive Model. **American Journal of Theoretical and Applied Statistics**, [s. l.], v. 10, n. 6, p. 249, 2021. <https://doi.org/10.11648/j.ajtas.20211006.14>

HU, Z. *et al.* Modified Mann-Kendall trend test for hydrological time series under the scaling hypothesis and its application. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 65, n. 14, p. 2419–2438, 2020. IPCC. **IPCC Sixth Assessment Report - Synthesis Report**. [S. l.: s. n.], 2022. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1810253>

JÚNIOR, S. F. A. X. *et al.* Precipitation trends analysis by mann-kendall test: A case study of paraíba, brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 187–196, 2020. <https://doi.org/10.1590/0102-7786351013>

JUNQUEIRA, H. S. *et al.* Análise da Variação Sazonal e de Tendências na Precipitação Pluviométrica no Município de Juazeiro-BA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 13, p. 2641–2649, 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.6.p2641-2649>

KENDALL, M. . **Rank Correlation Methods**. [S. l.: s. n.], 1975.

KULKARNI, A.; STORCH, H. Von. Monte Carlo experiments on the effect of serial

correlation on the Mann-Kendall test of trend. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.], v. 4, n. JANUARY, p. 82–85, 1995. <https://doi.org/10.1127/metz/4/1992/82>

KWIATKOWSKI, D. *et al.* Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root. How sure are we that economic time series have a unit root?. **Journal of Econometrics**, [s. l.], v. 54, n. 1–3, p. 159–178, 1992. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(92\)90104-Y](https://doi.org/10.1016/0304-4076(92)90104-Y)

LEMENKOVA, P. Python libraries matplotlib, seaborn and pandas for visualization geospatial datasets generated by QGIS. **Analele stiintifice ale Universitatii "Alexandru Ioan Cuza" din Iasi - seria Geografie**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 13–32, 2020.

LIKINAW, A.; ALEMAYEHU, A.; BEWKET, W. Trends in Extreme Precipitation Indices in Northwest Ethiopia: Comparative Analysis Using the Mann–Kendall and Innovative Trend Analysis Methods. **Climate**, [s. l.], v. 11, n. 8, 2023. <https://doi.org/10.3390/cli11080164>

LJUNG, G. M.; BOX, G. E. P. **On a Measure of Lack of Fit in Time Series Models**. [S. l.: s. n.], 1978. <https://doi.org/10.2307/2335207>

M. MORAVEJ. Investigating climate change using AK stationarity test in the Lake Urmia basin. **International Journal of Hydrology Science and Technology**, [s. l.], 2016. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2016.079349>

MANN, H. B. Non-parametric Tests Against Trend. **Econometrica**. [s. l.], v. 13, p. 245–259, 1945. <https://doi.org/10.2307/1907187>

MARENGO, J. A. *et al.* Heavy rains and hydrogeological disasters on February. [s. l.], n. 0123456789, 2024.

MARRAFON, V. H.; REBOITA, M. S. –. CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL REVELADAS ATRAVÉS DE ÍNDICES CLIMÁTICOS. [s. l.], v. 26, p. 663–676, 2020. <https://doi.org/10.5380/abclima.v26i0.72181>

MARTÍNEZ-ACOSTA, L. *et al.* SARIMA approach to generating synthetic monthly rainfall in the Sinú river watershed in Colombia. **Atmosphere**, [s. l.], v. 11, n. 6, p. 1–16, 2020. <https://doi.org/10.3390/atmos11060602>

MATSUOKA, J. V.; FERREIRA, V. D. O.; ROFATTO, V. F. Caracterização espaço-temporal dos extremos pluviométricos em Minas Gerais : uma abordagem. **Caderno de Geografia**, [s. l.], v. 34, n. 78, p. 784–814, 2024.

NÉTO, N. C. G.; SANTOS, E. B. Análise Espaço-Temporal dos Eventos de Precipitação Intensa no Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 89–97, 2022. <https://doi.org/10.1590/0102-77863710081>

NOGUEIRA, N. C. de O.; MACHADO, P. H. G.; REBOITA, M. S. Climatological Study of Frontal Systems Acting in the South of Rio Grande do Sul and South of Minas Gerais between 2009 and 2021. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 34, p. 306–334, 2024. <https://doi.org/10.55761/abclima.v34i20.16664>

OLIVEIRA, D. E. *et al.* Variabilidade climática e as chuvas de janeiro de 2007. **Revista da ANPEGE**, [s. l.], p. 106–135, 2022. <https://doi.org/10.5418/ra2022.v18i37.10117>

OLIVEIRA, T. A. De; MORAES, C. De; TAVARES, G. Gênese aos impactos do evento no perímetro urbano de juiz de fora (mg) extreme precipitation event of 12 / 09

/ 2016 : from the genesis to the impacts of the event in the urban perimeter of juiz de fora (mg). [s. l.], v. 21, p. 104–131, 2021.

OLIVEIRA, D. M.; REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P. da. A influência da topografia da região sul de Minas Gerais nas variáveis atmosféricas simuladas com o RegCM4.

Revista Brasileira de Geografia Física, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 758–772, 2018.

<https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.6.p758-772>

PEREIRA, V. R. *et al.* Adaptation opportunities for water security in Brazil.

Sustentabilidade em Debate, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 91–105, 2020.

<https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33858>

PEREIRA, G. *et al.* Análise Da Variabilidade Da Precipitação Para O Estado De Minas Gerais (1981-2017). **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 1, p. 213–229, 2018.

<https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.61028>

PEREZ, L. P. *et al.* Climate change and disasters: Analysis of the Brazilian regional inequality. **Sustentabilidade em Debate**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 260–277, 2020.

<https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33813>

PINHEIRO, A.; GRACIANO, R. L. G.; SEVERO, D. L. Tendência das séries temporais de precipitação da região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 28, n. 3, p. 281–290, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000300005>

REBOITA, M. S. *et al.* Cenários De Mudanças Climáticas Projetados Para O Estado De Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 1, n. November, 2018.

<https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60524>

REBOITA, M. S. *et al.* Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>

REIS, A. L. dos *et al.* Climatologia e eventos extremos de precipitação no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 07, n. 1, n. ISSN 0034, p. 82, 2018.

SA'ADI, Z. *et al.* Trends analysis of rainfall and rainfall extremes in Sarawak, Malaysia using modified Mann–Kendall test. **Meteorology and Atmospheric Physics**, [s. l.], v. 131, n. 3, p. 263–277, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0564-3>

SALVIANO, M. F.; GROOPPO, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 64–73, 2016. <https://doi.org/10.1590/0102-778620150003>

SEENU, P. Z.; JAYAKUMAR, K. V. Comparative study of innovative trend analysis technique with Mann-Kendall tests for extreme rainfall. **Arabian Journal of Geosciences**, [s. l.], v. 14, n. 7, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06906-w>

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, [s. l.], v. 63, p. 1379–1389, 1968. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>

SEN, Pranab Kumar. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, [s. l.], v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>

SERINALDI, F.; KILSBY, C. G. The importance of prewhitening in change point

analysis under persistence. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 763–777, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1041-5>

SILVA, P. N.; ESCOBAR, G. C. J.; REBOITA, M. S. Eventos extremos de precipitação no estado de minas gerais associados com a ocorrência de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul. [S. l.: s. n.], 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p1013-1023>

SILVA, D. F. da; GALVÍNCIO, J. D.; NÓBREGA, S. R. Influência da variabilidade climática e da associação de fenômenos climáticos sobre sub-bacias do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 19, p. 46–56, 2011.

SILVA, J. L. M. da; JARDIM, C. H. O episódio de chuva concentrada do dia 17 de janeiro de 2016 em Belo Horizonte (MG). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, [s. l.], p. 2562–2566, 2017. <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2462>

STORCH, H. Von; NAVARRA, A. **Analysis of Climate Variability**. [S. l.: s. n.], 1999.

TAVARES, M. G. **Analysis of Trends in Extreme Precipitation in the State of Minas Gerais**. [S. l.: s. n.], 2024. <https://doi.org/10.1590/0102-77863910033>

THEIL, H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. In: DIE NEUEN GRUNDSÄTZE ÜBER DEN VOLLZUG VON FREIHEITSTRAFEN IN DEUTSCHLAND. [S. l.: s. n.], 1950. p. 1–17.

TIAN, Y. *et al.* Evaluation of potential evapotranspiration based on CMADS reanalysis dataset over China. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 10, n. 9, p. 1–17, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10091126>

TIAN, Y.; XU, Y. P.; WANG, G. Agricultural drought prediction using climate indices based on Support Vector Regression in Xiangjiang River basin. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 622–623, p. 710–720, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.025>

VASQUEZ-ARROYO, E. *et al.* Climate impacts in the Brazilian energy security: Analysis of observed events and adaptation options. **Sustentabilidade em Debate**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 157–176, 2020. <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33838>

VELASCO HOLENDER, B.; BARBOSA SANTOS, E. Análise de tendência dos eventos de precipitação intensa no Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 32, p. 584–606, 2023. <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16411>

WANG, F. *et al.* Re-evaluation of the Power of the Mann-Kendall Test for Detecting Monotonic Trends in Hydrometeorological Time Series. **Frontiers in Earth Science**, [s. l.], v. 8, n. February, p. 1–12, 2020. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00014>

WASSERSTEIN, R. L.; SCHIRM, A. L.; LAZAR, N. A. Moving to a World Beyond “ $p < 0.05$ ”. **American Statistician**, [s. l.], v. 73, n. sup1, p. 1–19, 2019. <https://doi.org/10.1080/00031305.2019.1583913>

YUE, S. *et al.* The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 16, n. 9, p. 1807–1829, 2002. <https://doi.org/10.1002/hyp.1095>

CAPÍTULO 4 - DECOMPOSIÇÃO E ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS

RESUMO

Este estudo analisou a decomposição e as séries temporais de precipitação extrema em diferentes estações meteorológicas de Minas Gerais, Brasil, ao longo de 44 anos, utilizando os percentis 95 e 99 para identificar eventos de precipitação intensa. A metodologia de decomposição aplicada foi o método aditivo, que permitiu identificar e separar os componentes de tendência, sazonalidade e ruído nas séries temporais. Os resultados mostraram que várias estações, como Guarani, Pedro Versiani, Pirapama e Ponte do Rodrigues, apresentaram uma tendência decrescente na intensidade dos eventos de precipitação extrema, com uma redução significativa observada ao longo do tempo. Como exemplo, a estação Guarani apresentou uma diminuição na tendência de precipitação extrema do percentil 95 no mês de janeiro, passando de 45 mm na década de 1970 para 25 mm nos anos recentes. Por outro lado, outras estações, como Santa Bárbara, evidenciaram um aumento nas tendências de eventos extremos, especialmente no mês de fevereiro, onde a intensidade aumentou de 10 mm para 40 mm ao longo do período. A componente sazonal manteve-se relativamente constante em todas as estações, indicando que, apesar das mudanças nas tendências de longo prazo, os padrões sazonais de precipitação extrema continuaram a influenciar de maneira consistente os eventos extremos. No entanto, algumas estações, como Pirapama, demonstraram um comportamento não estacionário, evidenciando mudanças estruturais ao longo do tempo. Os resíduos revelaram a presença de influências externas ou anomalias climáticas, sugerindo que fatores imprevisíveis afetaram a intensidade dos eventos extremos de precipitação em determinados períodos. Esses achados são fundamentais para compreender as variações climáticas regionais e contribuir para a formulação de estratégias de adaptação e mitigação na gestão de recursos hídricos e prevenção de desastres naturais na região de Minas Gerais.

Palavras-chave: precipitação extrema, séries temporais, tendência climática, sazonalidade, análise temporal.

This study analyzed the decomposition and time series of extreme precipitation in different meteorological stations in Minas Gerais, Brazil, over a period of 44 years, using the 95th and 99th percentiles to identify intense precipitation events. The decomposition methodology applied was the additive method, which allowed the identification and separation of the trend, seasonality, and noise components in the time series. The results showed that several stations, such as Guarani, Pedro Versiani, Pirapama, and Ponte do Rodrigues, exhibited a decreasing trend in the intensity of extreme precipitation events, with a significant reduction observed over time. For instance, the Guarani station showed a decrease in the trend of extreme precipitation at the 95th percentile in January, from 45 mm in the 1970s to 25 mm in recent years. On the other hand, other stations, such as Santa Bárbara, evidenced an increase in the trends of extreme events, especially in February, where the intensity increased from 10 mm to 40 mm over the period. The seasonal component remained relatively constant across all stations, indicating that despite the long-term trend changes, the seasonal patterns of extreme precipitation continued to consistently influence the extreme events. However, some stations, such as Pirapama, demonstrated a non-stationary behavior, evidencing structural changes over time. The residuals revealed the presence of external influences or climatic anomalies, suggesting that unpredictable factors affected the intensity of extreme precipitation events in certain periods. These findings are essential for understanding regional climate variations and contribute to the formulation of adaptation and mitigation strategies in water resource management and disaster prevention in the Minas Gerais region.

Keywords: Extreme precipitation, time series, climate trend, seasonality, temporal analysis.

4.1. INTRODUÇÃO

A decomposição de séries temporais é uma ferramenta poderosa para entender melhor os componentes subjacentes dos dados de extremos pluviométricos e preceder outras etapas tão importantes quanto as realizadas até o aqui. Com base na decomposição realizada após as análises de autocorrelação, estacionariedade e tendência, há diversas conclusões e possíveis ações que devem ser consideradas para aprofundar as análises.

A decomposição de séries temporais é uma técnica que divide a série em três componentes principais: tendência, sazonalidade e ruído (irregularidade). A tendência representa o movimento de longo prazo da série; a sazonalidade reflete padrões que se repetem em intervalos regulares; e o ruído compreende as variações aleatórias ou imprevisíveis da série (Cleveland *et al.*, 1990). Para analisar extremos pluviométricos, a decomposição é útil porque permite isolar a tendência e a sazonalidade, possibilitando uma análise mais precisa dos eventos extremos (Hyndman & Athanasopoulos, 2018).

No contexto da análise de extremos pluviométricos, é comum aplicar métodos clássicos como o da média móvel ou decomposição aditiva/multiplicativa, que mesmo simples mostra componentes sazonais e resíduos de forma mais detalhada e consistente. Essa abordagem é eficaz na identificação de mudanças sazonais e na observação de como eventos extremos evoluem ao longo do tempo (Hyndman & Athanasopoulos, 2018). A decomposição de séries temporais de precipitação é particularmente útil para identificar mudanças nos padrões de extremos pluviométricos ao longo do tempo. Por exemplo, ao analisar os percentis 95 e 99 de precipitação, que correspondem a eventos de chuva intensa, a decomposição permite distinguir se o aumento ou diminuição desses extremos é devido a mudanças na tendência, sazonalidade ou fatores aleatórios. Tal análise é crucial para identificar mudanças no clima que podem indicar um aumento na frequência ou intensidade de eventos extremos, contribuindo para a compreensão dos efeitos das mudanças climáticas (Alexander *et al.*, 2006).

Em suma, a análise de séries temporais e a decomposição são ferramentas essenciais para a análise de extremos pluviométricos, fornecendo percepções sobre tendências, sazonalidades e padrões que afetam a ocorrência de eventos extremos. Ao aplicar esses métodos, é possível melhorar a compreensão dos riscos associados a eventos extremos e auxiliar no desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação.

4.1.1 OBJETIVOS DO CAPÍTULO

4.1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da decomposição das séries temporais é separar os componentes de tendência, sazonalidade e ruído, facilitando a análise detalhada dos padrões subjacentes presentes nos dados. Isso permite identificar mudanças estruturais nos dados, como variações sazonais e tendências de longo prazo, essenciais para compreender a dinâmica dos extremos pluviométricos e sua evolução ao longo do tempo.

4.1.1.2 Objetivos Específicos

1. Aplicar a decomposição nas séries temporais mensais de precipitação extrema e separar as componentes de tendência, sazonalidade e ruído das séries observadas, para os percentis 95 e 99 de precipitação para os meses da estação chuvosa.
2. Analisar a componente de tendência nas séries de precipitação decompostas para identificar variações de longo prazo, aumento ou diminuição dos extremos com foco em possíveis mudanças climáticas que possam estar afetando os regimes de precipitação locais em Minas Gerais.
3. Avaliar a componente sazonal das séries temporais decompostas, destacando as variações periódicas anuais e identificando como esses padrões sazonais impactam os eventos extremos de precipitação para cada mês ao longo dos anos.
4. Verificar a consistência dos padrões decompostos entre diferentes estações pluviométricas e meses mais críticos para precipitação extrema, como janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro, para identificar regiões ou períodos com características semelhantes de tendência e sazonalidade.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 DECOMPOSIÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS

A decomposição de séries temporais é uma técnica essencial em estatística e aprendizado de máquina, a qual permite a separação de uma série temporal em componentes distintos para facilitar a análise e a modelagem. Este processo possibilita a

identificação de padrões subjacentes e a compreensão das variáveis que influenciam a série ao longo do tempo.

A decomposição clássica de séries temporais é baseada na ideia de que uma série temporal pode ser decomposta em três componentes principais: tendência (T_t) sazonalidade (S_t) e resíduos ou ruídos (R_t). A expressão geral da decomposição pode ser dada por dois modelos principais:

1. Modelo Aditivo

$$Y_t = T_t + S_t + R_t \quad (4.1)$$

2. Modelo Multiplicativo

$$Y_t = T_t * S_t * R_t \quad (4.2)$$

No modelo aditivo, os componentes são somados, supondo que os efeitos da tendência, sazonalidade e ruído são independentes e têm um impacto constante ao longo do tempo. Já no modelo multiplicativo, os componentes interagem de maneira não linear, o que é apropriado quando a magnitude da série varia ao longo do tempo (Makridakis et al., 1997).

Onde:

- T_t : é a tendência, ou seja, o movimento de longo prazo da série e pode ser capturada por modelos lineares ou não lineares. Representa o aumento, declínio ou estabilidade da série ao longo do tempo.
- S_t : sazonalidade, representa os padrões que se repetem em intervalos regulares, como mudanças diárias, semanais, mensais ou anuais.
- R_t : captura a variabilidade aleatória ou irregular na série, que não pode ser explicada pelos componentes de tendência ou sazonalidade.

A identificação correta desses componentes é fundamental para a modelagem e previsão precisas de séries temporais (Chatfield, 1996).

4.2.2.1 Método Clássico (Média Móvel)

A decomposição clássica é realizada em etapas que incluem:

1. **Estimativa da Tendência (T_t):** geralmente estimada utilizando uma média móvel de longo prazo. Para uma série com sazonalidade de k períodos (por exemplo, 12 meses em uma série mensal), calcula-se a média móvel centrada ao longo de k períodos. No caso dessa pesquisa, foram analisadas um mês por vez ao longo da série, por exemplo: todos os janeiros para os 44 anos, assim uma janela de $k = 5$ anos foi utilizada para captar as variações sem suavizar demais os resultados.
2. A equação da média móvel para estimar a tendência é dada por:

$$T_t = \frac{1}{k} \sum_{i=-m}^{m} Y_{t+i} \quad (4.3)$$

Onde: $m = \frac{k-1}{2}$. Isso suaviza a série temporal e captura a tendência a longo prazo

3. **Estimativa da Sazonalidade (S_t):** a sazonalidade é calculada subtraindo a tendência da série original e, em seguida, calculando a média para cada período sazonal ao longo dos anos. Isso resulta na estimativa do componente sazonal para cada ponto no ciclo sazonal. Para séries mensais, a sazonalidade para o mês de janeiro é a média de todas as diferenças entre os valores observados e a tendência para todos os meses de janeiro ao longo dos anos.
4. **Cálculo do Ruído ou Resíduo (R_t):** O componente de ruído é obtido subtraindo os componentes de tendência e sazonalidade da série original no modelo aditivo:

$$R_t = Y_t - (T_t + S_t) \quad (4.4)$$

Já no modelo multiplicativo, o ruído é calculado como:

$$R_t = \frac{Y_t}{T_t * S_t} \quad (4.5)$$

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 ANÁLISES DA DECOMPOSIÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS COM TENDÊNCIAS SIGNIFICATIVAS DE DIMINUIÇÃO NO P95

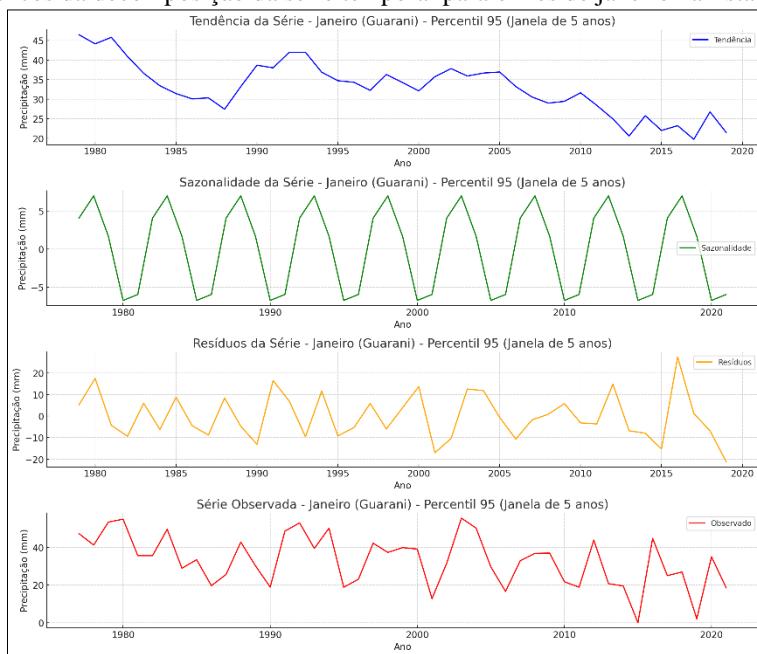
Nesse tópico serão analisadas a decomposição das séries temporais para algumas estações que apresentaram tendências de diminuição nos eventos de precipitação intensa e que se mostraram persistentes, ou seja, que mostraram tendências de diminuição em vários meses diferentes no percentil 95. Apenas algumas estações foram selecionadas, utilizando como critério a persistência e a magnitude das tendências, devido ao grande número de estações disponíveis para serem analisadas.

Os gráficos foram gerados utilizando o método aditivo com uma janela de $k = 5$ anos para a média móvel, com o intuito de capturar variação à curto prazo e mostrar variações mais detalhadas e menos suavizadas das séries.

1. Estação Guarani – Janeiro (↓)

A Figura 4.1 mostra a decomposição para o mês de janeiro para a estação Guarani no P95 usando uma janela de $k = 5$ anos da média móvel.

Figura 4.1- Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de janeiro na Estação Guarani P95



Fonte: A autora (2024).

A tendência para o mês de janeiro na estação Guarani teve início em níveis mais

baixos, em torno de 45 mm no final da década de 1970 e início da década de 1980. Ao longo do tempo, a tendência apresentou uma diminuição constante, chegando a 25 mm nos anos mais recentes. Essa diminuição indica que houve uma redução na intensidade dos eventos extremos de precipitação em janeiro, sugerindo que a estação Guarani está experimentando chuvas extremas cada vez menos intensas ao longo do tempo.

A componente sazonal manteve-se relativamente constante ao longo do período, com amplitude variando entre -5 mm e +5 mm. A constância na sazonalidade sugere que, mesmo com a diminuição na tendência geral, o padrão sazonal permaneceu regular e previsível, influenciando os eventos de precipitação extrema em janeiro.

Os resíduos apresentaram variações, oscilando entre -20 mm e +20 mm, indicando a presença de influências externas ou anomalias climáticas que não foram capturadas completamente pelas componentes de tendência e sazonalidade, principalmente a partir dos anos 2000.

A série observada, confirma a diminuição na intensidade dos eventos extremos de precipitação ao longo do tempo. Inicialmente, os picos de precipitação em janeiro eram de cerca de 45 mm, mas nos anos mais recentes, esses valores chegaram a aproximadamente 25 mm.

A análise mostra uma clara diminuição na intensidade dos eventos extremos de precipitação em janeiro ao longo dos 44 anos estudados. A sazonalidade manteve-se constante, enquanto os resíduos indicam que os eventos extremos se tornaram mais imprevisíveis ao longo do tempo.

2. Estação Guarani – Fevereiro (↓)

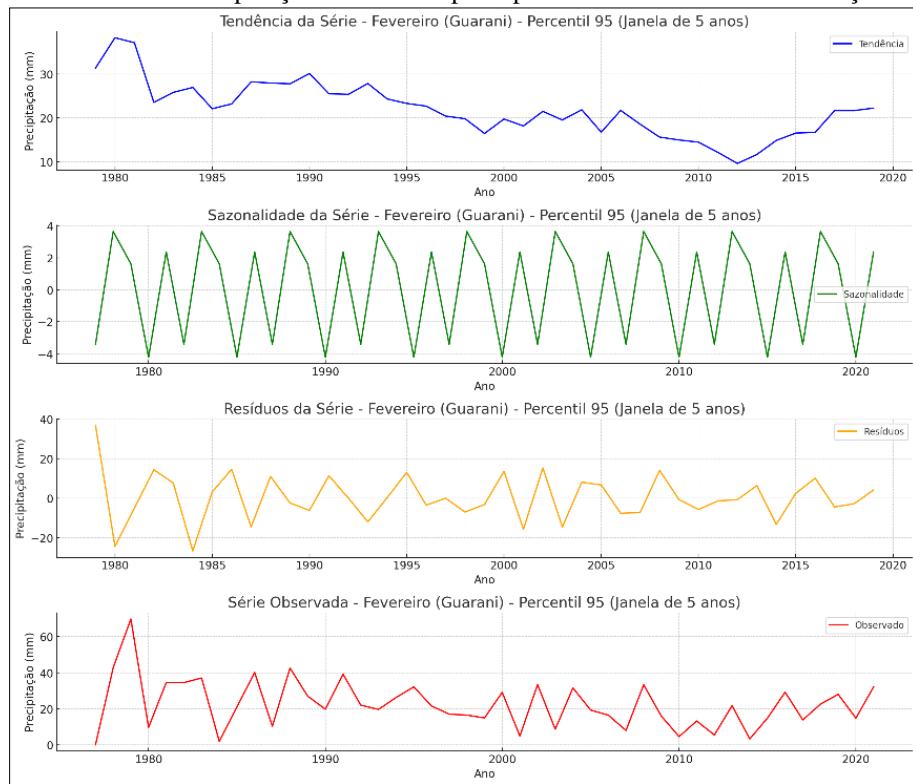
A Figura 4.2 mostra a decomposição para o mês de fevereiro para a estação Guarani no P95 usando uma janela de $k=5$ anos da média móvel.

A tendência de precipitação para o mês de fevereiro na estação Guarani no início da série era em torno de 35 mm no final da década de 1970. Ao longo dos 44 anos, a tendência mostrou uma prevalência de diminuição, chegando a valores em torno de 10 mm após 2010 e nos anos mais recentes volta a aumentar levemente, porém mantendo o patamar de redução em torno de 20 mm. Esta queda clara confirma que a intensidade dos eventos extremos de precipitação em fevereiro tem diminuído significativamente ao longo do tempo.

A componente sazonal permaneceu relativamente constante ao longo do período, com uma amplitude variando entre -4 mm e +4 mm. A constância da sazonalidade sugere

que, apesar da redução na tendência geral, os padrões climáticos sazonais continuaram a influenciar de maneira consistente a precipitação extrema em fevereiro.

Figura 4.2 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de fevereiro na Estação Guarani P95



Fonte: A autora (2024).

Os resíduos variaram entre -20 mm e +40 mm, indicando a presença de influências externas que não foram explicadas apenas pela tendência e sazonalidade. Nos primeiros anos, a variabilidade dos resíduos foi mais acentuada, sugerindo uma maior imprevisibilidade nos eventos extremos, corroborando com os anos de ocorrência de El Niño moderado ou forte, já discutidos no capítulo 2. Nos anos recentes, a amplitude dos resíduos diminuiu, mostrando que os eventos extremos de precipitação em fevereiro se tornaram mais previsíveis.

3. Estação Pedro Versiani – Janeiro (↓)

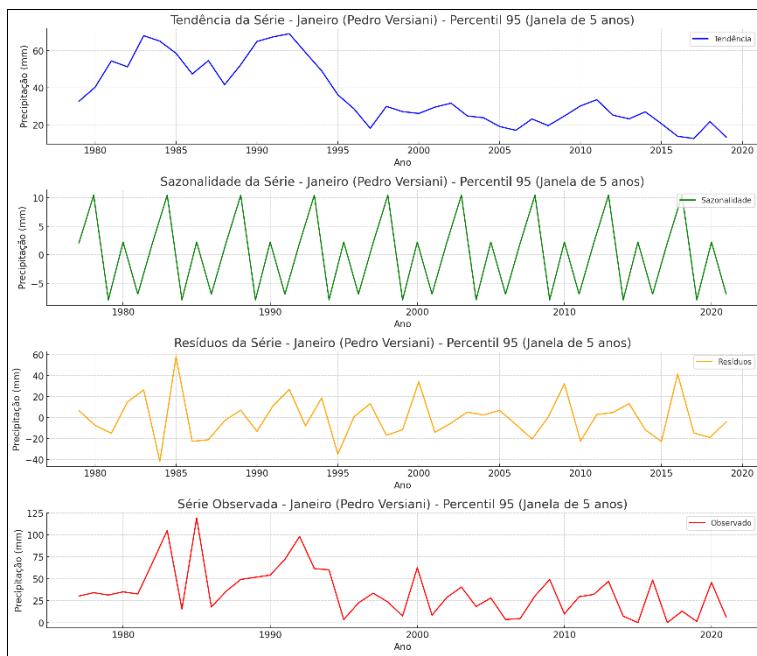
A Figura 4.3 mostra a decomposição para o mês de janeiro para a estação Pedro Versiani no P95 usando uma janela de $k = 5$ anos.

O gráfico de tendência apresenta uma variação significativa ao longo dos anos. No início da série, a tendência começou em torno de 40 mm e aumentou até atingir um pico próximo de 60 mm por volta do final dos anos 1980. Após esse pico, houve uma

redução gradual ao longo da década de 1990, caindo para cerca de 30 mm a 40 mm. Nos anos 2000, a tendência se manteve mais estabilizada em níveis inferiores, com valores oscilando entre 20 mm e 30 mm nos anos mais recentes, indicando uma redução nos eventos extremos de precipitação em janeiro ao longo do período analisado.

A componente sazonal não foi consistente ao longo de toda a série, apresentando uma amplitude que variou entre -5 mm e +10 mm. Essa variação indica que os efeitos sazonais não foram perfeitamente previsíveis e influenciaram a variabilidade dos eventos extremos de precipitação de maneira desigual ao longo do tempo. A presença dessa amplitude sugere que os efeitos sazonais contribuíram para os eventos extremos de precipitação, mas não de forma constante ao longo de cada ano, indicando que houve certa irregularidade (ou alternância na magnitude dos picos dos ciclos) no padrão sazonal.

Figura 4.3- Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de janeiro na Estação Pedro Versiani P95



Fonte: A autora (2024).

Os resíduos exibiram uma variabilidade significativa, com amplitudes que variaram entre -40 mm e +60 mm, atingindo um pico máximo de +60 mm. Isso indica que há uma quantidade substancial de variabilidade não explicada pelas componentes de tendência e sazonalidade. A grande amplitude dos resíduos sugere a influência de fatores externos ou anomalias climáticas que não foram capturadas pelas outras componentes.

Em suma, a tendência geral mostra que os eventos extremos de precipitação em janeiro na estação Pedro Versiani foram mais intensos nas primeiras duas décadas da série

e diminuíram de forma significativa nos anos posteriores. A componente sazonal apresentou variações significativas, sugerindo que não houve um padrão sazonal perfeitamente previsível para os eventos extremos de precipitação. Os resíduos, com amplitudes de -40 mm a +60 mm, indicam que houve muita variabilidade não explicada por fatores sazonais ou de tendência, apontando para a influência de fatores climáticos ou eventos imprevisíveis que afetaram a intensidade dos extremos de precipitação ao longo do período analisado.

4. Estação Pedro Versiani – Fevereiro (↓)

A Figura 4.4 mostra a decomposição para o mês de fevereiro para a estação Pedro Versiani no P95 usando uma janela de 5 anos, ajudando na melhor visualização de cada componente.

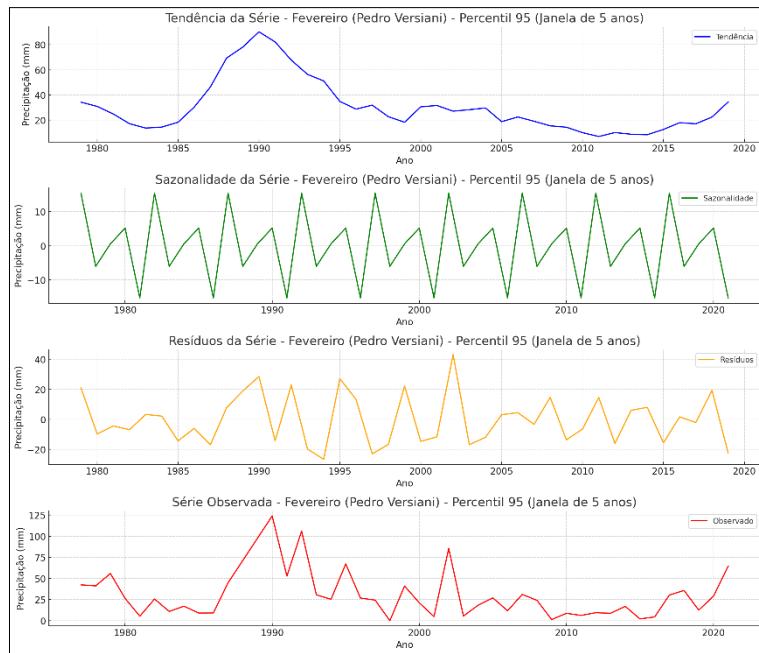
A tendência apresentou uma variação considerável ao longo do tempo, iniciando em torno de 35 mm nos primeiros anos da série (final da década de 1970) e subindo para um pico de aproximadamente 80 mm no final dos anos 1980. Após atingir o pico, houve uma redução gradual durante a década de 1990, chegando a valores abaixo de 20 mm e em alguns anos acima de 40 mm. Isso sugere que a frequência e a intensidade dos eventos extremos de precipitação no mês de fevereiro foram diminuindo após o período de maior intensidade. Nos anos mais recentes, a tendência se estabilizou em níveis mais baixos, oscilando entre próximos de 0 mm e 40 mm, indicando uma diminuição dos eventos extremos ao longo do tempo.

A componente sazonal manteve-se relativamente constante ao longo da série, apresentando uma amplitude que variou de -10 mm a +10 mm, mostrando que, com picos que ultrapassa esses valores, porém mantendo o padrão cíclico. Mostrando que independente das mudanças na tendência, os eventos extremos de precipitação em fevereiro ainda são influenciados por padrões sazonais previsíveis, o que sugere a presença de ciclos climáticos anuais que afetam a precipitação.

Os resíduos apresentaram variações significativas, com amplitudes que oscilaram em torno de -20 mm e +40 mm. Há picos de resíduos mais evidentes durante a década de 1980 e início dos anos 1990, indicando que, nesses períodos, ocorreram eventos extremos de precipitação que não foram totalmente explicados pela tendência ou sazonalidade. Esses picos sugerem a influência de fatores externos ou anomalias climáticas que impactaram a precipitação extrema. Nos anos mais recentes, os resíduos mostram uma certa diminuição, mas ainda existem variações que indicam a presença de fatores

imprevisíveis.

Figura 4.4 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de fevereiro na estação Pedro Versiani P95.

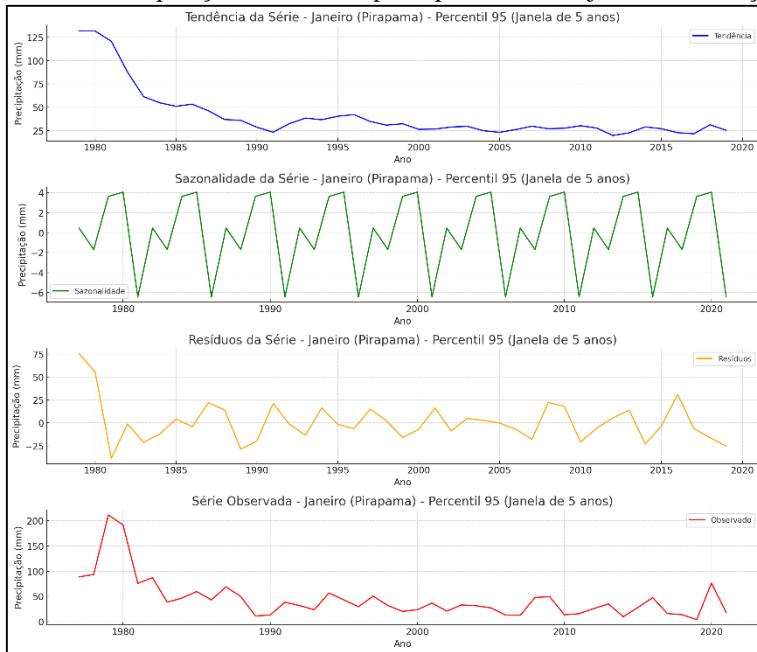


Fonte: A autora (2024).

5. Estação Pirapama – Janeiro (↓)

A Figura 4.5 mostra a decomposição para o mês de janeiro para a estação PIRAPAMA no P95 usando uma janela de 5 anos.

Figura 4.5 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de janeiro na Estação Pirapama P95.



Fonte: A Autora (2024).

A tendência de precipitação em janeiro para o percentil 95 na estação Pirapama começou em níveis elevados, em torno de 130 mm no final da década de 1970 e início da década de 1980. Ao longo do tempo, houve um declínio contínuo na tendência, atingindo cerca de 50 mm a 60 mm e nos anos mais recentes manteve-se em torno dos 25 mm. Essa redução significativa na tendência indica uma clara diminuição na intensidade dos eventos extremos de precipitação em janeiro ao longo dos 44 anos analisados.

A componente sazonal manteve uma variação relativamente constante ao longo do período, com uma amplitude que variou aproximadamente de -6 mm a +4 mm. Apesar da queda na tendência, o padrão sazonal mostrou uma influência estável e previsível sobre os eventos extremos de precipitação ao longo do período analisado, reforçando o papel da sazonalidade nos ciclos climáticos da região.

Os resíduos apresentaram flutuações significativas, variando de -25 mm a +75 mm, sugerindo uma grande variabilidade não explicada pelas componentes de tendência e sazonalidade. Estes picos nos resíduos indicam que, em determinados anos, houve eventos extremos de precipitação que foram fortemente influenciados por fatores externos ou anomalias climáticas que não foram capturadas pelos padrões sazonais ou pela tendência. A amplitude significativa dos resíduos sugere a ocorrência de eventos climáticos pontuais que impactaram a precipitação de forma imprevisível.

6. Estação Pirapama – Janeiro: Uma Série Não Estacionária

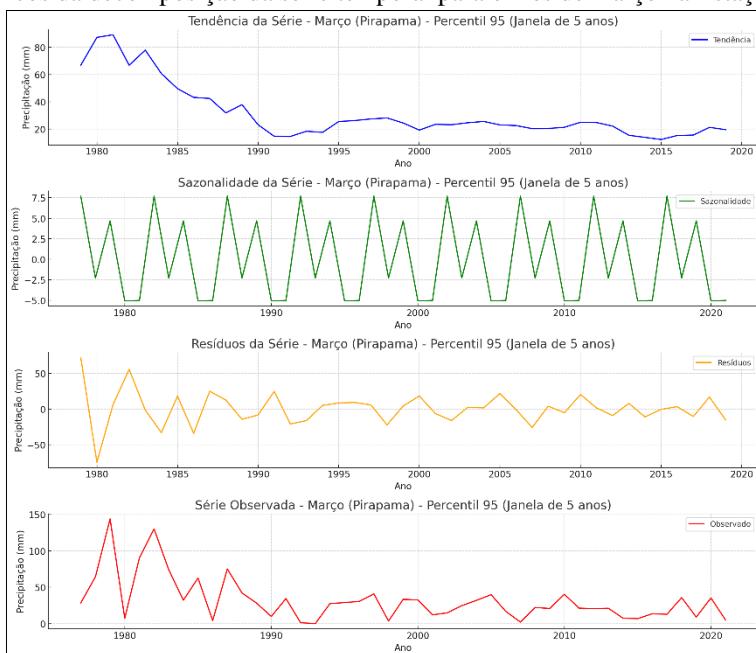
O fato de a estação Pirapama ter se mostrado não estacionária para o mês de janeiro indica que há uma tendência ou mudança significativa no padrão da série temporal ao longo do período analisado. Isso confirma o que foi observado na decomposição, onde a tendência mostrou uma redução significativa ao longo do tempo. A não estacionariedade sugere que há uma alteração no regime de precipitação extrema em janeiro para essa estação, o que pode ser um reflexo de fatores climáticos de longo prazo, como mudanças climáticas ou variabilidades interanuais (como fenômenos ENSO - El Niño/Southern Oscillation).

Para modelagem futura ou análises adicionais, a não estacionariedade deve ser considerada, talvez utilizando técnicas que abordem diretamente essa característica, como diferenciação ou modelos que permitam capturar tendências não estacionárias (por exemplo, ARIMA integrado ou modelos de Cadeia de Markov ajustados para séries não estacionárias).

7. Estação Pirapama – Março (↓)

A Figura 4.6 mostra a decomposição para o mês de março para a estação PIRAPAMA no P95 usando uma janela de 5 anos para a média móvel.

Figura 4.6 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de março na Estação Pirapama P95.



Fonte: A autora (2024).

A componente de tendência para março indica uma redução gradual nos eventos

extremos de precipitação ao longo dos anos. Nos primeiros anos com valores acima de 80 mm, a tendência era mais elevada, sugerindo períodos com precipitação mais intensa. Com o tempo, a tendência diminuiu gradativamente até atingir valores próximos a 20mm na década de 1990 e se estabilizou em níveis mais baixos nos anos mais recentes, indicando que a intensidade dos eventos extremos de precipitação em março reduziu-se significativamente na estação Pirapama.

A componente sazonal mostra um padrão cíclico consistente, com repetidas variações. A amplitude da sazonalidade permanece relativamente constante, o que significa que o efeito sazonal na precipitação extrema continua a influenciar de forma previsível. Mesmo com a tendência decrescente, a sazonalidade continua a ser um fator relevante na variabilidade das chuvas extremas em março.

Nos primeiros anos da série, os resíduos apresentavam uma amplitude maior, indicando uma maior variabilidade nos eventos extremos de precipitação. Com o tempo, os resíduos tornaram-se menos pronunciados, sugerindo que os eventos extremos de precipitação em março tornaram-se mais previsíveis nos anos recentes.

8. Estação Pirapama – Dezembro (↓)

A Figura 4.7 mostra a decomposição para o mês de dezembro para a estação PIRAPAMA no P95 usando uma janela de 5 anos.

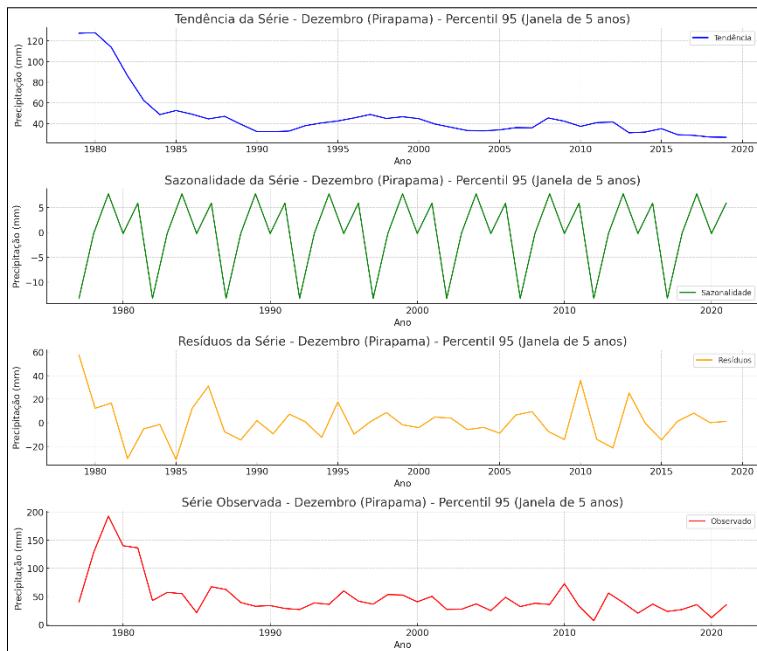
A tendência de precipitação em dezembro para o percentil 95 na estação Pirapama iniciou-se em torno de 100 a 110 mm no final da década de 1970. Ao longo dos anos, houve uma queda consistente na tendência, atingindo valores abaixo dos 40 mm nos anos mais recentes. Essa redução acentuada indica que a intensidade dos eventos extremos de precipitação em dezembro diminuiu consideravelmente ao longo do período analisado, sugerindo uma mudança significativa no regime de chuvas extremas durante esse mês.

A componente sazonal manteve-se constante ao longo do período, com amplitude variando entre aproximadamente -5 mm e +7,5 mm, ou seja, a componente sazonal não se manteve constante, ao longo do período analisado. Essa variação assimétrica indica que houve flutuações significativas na sazonalidade ao longo do tempo, na estação em questão, sugerindo que os padrões sazonais de precipitação em dezembro na estação foram influenciados de forma não uniforme ao longo dos anos, refletindo uma influência sazonal que se alterou de forma mais complexa ao longo do tempo.

Os resíduos apresentaram flutuações variáveis, oscilando entre -20 mm e +20 mm, sugerindo a presença de influências externas ou eventos climáticos não capturados pelas componentes de tendência e sazonalidade. Nos primeiros anos da série, os resíduos

mostraram maior variabilidade, indicando que os eventos extremos de precipitação em dezembro eram mais imprevisíveis. Nos anos recentes, a amplitude dos resíduos diminuiu, sugerindo que os eventos extremos se tornaram mais previsíveis.

Figura 4.7 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de dezembro na Estação Pirapama P95.



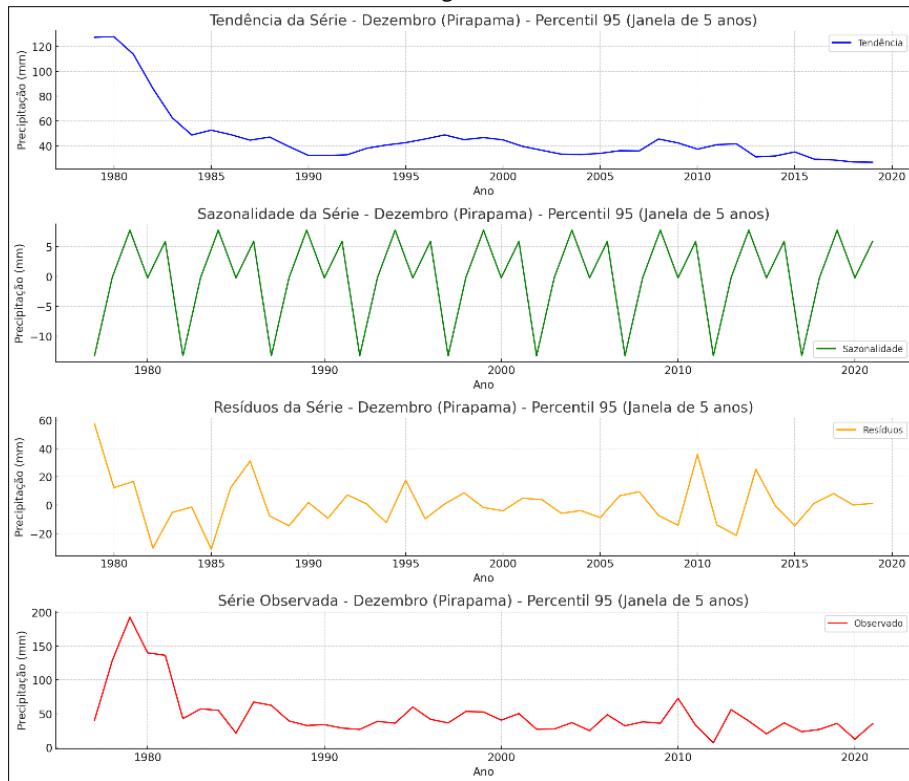
Fonte: A autora (2024).

9. Estação Ponte do Rodrigues – Março (↓)

A Figura 4.8 mostra a decomposição para o mês de março para a estação Ponte do Rodrigues no P95 usando uma janela de 5 anos.

A tendência da precipitação para o mês de março no percentil 95 na estação Ponte do Rodrigues começou em níveis mais altos, em torno de 120 mm no final da década de 1970 e início da década de 1980. Ao longo dos 44 anos analisados, a tendência mostrou um declínio constante e gradual, atingindo valores próximos a 40 mm nos anos mais recentes. Esta redução na tendência indica uma clara diminuição na intensidade dos eventos extremos de precipitação em março ao longo do tempo. Isso sugere uma mudança significativa no regime de chuvas extremas para o mês de março na estação Ponte do Rodrigues.

Figura 4.8 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de março na Estação Ponte do Rodrigues P95.



Fonte: A autora (2024).

A componente sazonal não se manteve constante, variando entre -10 mm e +5 mm ao longo do período analisado. Essa variação assimétrica indica que houve flutuações significativas na sazonalidade ao longo do tempo, sugerindo que os padrões sazonais de precipitação em março na estação Ponte do Rodrigues foram influenciados de forma não uniforme ao longo dos anos. Essa variabilidade indica que o efeito sazonal sobre os eventos extremos de precipitação foi mais pronunciado em certos anos e menos em outros, refletindo uma influência sazonal que se alterou de forma mais complexa ao longo do tempo.

Os resíduos apresentaram uma variabilidade que oscilou entre -20 mm e +60 mm, o que sugere a presença de influências externas ou anomalias climáticas significativas que não foram capturadas pelas componentes de tendência e sazonalidade. Essa amplitude elevada indica que houve eventos extremos e inesperados que causaram desvios significativos da média esperada, especialmente com alguns anos apresentando picos muito acima do esperado para março. A variabilidade dos resíduos sugere que, ao longo

do período analisado, houve anos em que as chuvas extremas foram muito mais intensas do que a tendência e sazonalidade poderiam prever, destacando a presença de fatores climáticos ou meteorológicos específicos que influenciaram o regime de precipitação.

10. Estação Ponte do Rodrigues – Dezembro (↓)

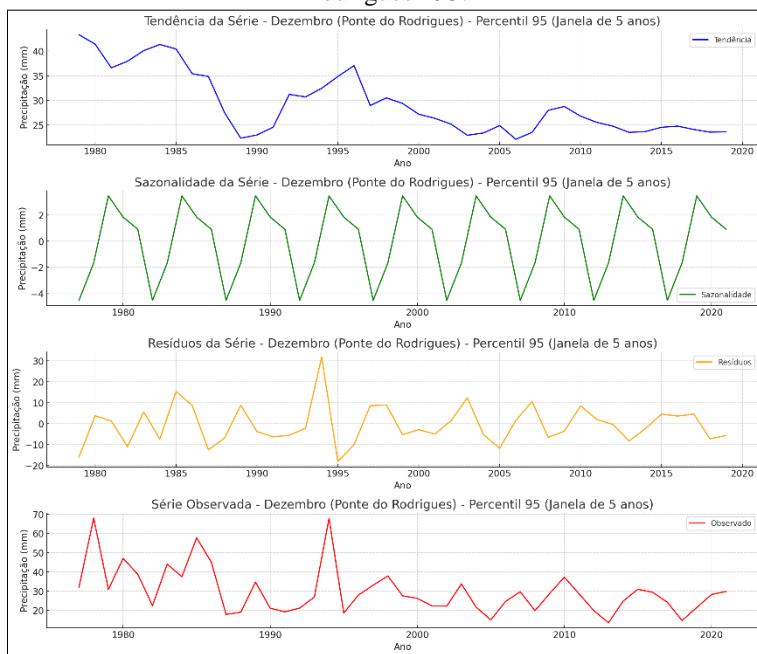
A Figura 4.9 mostra a decomposição para o mês de dezembro para a estação Ponte do Rodrigues no P95 usando uma janela de $k = 5$ anos.

A tendência de precipitação para o mês de dezembro na estação Ponte do Rodrigues, para o percentil 95, iniciou em torno de 45 mm no final da década de 1970. Ao longo do tempo, essa tendência mostrou uma prevalência de declínio, chegando a cerca de 20 mm nos anos mais recentes. Isso indica uma redução significativa na intensidade dos eventos extremos de precipitação para o mês de dezembro ao longo do período analisado, sugerindo uma mudança no regime de chuvas extremas ao longo dos anos.

A componente sazonal variou entre cerca de -4 mm e +2 mm ao longo do período analisado. Embora a amplitude sazonal não seja simétrica, ela manteve-se relativamente estável, indicando que os padrões sazonais continuaram a influenciar os eventos extremos de precipitação de forma consistente, mesmo com a redução da tendência geral.

Os resíduos apresentaram variações consideráveis, oscilando entre -20 mm e +30 mm, sugerindo a presença de influências externas ou anomalias que não foram capturadas pelas componentes de tendência e sazonalidade.

Figura 4.9 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de março na Estação Ponte do Rodrigues P95.



Fonte: A autora (2024).

4.3.2 ANÁLISES DA DECOMPOSIÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS COM TENDÊNCIAS SIGNIFICATIVAS DE AUMENTO PARA O P95

Nesse tópico serão analisadas a decomposição das séries temporais para algumas das estações que apresentaram tendências de aumento nos eventos de precipitação persistentes, ou seja, em vários meses diferentes.

1. Estação Santa bárbara – Fevereiro (↑)

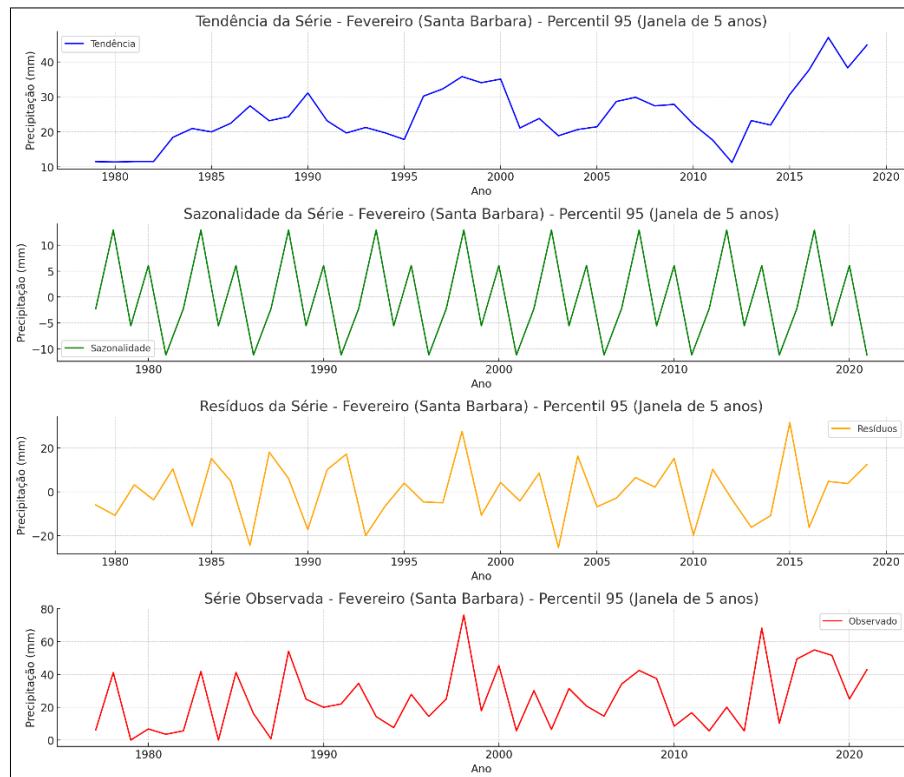
A Figura 4.10 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de fevereiro da estação Santa Bárbara no percentil 95.

A tendência da precipitação para o mês de fevereiro na estação Santa Barbara começou em torno de 10 mm no final dos anos 1970 e início dos anos 1980. Com o passar dos anos, a tendência apresentou um comportamento de aumento gradual, atingindo um pico próximo a 40 mm por volta de meados da década de 1990. Após esse pico, houve um período de flutuação, com a tendência diminuindo em alguns anos e depois voltando a subir nos anos recentes, atingindo novamente valores próximos a 40 mm no final do período analisado. Este comportamento sugere que houve períodos alternados de aumento e redução na intensidade dos eventos extremos de precipitação em fevereiro, com um crescimento mais notável na última década.

A componente sazonal apresentou uma variação que oscilou aproximadamente

entre -10 mm e +10 mm. Esse padrão sazonal se manteve bastante consistente ao longo dos anos, indicando que os ciclos sazonais influenciaram de forma previsível os eventos extremos de precipitação no mês de fevereiro. A presença dessa componente sazonal reforça que, independentemente das variações de tendência, existe um efeito sazonal que afeta a precipitação em fevereiro anualmente.

Figura 4.10 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de fevereiro na Estação Sta. Bárbara no P95.



Fonte: A autora (2024).

Os resíduos apresentaram flutuações que variaram entre -20 mm e +20 mm, indicando a presença de influências externas ou anomalias que não foram capturadas pelas componentes de tendência e sazonalidade. Ao longo do período analisado, os resíduos mantiveram certa variabilidade, sugerindo que fatores climáticos imprevisíveis ou eventos extremos contribuíram para variações na precipitação em fevereiro.

A série observada, mostrou variações significativas ao longo do período de análise. No início da série, a precipitação em fevereiro situava-se em torno de 10 mm a 20 mm, aumentando para picos acima de 50 mm em meados da década de 1990. Nos anos recentes, a série observada mostrou uma variação entre 20 mm e 60 mm, confirmando que os eventos extremos de precipitação em fevereiro tornaram-se mais intensos em determinados períodos.

2. Estação Santa bárbara – Março (↑)

A Figura 4.11 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de março da estação Santa Bárbara no percentil 95.

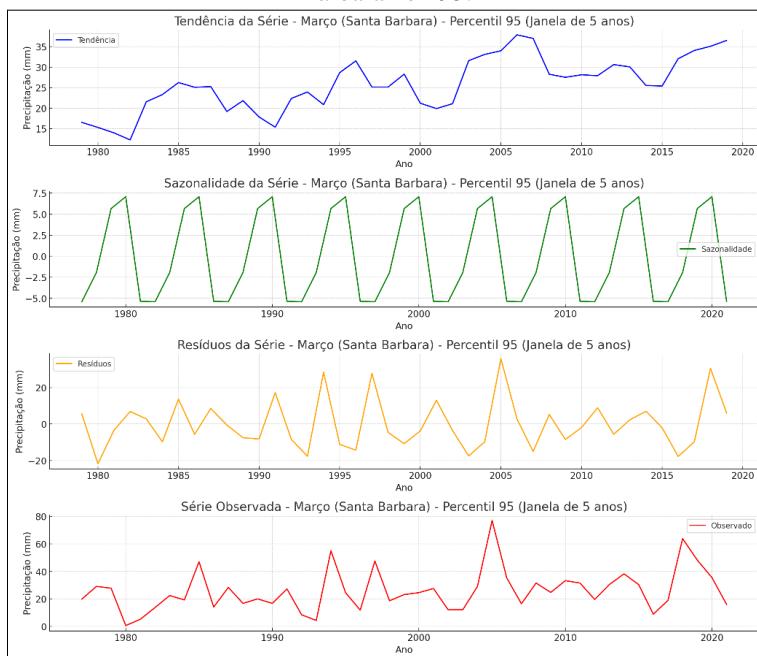
A tendência da precipitação para o mês de março na estação Santa Barbara começou em valores em torno de 15 mm no final dos anos 1970. Ao longo dos anos, a tendência apresentou um crescimento gradual, atingindo valores máximos de cerca de 35 mm no início dos anos 2000. Nos anos mais recentes, houve um leve aumento, com a tendência chegando a aproximadamente 30 mm. Esse comportamento indica que, houve um aumento geral na intensidade dos eventos extremos de precipitação em março, sugerindo que a estação tem experimentado eventos de precipitação mais intensos ao longo do período.

A componente sazonal mostrou uma amplitude que variou entre -2,5 mm e +7,5 mm. A amplitude sazonal se manteve relativamente constante ao longo do tempo, indicando que os padrões sazonais influenciaram de forma previsível os eventos extremos de precipitação em março. A presença de um padrão sazonal consistente indica que a sazonalidade desempenha um papel importante na variabilidade dos eventos de precipitação extrema.

Os resíduos apresentaram uma variabilidade significativa, oscilando entre -20 mm e +20 mm. Esta variação nos resíduos sugere a presença de influências externas ou anomalias climáticas que não foram capturadas pela tendência e sazonalidade. Em determinados anos, especialmente no final da série, os resíduos apresentaram picos positivos mais elevados, indicando eventos extremos que foram mais intensos do que o esperado.

A série observada, que combina a tendência, sazonalidade e resíduos, reflete a variabilidade dos eventos extremos ao longo do período. Inicialmente, a precipitação em março variava em torno de 15 a 30 mm, atingindo picos de até 60 mm em anos posteriores.

Figura 4.11 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de fevereiro na Estação Sta. Bárbara no P95.



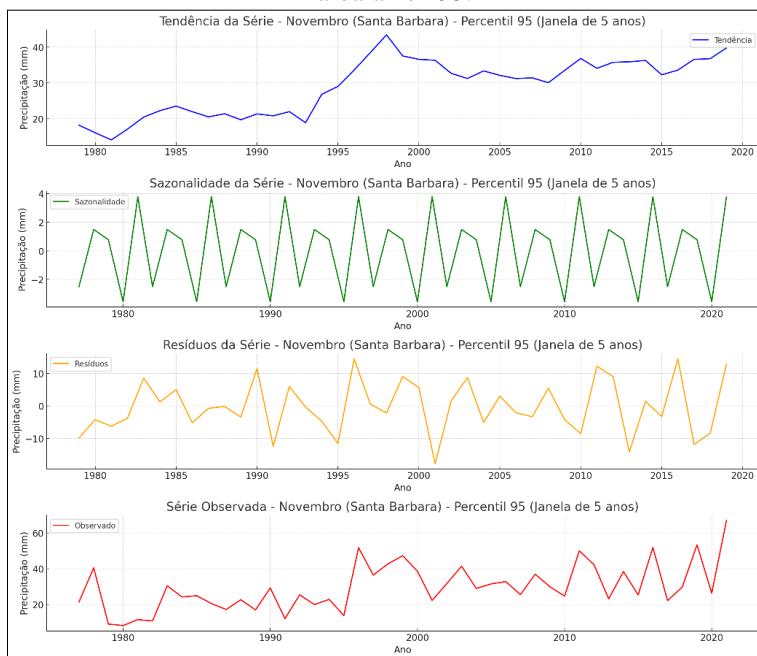
Fonte: A autora (2024).

3. Estação Santa bárbara – Novembro (↑)

A Figura 4.12 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de novembro da estação Santa Bárbara no percentil 95.

A tendência de precipitação para o mês de novembro na estação Santa Barbara começou em valores próximos a 10 mm no final dos anos 1970. A partir desse ponto, a tendência apresentou um aumento gradual ao longo do tempo, atingindo um pico de aproximadamente 40 mm por volta de meados da década de 1990. Após esse pico, houve uma leve oscilação na tendência, com alguns anos apresentando valores ligeiramente mais baixos, porém, mantendo-se em torno de 30 a 35 mm na maior parte dos anos recentes. Nos últimos anos, há uma leve recuperação em direção a valores próximos a 40 mm. Este comportamento indica que houve um aumento na intensidade dos eventos extremos de precipitação em novembro ao longo do período analisado, mas com certa estabilidade após a década de 1990.

Figura 4.12 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de novembro na Estação Sta. Bárbara no P95.



Fonte: A autora (2024).

A componente sazonal variou entre -2 mm e +4 mm ao longo do período. Essa variação relativamente constante da sazonalidade sugere que os efeitos sazonais tiveram um impacto previsível sobre os eventos extremos de precipitação em novembro. A amplitude sazonal não se alterou significativamente, o que indica que o componente sazonal manteve sua influência de forma estável ao longo dos anos.

Os resíduos apresentaram flutuações que variaram entre -15 mm e +20 mm, indicando a presença de influências externas ou anomalias climáticas que não foram capturadas pelas componentes de tendência e sazonalidade. Nos primeiros anos, os resíduos eram relativamente baixos, mas ao longo do tempo, a amplitude dos resíduos aumentou, principalmente a partir da década de 1990, sugerindo a ocorrência de eventos extremos que se desviaram da tendência esperada. A presença de resíduos positivos e negativos significativos indica que, em alguns anos, os eventos extremos de precipitação em novembro foram muito mais intensos ou menos intensos do que o esperado.

A série observada, mostrou variações consideráveis ao longo do período analisado. Inicialmente, os valores de precipitação em novembro estavam em torno de 20 mm, mas houve um aumento ao longo dos anos, atingindo picos de até 60 mm em alguns anos mais recentes. Essa variação sugere que os eventos extremos de precipitação em novembro se tornaram mais intensos, especialmente após a década de 1990, acompanhando parcialmente a tendência, mas também sendo influenciados pelos

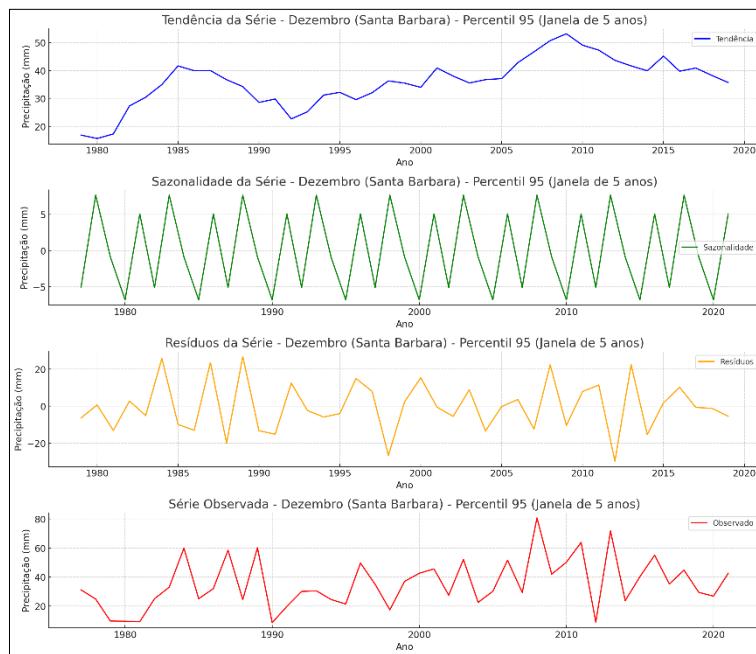
resíduos.

4. Estação Santa bárbara – Dezembro (↑)

A Figura 4.13 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de dezembro da estação Santa Bárbara no percentil 95.

A tendência da precipitação para o mês de dezembro na estação Santa Barbara começou em torno de 20 mm no final dos anos 1970. Houve um aumento gradual na tendência, atingindo um pico de aproximadamente 45 mm no início da década de 1990. Após atingir esse pico, a tendência apresentou flutuações ao longo dos anos, mantendo-se entre 35 mm e 45 mm até meados da década de 2010, onde atingiu cerca de 55mm, quando começou a declinar novamente, chegando em torno de 35 mm nos anos finais da série. Isso sugere que os eventos extremos de precipitação em dezembro tiveram uma intensificação na primeira metade do período analisado, seguidos por uma estabilização em níveis altos nos anos mais recentes.

Figura 4.13 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de dezembro na Estação Sta. Bárbara no P95.



Fonte: A autora (2024).

A componente sazonal variou de -5 mm a +5 mm ao longo do período. Essa amplitude sazonal manteve-se relativamente constante, indicando que os ciclos sazonais influenciaram de forma previsível os eventos extremos de precipitação em dezembro. Mesmo com as variações na tendência, o padrão sazonal se mostrou estável, reforçando

a presença de um ciclo sazonal que afeta os eventos extremos de precipitação de forma consistente todos os anos.

Os resíduos apresentaram flutuações que variaram entre -20 mm e +25 mm, sugerindo a presença de influências externas ou anomalias climáticas que não foram capturadas pelas componentes de tendência e sazonalidade. Observa-se uma maior variabilidade nos resíduos durante os primeiros anos da série (até o início da década de 1990), indicando a influência de fatores externos que afetaram a precipitação em dezembro. Nos anos mais recentes, a amplitude dos resíduos diminuiu, sugerindo que os eventos extremos se tornaram mais previsíveis.

A série observada, mostrou um comportamento de aumento nos eventos extremos de precipitação em dezembro, alcançando picos de até 60 mm em determinados anos, especialmente entre 1985 e 1995. Nos anos seguintes, houve uma estabilização na série observada, com os valores de precipitação situando-se entre 30 mm e 60 mm, apesar da aparente estabilização nos anos mais recentes ainda em valores mais altos que os do início da série.

5. Estação Desemboque – Fevereiro (↑)

A Figura 4.14 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de fevereiro da estação Desemboque no percentil 95.

A tendência de precipitação para o mês de fevereiro na estação Desemboque começou em torno de 25 mm no final dos anos 1970. Ao longo do tempo, a tendência apresentou um aumento gradual, atingindo valores próximos a 35 mm a 40 mm nos anos recentes, posteriormente apresentou uma queda e se manteve estável entre 25 mm e 30 mm até por volta de 2005, onde voltou a aumentar consideravelmente em poucos anos, atingindo novamente a casa dos 40 mm. Isso indica uma clara intensificação dos eventos extremos de precipitação nos últimos anos da série.

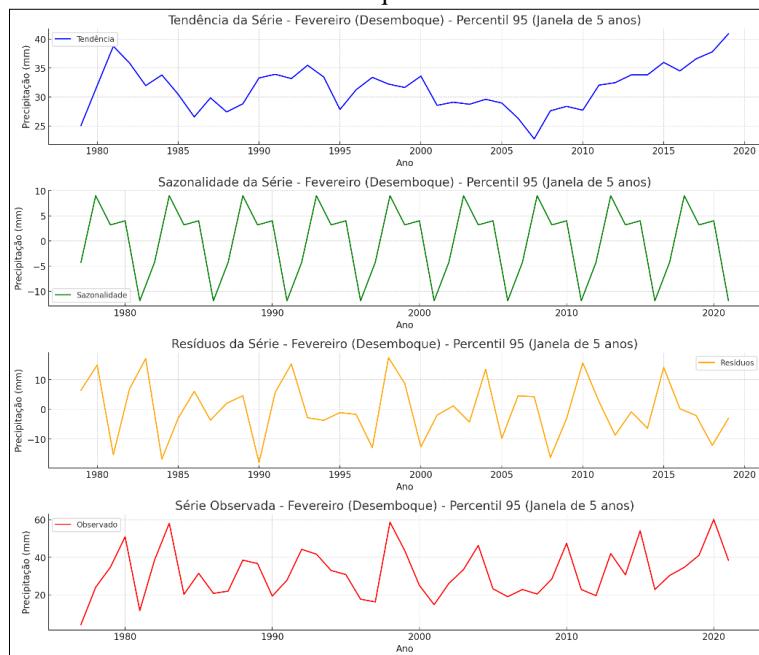
A componente sazonal variou de aproximadamente -10 mm a +10 mm ao longo do período. Este padrão sazonal permaneceu consistente e constante, mostrando que o ciclo sazonal teve uma influência previsível sobre os eventos extremos de precipitação em fevereiro, independentemente das variações na tendência.

Os resíduos apresentaram uma variação significativa, com valores oscilando entre -20 mm e +20 mm ao longo do tempo. Essa amplitude indica que, além da tendência e da sazonalidade, houve influências externas que impactaram os eventos extremos de

precipitação em fevereiro. A variação nos resíduos é notável e indica que, em certos anos, houve anomalias não capturadas pelas outras componentes.

A série observada reflete a combinação das três componentes e mostrou picos de precipitação que atingiram até 60 mm em determinados anos. A variabilidade da série observada reforça a presença de eventos extremos de precipitação em fevereiro, com um aumento na intensidade ao longo dos anos.

Figura 4.14 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de fevereiro na Estação Desemboque no P95.



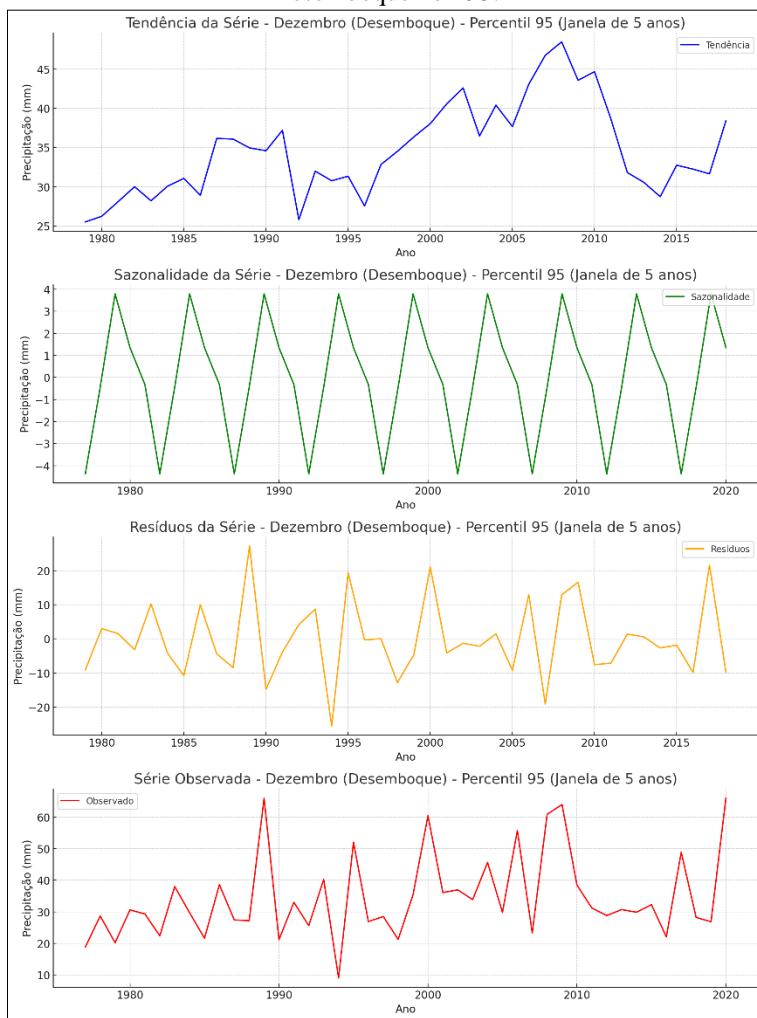
Fonte: A autora (2024).

A Figura 4.15 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de dezembro da estação Desemboque no percentil 95.

A tendência mostra uma variação significativa ao longo do tempo, com alguns períodos de aumento seguidos de declínios. Entre 1977 e 1995, há uma tendência crescente, culminando em um pico por volta de 2010, onde o valor do percentil 95 atinge valores superiores à 45 mm. Entre 2010 e 2016, a tendência apresenta um declínio acentuado, caindo para valores em torno de 30 mm. E a partir de 2016, nota-se um leve aumento, indicando uma possível recuperação no regime de chuvas extremas na série.

Essa variação sugere que houve mudanças significativas nos padrões de precipitação durante esses anos, possivelmente influenciadas por variáveis climáticas, como El Niño e La Niña, ou mudanças climáticas regionais.

Figura 4.15 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de fevereiro na Estação Desemboque no P95.



Fonte: A autora (2024).

O ciclo sazonal é caracterizado por um padrão repetitivo, com amplitudes entre -4 mm e +4 mm ao longo de toda a série. Isso indica que, para o mês de dezembro, há uma variação sazonal nos valores do percentil 95, mas essa variação não é muito ampla, sugerindo que o comportamento sazonal está relativamente estável ao longo dos anos. A sazonalidade tende a capturar variações periódicas de menor amplitude, que podem estar relacionadas aos padrões de precipitação esperados no verão (mês de dezembro), quando a estação chuvosa na região central do país normalmente atinge seu pico.

Há algumas variações significativas nos resíduos, com oscilações que variam de -20 mm a +20 mm, especialmente nos anos 1980 e 1990. Isso pode estar associado a eventos climáticos extremos não capturados pela sazonalidade e pela tendência, como tempestades intensas ou secas severas. Os resíduos tendem a ser mais elevados nos primeiros anos da série e apresentam uma oscilação maior, o que pode indicar que eventos extremos inesperados ocorreram com mais frequência ou intensidade nesse período.

A análise dos resíduos sugere que, apesar de capturarmos parte da variação por meio da tendência e sazonalidade, ainda há um comportamento aleatório ou *outliers* que precisam ser explicados por fatores adicionais ou por eventos climáticos extremos.

A série original mostra variações consideráveis nos valores de precipitação ao longo do tempo, com picos marcantes, especialmente nos anos 1989, 2006, e 2020, quando o percentil 95 atinge valores muito elevados (acima de 60 mm). Os anos entre 2000 e 2010 mostraram maiores oscilações com valores frequentemente acima de 40 mm. Nos anos entre 2010 e 2016, os valores observados caem consideravelmente, com alguns anos apresentando percentis menores, em torno de 25 a 30 mm.

4.3.3 ANÁLISES DA DECOMPOSIÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS COM TENDÊNCIAS SIGNIFICATIVAS DE DIMINUIÇÃO NO P99

Nesse tópico serão analisadas as estações que apresentaram maiores taxas de variação (*slope*), ao longo da série e se mostraram persistentes para dois ou mais meses dentre os que foram analisados no capítulo anterior sobre estacionariedade, tendências e magnitudes.

As análises serão realizadas para as mesmas estações com tendência significativa de diminuição do tópico anterior, para o percentil 95, Pedro Versiani, Pirapama e Pedro Rodrigues, as quais apresentaram as maiores taxas de variação por ano para cada mês em questão, além de persistirem em diferentes meses. O objetivo desse tópico é avaliar quais estações e meses mostram comportamentos que devem servir de “alerta” na gestão de recursos hídricos e prevenção de desastres, porém ainda devem ser analisadas criteriosamente em diversos aspectos.

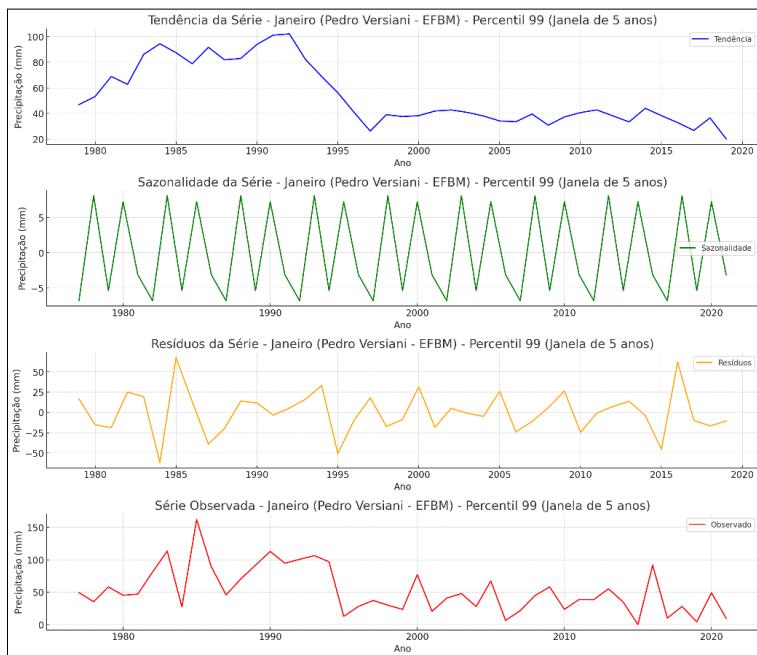
1. Estação Pedro Versiani – Janeiro (↓)

A Figura 4.16 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de janeiro da estação Pedro Versiani no percentil 99.

A tendência começou em torno de 40 mm e subiu para um pico de cerca de 100 mm em meados dos anos 1980. A partir do início dos anos 1990, houve uma queda acentuada, e a tendência continuou a cair até atingir valores em torno de 40 mm no final da série e nos últimos continua sua queda até 20 mm. Isso indica que houve uma diminuição significativa na tendência de precipitação extrema ao longo do tempo no percentil 99 para janeiro. Como no teste de estacionariedade, o mês de janeiro mostrou

um comportamento não estacionário em sua série temporal, podendo ser claramente constatado pelos gráficos de decomposição, verificando que entre 1993 e 1997 houve uma mudança brusca na tendência (com declínio), sugerindo uma mudança nos padrões de precipitações intensas.

Figura 4.16 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de janeiro na Estação Pedro Versiani no P99.



Fonte: A autora (2024).

A componente sazonal variou de aproximadamente -5 mm a +5 mm, e manteve-se constante ao longo dos anos. A consistência na amplitude sazonal mostra que, mesmo com as mudanças na tendência, o padrão sazonal dos eventos extremos de precipitação em janeiro permaneceu estável ao longo do período.

Os resíduos apresentam variações entre aproximadamente -25 mm e +25 mm, com picos mais intensos, entre -50 mm e +50 mm nos anos 1980 e uma diminuição nas flutuações nas últimas décadas. Isso sugere que, embora os eventos extremos tenham sido afetados por variáveis externas nos primeiros anos, esses efeitos se tornaram menos pronunciados ao longo do tempo, indicando uma redução na variabilidade imprevisível.

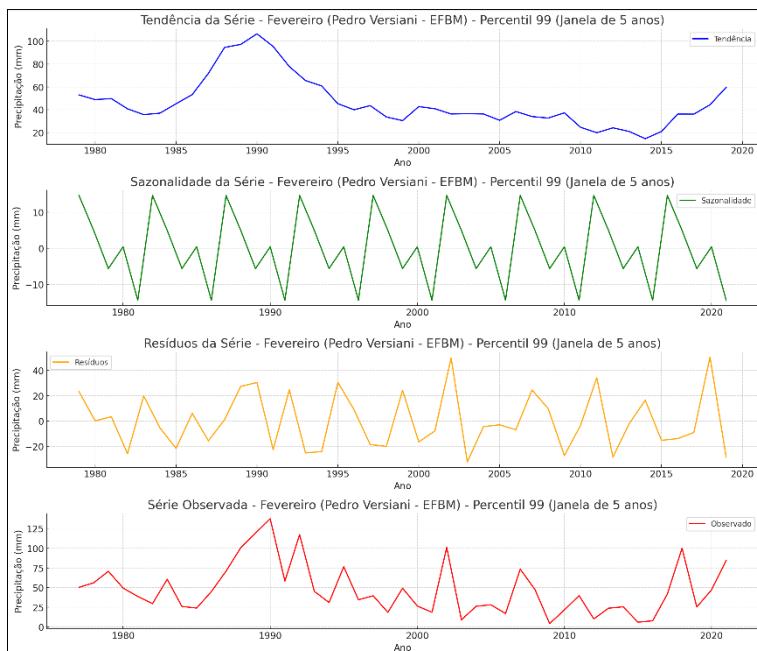
2. Estação Pedro Versiani – Fevereiro (↓)

A Figura 4.17 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de fevereiro da estação Pedro Versiani no percentil 99.

A tendência começou em torno de 60 mm no início da série. Houve um aumento

gradual até atingir um pico de aproximadamente 100 mm no início dos anos 1990. Após esse pico, a tendência caiu novamente para cerca de 40 mm em meados dos anos 2000, mas apresentou um leve aumento nos anos mais recentes, subindo para cerca de 60 mm. Essa variação sugere que houve períodos de aumento e diminuição nos eventos extremos de precipitação, refletindo as possíveis mudanças climáticas ou anomalias durante o período analisado.

Figura 4.17 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de janeiro na Estação Pedro Versiani no P99.



Fonte: A autora (2024).

A componente sazonal variou de -10 mm a +10 mm, mantendo-se relativamente constante ao longo dos anos. Isso indica que o padrão sazonal para os eventos extremos de precipitação em fevereiro manteve-se estável e previsível ao longo dos anos, independentemente das variações na tendência. Mostrando o mesmo comportamento do P95, porém com magnitudes menores, o que já era esperado.

Os resíduos mostraram variações entre -20 mm e +40 mm, com picos notáveis especialmente ao redor dos anos 1990 e início dos anos 2000. Isso indica que houve influências externas e anomalias climáticas que não foram explicadas pelas componentes de tendência e sazonalidade. Nos anos mais recentes, a amplitude dos resíduos aumentou novamente, sugerindo variabilidade climática ou eventos extremos que não seguem a tendência geral ou o padrão sazonal.

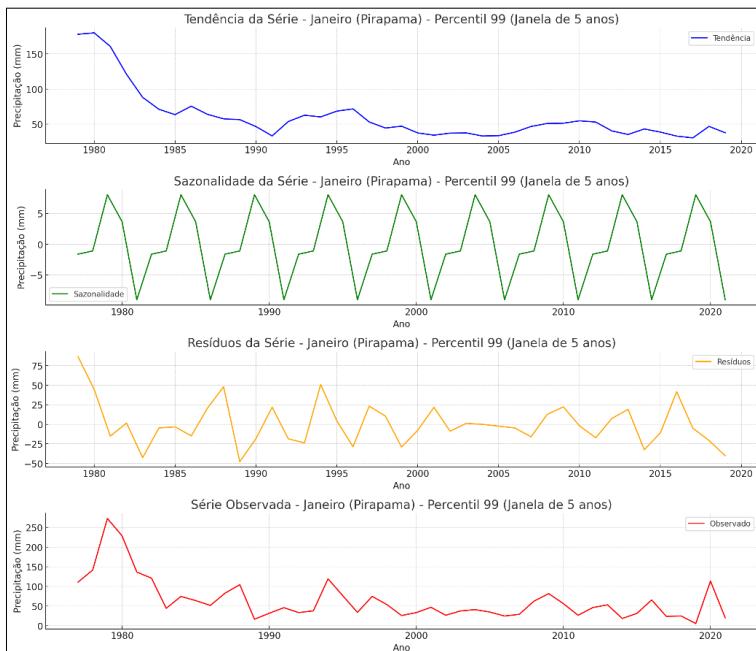
A série observada mostra uma variação significativa, com picos de precipitação

extrema ocorrendo em torno de 1990 e em alguns anos recentes.

3. Estação Pirapama – Janeiro (↓)

A Figura 4.18 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de janeiro da estação Pirapama no percentil 99.

Figura 4.18 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de janeiro na Estação Pirapama no P99.



Fonte: A autora (2024).

A tendência de precipitação começou com valores acima de 150 mm nos primeiros anos da série (final da década de 1970). Houve uma queda acentuada ao longo do tempo, e a tendência se estabilizou em torno de 50 a 60 mm a partir do início dos anos 1990. Essa redução significativa na tendência ao longo do tempo sugere uma diminuição contínua dos eventos extremos de precipitação ao longo das últimas décadas.

A componente sazonal apresentou uma variação de aproximadamente -10 mm a +10 mm ao longo dos anos. O padrão sazonal foi relativamente consistente durante todo o período analisado, indicando que, apesar da queda na tendência, os ciclos sazonais influenciaram de forma previsível os eventos extremos de precipitação em janeiro.

Os resíduos mostraram variações entre aproximadamente -50 mm e +75 mm, com alguns picos mais acentuados nos primeiros anos. A variabilidade dos resíduos diminuiu ao longo do tempo, sugerindo que os fatores externos imprevisíveis que afetaram os eventos extremos de precipitação se tornaram menos influentes em anos recentes.

A série observada refletiu a tendência e os padrões sazonais, com valores mais altos no início da série e uma redução clara ao longo do tempo. Os picos de precipitação extrema eram mais frequentes e intensos no final dos anos 1970 e início dos anos 1980, enquanto, em anos mais recentes, esses picos foram menos pronunciados.

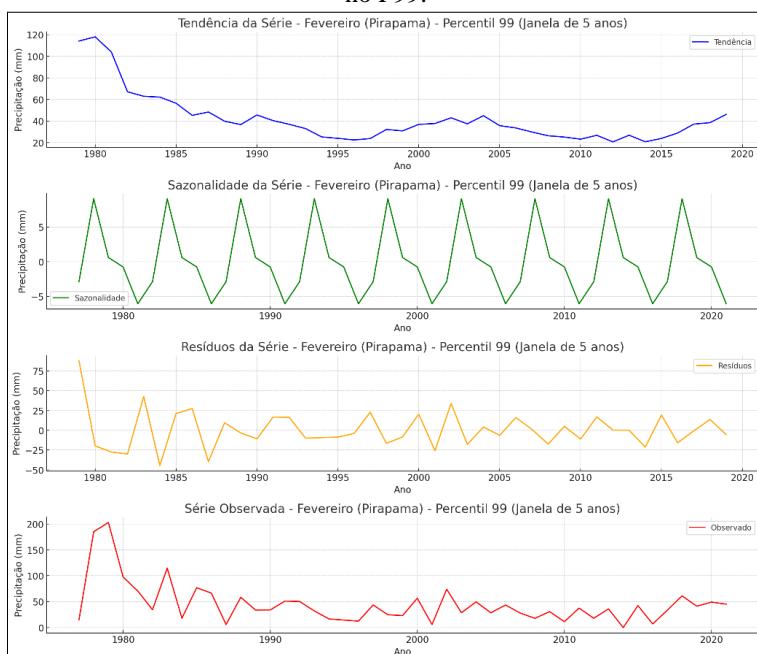
4. Estação Pirapama – Fevereiro (↓)

A Figura 4.19 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de fevereiro da estação Pirapama no percentil 99.

A tendência de precipitação iniciou-se com valores em torno de 120 mm no final dos anos 1970, com uma queda contínua e acentuada até a metade da década de 1990, quando a tendência atingiu valores próximos a 20 mm. Após esse período, a tendência se estabilizou em torno de 20 a 30 mm até o final da série, com um leve aumento nos últimos anos. Isso sugere uma redução significativa nos eventos extremos de precipitação ao longo do tempo, estabilizando-se em níveis mais baixos nos anos recentes.

A componente sazonal apresentou uma variação constante de aproximadamente -5 mm a +5 mm ao longo dos anos. Essa consistência indica que o padrão sazonal permaneceu previsível durante todo o período analisado, mesmo com a queda na tendência.

Figura 4.19 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de fevereiro na Estação Pirapama no P99.



Fonte: A autora (2024).

Os resíduos mostraram variações consideráveis, oscilando entre -50 mm e +75 mm. Observamos picos mais acentuados no final dos anos 1970 e início dos anos 1980, enquanto nos anos posteriores a amplitude das variações residuais diminuiu. Isso sugere que os fatores externos que influenciaram a precipitação extrema tornaram-se menos intensos ou menos frequentes ao longo do tempo.

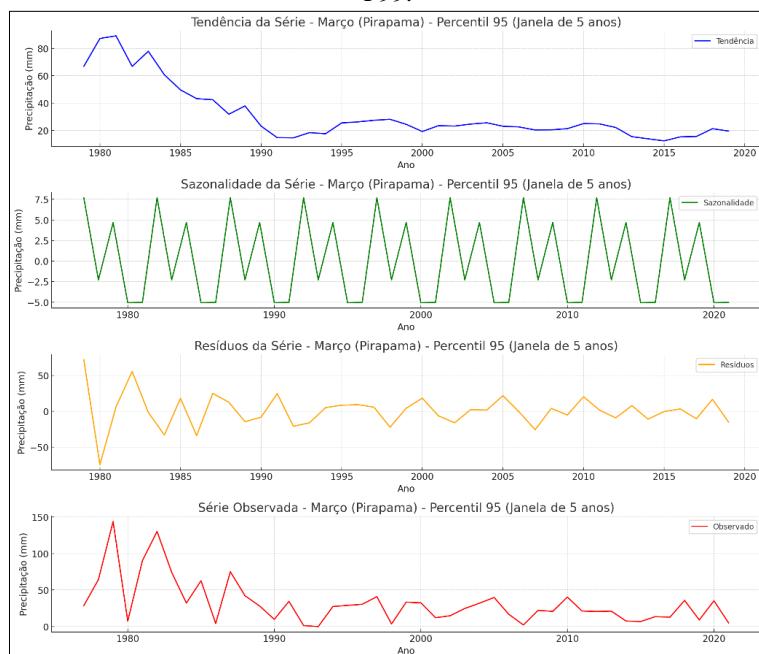
A série observada mostra que os picos de precipitação extrema eram significativamente mais altos no final dos anos 1970 e início dos anos 1980, atingindo valores próximos a 200 mm. Após a queda inicial, os valores de precipitação extrema observados mantiveram-se em níveis bem mais baixos, em torno de 50 a 100 mm.

5. Estação Pirapama – Março (↓)

A Figura 4.20 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de março da estação Pirapama no percentil 99.

A tendência começou em torno de 120 mm no final dos anos 1970 e início dos anos 1980. Houve uma queda acentuada ao longo dos anos 1980, e a tendência atingiu valores em torno de 50 mm na década de 1990. Nos anos recentes, a tendência manteve-se relativamente constante em torno de 20 mm a 30 mm, indicando uma estabilização dos eventos extremos de precipitação em níveis mais baixos em comparação com os anos iniciais da série.

Figura 4.20 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de março na Estação Pirapama no P99.



Fonte: A autora (2024).

A componente sazonal mostrou uma variação constante entre -5 mm e +7,5 mm ao longo dos anos, mantendo um padrão sazonal estável e previsível. Isso sugere que, independentemente das variações na tendência, o efeito sazonal dos eventos extremos de precipitação em março manteve-se constante durante o período analisado.

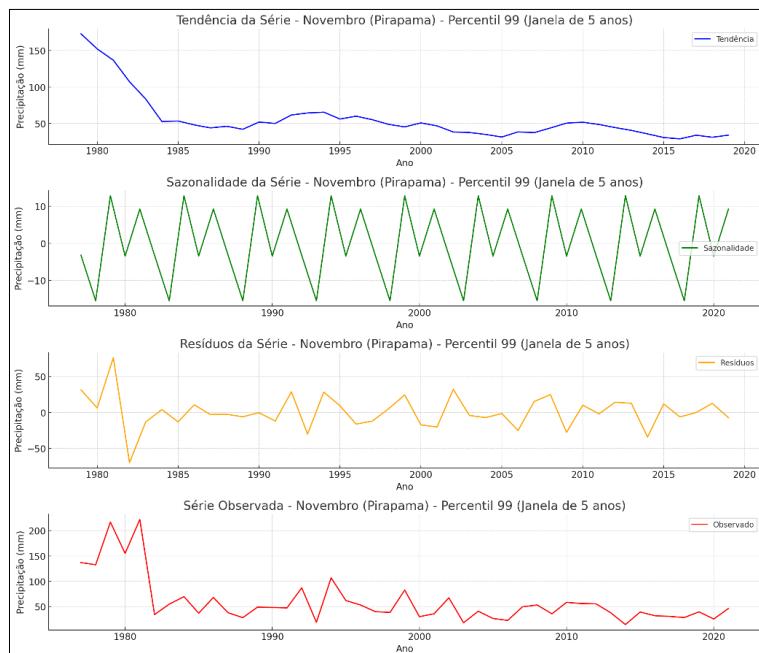
Os resíduos apresentaram flutuações entre -50 mm e +50 mm, com os maiores picos observados no final da década de 1970 e início da década de 1980. A variabilidade dos resíduos diminuiu significativamente ao longo do tempo, indicando que as influências externas nos eventos extremos de precipitação se tornaram menos intensas ou menos frequentes em anos recentes.

A série observada mostrou picos significativos de precipitação extrema nos primeiros anos da série, com valores que chegaram a ultrapassar 200 mm. Ao longo do tempo, esses picos diminuíram, e a série observada se estabilizou em torno de 30 mm nos anos recentes.

6. Estação Pirapama – Novembro (↓)

A Figura 4.21 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de novembro da estação Pirapama no percentil 99.

Figura 4.21 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de novembro na Estação Pirapama no P99.



Fonte: A autora (2024).

A tendência iniciou-se com valores elevados, em torno de 150 mm no final dos anos 1970. A partir do início da década de 1980, houve uma queda acentuada na tendência, estabilizando-se em torno de 20 mm a 40 mm a partir do final dos anos 1980 até o final da série. Essa diminuição sugere uma redução significativa dos eventos extremos de precipitação ao longo do tempo, especialmente nas primeiras duas décadas.

A componente sazonal variou aproximadamente de -10 mm a +10 mm e manteve esse padrão durante todo o período analisado. Isso indica que o ciclo sazonal dos eventos extremos de precipitação em novembro foi consistente e previsível, mesmo com as mudanças na tendência ao longo do tempo.

Os resíduos apresentaram flutuações entre -50 mm e +50 mm, com picos mais acentuados nos primeiros anos da série. A amplitude dos resíduos diminuiu consideravelmente nos anos seguintes, sugerindo que as influências externas sobre os eventos extremos se tornaram menos intensas ao longo do tempo.

A série observada mostra que, no final dos anos 1970 e início dos anos 1980, os eventos extremos de precipitação atingiram picos próximos a 200 mm. Posteriormente uma queda acentuada na primeira metade da década de 1980 é observada, diminuindo para valores próximos de 50 mm. Nos anos recentes, esses valores máximos de precipitação extrema reduziram-se e estabilizaram-se em torno de 20 a 60 mm.

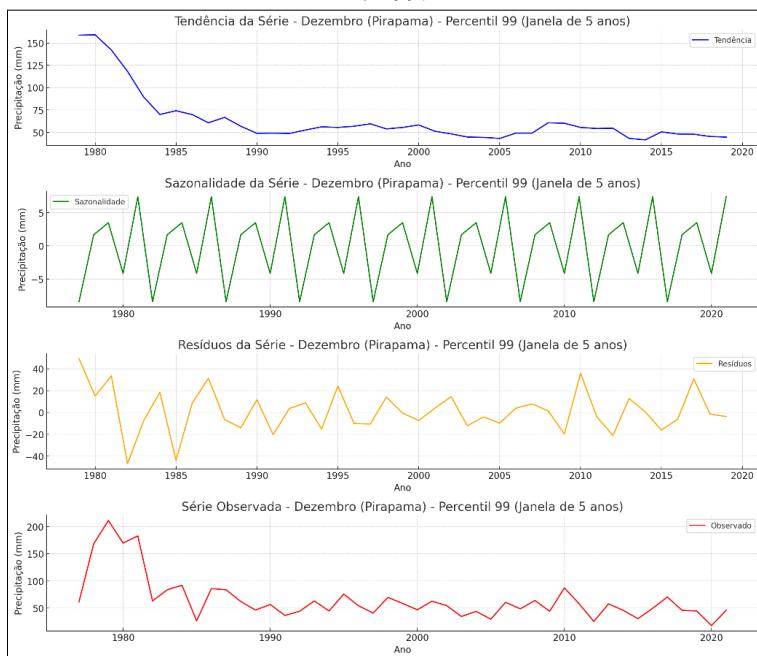
7. Estação Pirapama – Dezembro (↓)

A Figura 4.22 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de dezembro da estação Pirapama no percentil 99.

A tendência começou em um patamar elevado, em torno de 150 mm no final dos anos 1970. Houve uma queda acentuada ao longo dos anos 1980, chegando a cerca de 30 mm no início da década de 1990. Nos anos recentes, a tendência manteve-se relativamente estável em torno de 20 a 30 mm. Isso indica que os eventos extremos de precipitação em dezembro diminuíram significativamente ao longo do período e estabilizaram-se em um nível muito mais baixo nos últimos anos.

A componente sazonal apresentou uma variação constante entre -5 mm e +5 mm durante todo o período. A presença desse padrão sazonal sugere que, apesar da redução na tendência, o ciclo sazonal continuou a influenciar de forma consistente os eventos extremos de precipitação em dezembro.

Figura 4.22 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de dezembro na Estação Pirapama no P99.



Fonte: A autora (2024).

Os resíduos mostraram flutuações variando entre -40 mm e +40 mm, com picos mais acentuados na década de 1980. A amplitude dos resíduos diminuiu ao longo do tempo, indicando que os fatores externos que contribuíram para variações extremas nos primeiros anos da série foram menos influentes nos anos recentes.

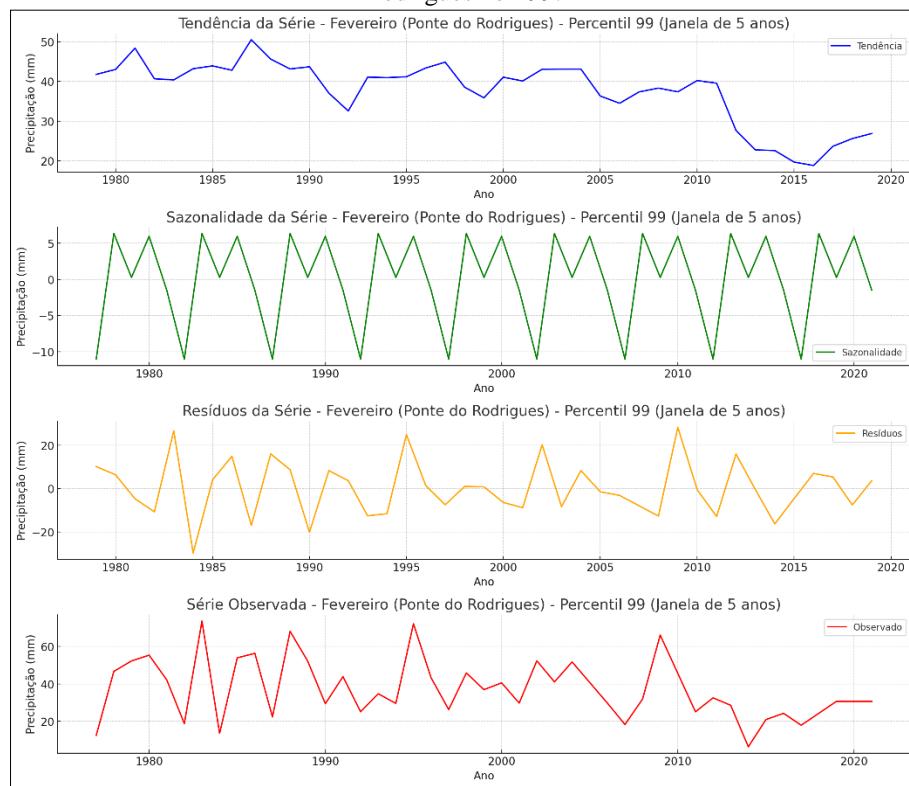
A série observada refletiu as tendências gerais de queda, com picos de precipitação extrema de até 150 mm no final dos anos 1970, reduzindo-se para valores que raramente ultrapassaram 50 mm nos anos recentes.

8. Estação Ponte do Rodrigues – Fevereiro (↓)

A Figura 4.23 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de dezembro da estação Ponte do Rodrigues no percentil 99.

A tendência iniciou-se com valores em torno de 40 mm a 50 mm no final da década de 1970 e início dos anos 1980. Ao longo do tempo, a tendência mostrou pequenas flutuações, mas se manteve estável na faixa de 40 a 50 mm até meados dos anos 2010. Nos últimos anos da série, houve uma queda acentuada na tendência, atingindo valores em torno de 30 mm antes de apresentar uma leve recuperação. Essa variação indica que os eventos extremos de precipitação foram relativamente estáveis ao longo do período, com uma queda mais acentuada nos anos recentes.

Figura 4.23 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de fevereiro na Estação Ponte do Rodrigues no P99.



Fonte: A autora (2024).

A componente sazonal apresentou uma variação constante entre -10 mm e +5 mm, mantendo um padrão sazonal previsível ao longo de toda a série. Esse padrão sazonal indica que, independentemente das variações na tendência, os eventos extremos de precipitação em fevereiro foram influenciados por ciclos sazonais que permaneceram consistentes.

Os resíduos mostraram flutuações que variaram entre -20 mm e +20 mm, com picos mais acentuados nos primeiros anos da série. Houve uma pequena diminuição na amplitude dos resíduos ao longo do tempo, sugerindo que as influências externas sobre os eventos extremos de precipitação foram mais intensas nos anos iniciais e se tornaram menos frequentes nos anos recentes.

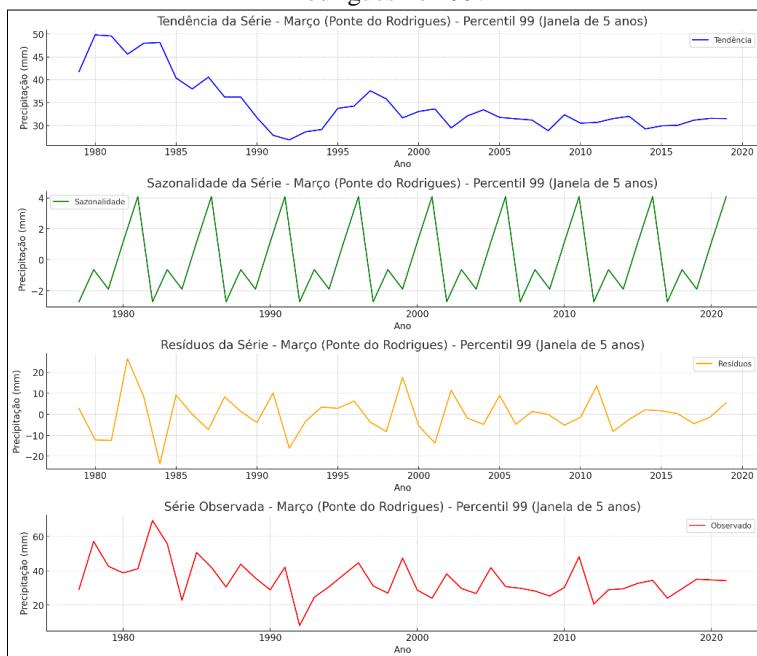
A série observada reflete um padrão de precipitação extrema que foi relativamente constante, com valores próximos de 60 mm em alguns anos, especialmente no final da década de 1970 e início da década de 1980. Nos anos recentes, os valores observados se estabilizaram em um patamar mais baixo, em torno de 30 a 40 mm.

9. Estação Ponte do Rodrigues – Março (↓)

A Figura 4.24 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série

observada para o mês de março da estação Ponte do Rodrigues no percentil 99.

Figura 4.24 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de março na Estação Ponte do Rodrigues no P99.



Fonte: A autora (2024).

A tendência iniciou-se com valores em torno de 40 mm no final da década de 1970. Houve uma flutuação ao longo do tempo, com a tendência subindo para cerca de 50 mm na década de 1980, e depois diminuindo gradualmente. Nos anos recentes, a tendência estabilizou-se em torno de 30 mm, indicando uma leve diminuição dos eventos extremos de precipitação em março ao longo do período.

A componente sazonal apresentou uma variação constante de aproximadamente -2 mm a +4 mm ao longo do tempo. Este padrão sazonal indica que, apesar das variações na tendência, os eventos extremos de precipitação em março foram influenciados por ciclos sazonais que permaneceram consistentes.

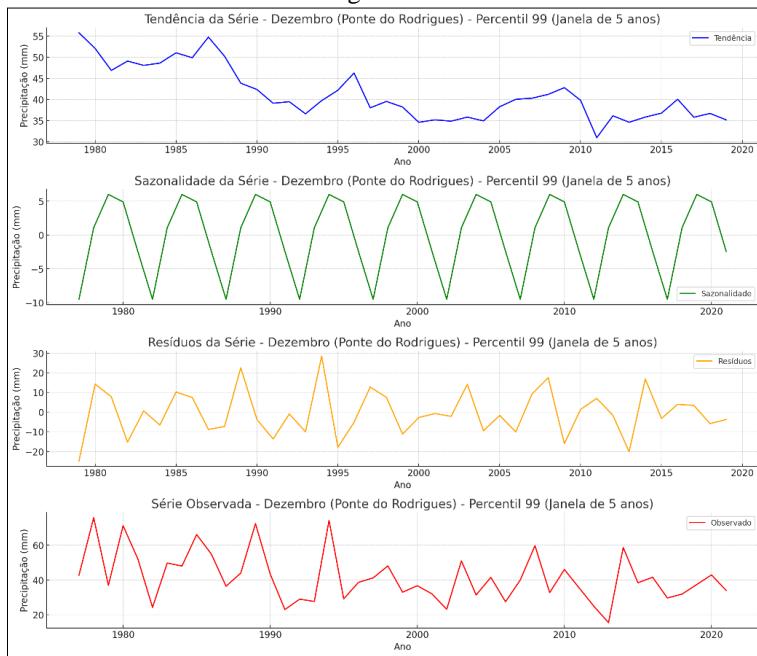
Os resíduos apresentaram flutuações significativas, variando de -30 mm a +30 mm, com picos mais pronunciados nos anos iniciais da série. A amplitude dos resíduos diminuiu ao longo do tempo, sugerindo que os fatores externos que influenciaram os eventos extremos de precipitação foram mais intensos nos primeiros anos e se tornaram menos frequentes nos anos recentes.

A série observada refletiu a tendência e os padrões sazonais, com picos de precipitação extrema mais altos no início da série e uma diminuição ao longo dos anos. Nos anos mais recentes, os valores observados estabilizaram-se em torno de 30 mm, indicando uma diminuição da intensidade dos eventos extremos de precipitação.

10. Estação Ponte do Rodrigues – Dezembro (↓)

A Figura 4.25 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de dezembro da estação Ponte do Rodrigues no percentil 99.

Figura 4.25 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de dezembro na Estação Ponte do Rodrigues no P99.



Fonte: A autora (2024).

A tendência iniciou-se em torno de 55 mm no final da década de 1970. Houve uma oscilação ao longo do tempo, com uma leve queda até os anos 1990, atingindo aproximadamente 35 mm. Posteriormente, a tendência apresentou alguns picos e vales, mas no geral manteve-se em níveis mais baixos em relação ao início da série. A tendência nos últimos anos estabilizou-se na faixa de 35 a 45 mm, indicando uma possível estabilização nos eventos extremos de precipitação no período recente.

A componente sazonal variou de aproximadamente -10 mm a +5 mm e manteve-se bastante constante ao longo do período. Este padrão sazonal demonstra que os ciclos sazonais têm um papel previsível na série, influenciando a variabilidade dos eventos extremos de precipitação de forma consistente, com picos sazonais mais negativos em comparação com os positivos, indicando um padrão sazonal que impactou os eventos extremos de precipitação de maneira consistente.

Os resíduos realmente apresentaram variações que oscilaram entre -20 mm e +30 mm ao longo do período analisado. Essa amplitude sugere que houve uma variabilidade considerável que não foi explicada pelas componentes de tendência e sazonalidade. Os

picos mais pronunciados nos resíduos indicam que, em determinados anos, houve eventos extremos que não se enquadram no padrão sazonal ou de tendência previsto. Houve picos mais pronunciados em determinados anos, principalmente nas décadas de 1980 e 1990, sugerindo a presença de fatores externos que afetaram os eventos extremos de precipitação. Nos anos recentes, a amplitude dos resíduos se manteve um pouco mais estável, indicando uma possível redução da influência de eventos climáticos inesperados.

4.3.4 ANÁLISES DA DECOMPOSIÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS COM TENDÊNCIAS SIGNIFICATIVAS DE AUMENTO NO P99

Neste tópico serão analisadas a decomposição das séries temporais para algumas estações que apresentaram tendências de aumento nos eventos de precipitação e que se mostraram persistentes, ou seja, que mostraram tendências em vários meses diferentes no percentil 99, além das maiores magnitudes. As estações foram selecionadas utilizando como critério a persistência e a magnitude das tendências com base nos estudos do capítulo anterior. Aqui serão analisadas as estações Santa Barbara e Torrões para os meses em que apresentaram tendências de aumento.

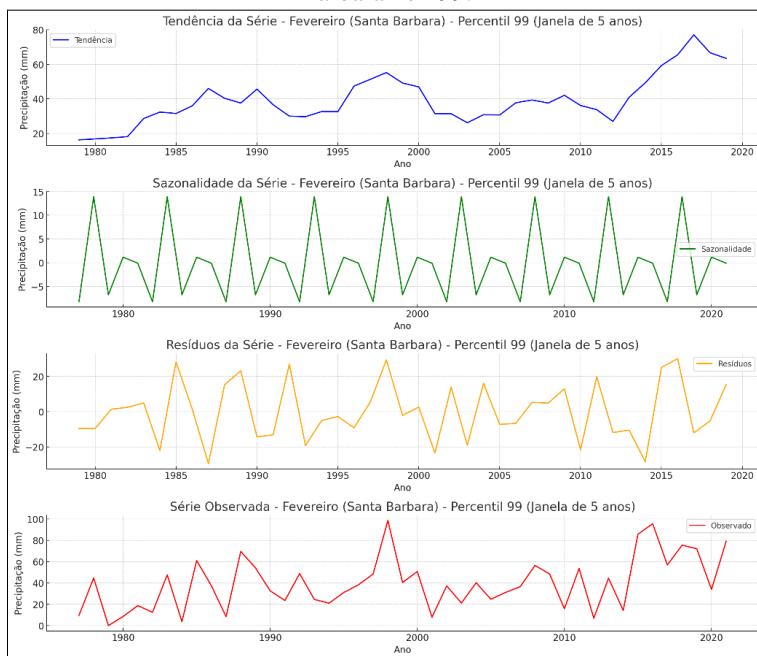
1. Estação Santa Bárbara – Fevereiro (↑)

A Figura 4.26 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de fevereiro da estação Santa Bárbara no percentil 99.

A tendência começou em torno de 20 mm no final dos anos 1970 e subiu para aproximadamente 40 a 60 mm ao longo da série, com picos mais evidentes na década de 1990 e em anos recentes. O aumento na tendência sugere que os eventos extremos de precipitação em fevereiro se tornaram mais frequentes ou intensos ao longo do período, especialmente após a primeira metade da década de 2010.

A componente sazonal variou de aproximadamente -5 mm a +15 mm, mantendo-se consistente durante todo o período analisado. Isso indica que a influência sazonal sobre os eventos extremos de precipitação em fevereiro é relativamente estável e previsível, independentemente das variações na tendência.

Figura 4.26 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de fevereiro na Estação Santa Bárbara no P99.



Fonte: A autora (2024).

Os resíduos mostraram variações que oscilaram entre -20 mm e +20 mm, com picos mais evidentes na década de 1980 e em anos recentes. A amplitude dos resíduos manteve-se relativamente constante ao longo do período, sugerindo que houve fatores externos que afetaram a precipitação de maneira significativa em alguns anos, mas que a influência desses fatores não diminuiu com o tempo.

A série observada apresentou picos de precipitação extrema de até 80 a 100 mm em vários anos, indicando eventos de precipitação intensa no mês de fevereiro. Houve uma tendência de aumento na precipitação máxima observada ao longo do tempo, alinhando-se com a tendência geral de aumento.

2. Estação Santa Bárbara – Março (↑)

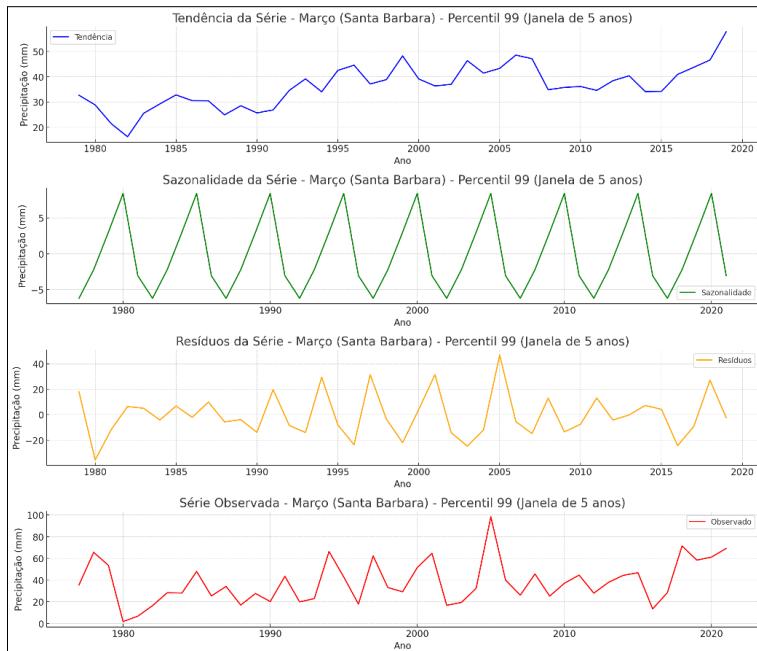
A Figura 4.27 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de março da estação Santa Bárbara no percentil 99.

A tendência começou em torno de 30 mm no final dos anos 1970 e aumentou progressivamente ao longo do tempo, chegando a 50 mm em anos mais recentes. Esse aumento indica que os eventos extremos de precipitação no mês de março tornaram-se mais frequentes ou intensos ao longo do período analisado.

A componente sazonal variou aproximadamente de -5 mm a +10 mm, mantendo-se consistente durante todo o período. A influência sazonal foi bastante constante,

reforçando que os efeitos sazonais tiveram um papel importante e previsível nos eventos extremos de precipitação em março.

Figura 4.27 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de março na Estação Santa Bárbara no P99.



Fonte: A autora (2024).

Os resíduos apresentaram variações que oscilaram entre -20 mm e +40 mm ao longo do período analisado. Os picos nos resíduos sugerem a presença de fatores externos que não foram capturados pelas componentes de tendência e sazonalidade, indicando variações climáticas imprevisíveis em determinados anos.

A série observada mostrou picos de precipitação que chegaram a 100 mm em alguns anos, particularmente após os anos 2000, sugerindo a ocorrência de eventos de precipitação extrema ao longo da série.

3. Estação Santa Bárbara – Novembro (↑)

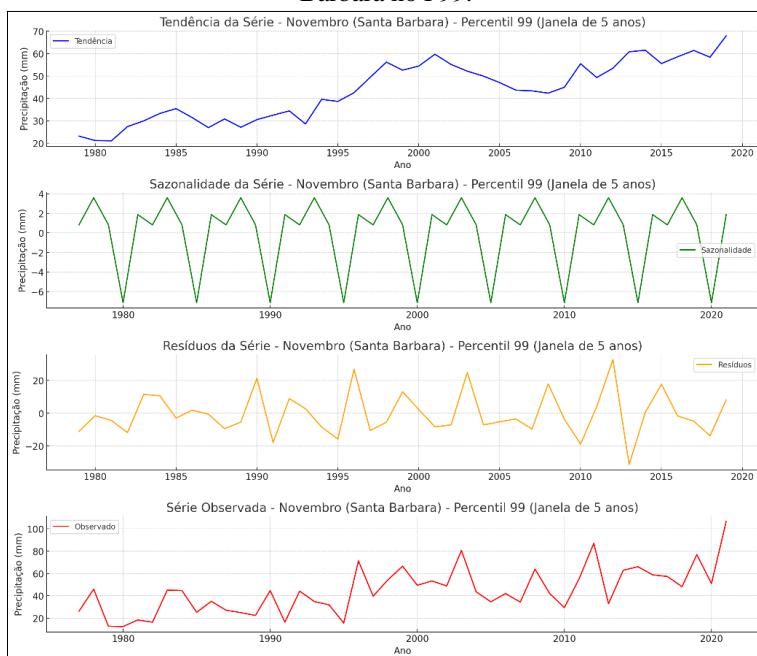
A Figura 4.28 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de novembro da estação Santa Bárbara no percentil 99.

A tendência começou em torno de 20 mm no final dos anos 1970 e aumentou ao longo do tempo, atingindo cerca de 60 a 70 mm nos anos mais recentes. Esse aumento na tendência indica que os eventos extremos de precipitação no mês de novembro tornaram-se mais intensos ou frequentes ao longo do período analisado.

A componente sazonal variou de aproximadamente -6 mm a +4 mm, mantendo

um padrão consistente ao longo de toda a série. Isso indica que a sazonalidade teve um papel constante e previsível nos eventos extremos de precipitação em novembro.

Figura 4.28 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de novembro na Estação Santa Bárbara no P99.



Fonte: A autora (2024).

Os resíduos apresentaram variações que oscilaram entre -20 mm e +20 mm, sugerindo que houve influências externas que não foram capturadas pela tendência ou sazonalidade. Picos nos resíduos sugerem a ocorrência de variações climáticas imprevisíveis em determinados anos, principalmente nos anos finais da série.

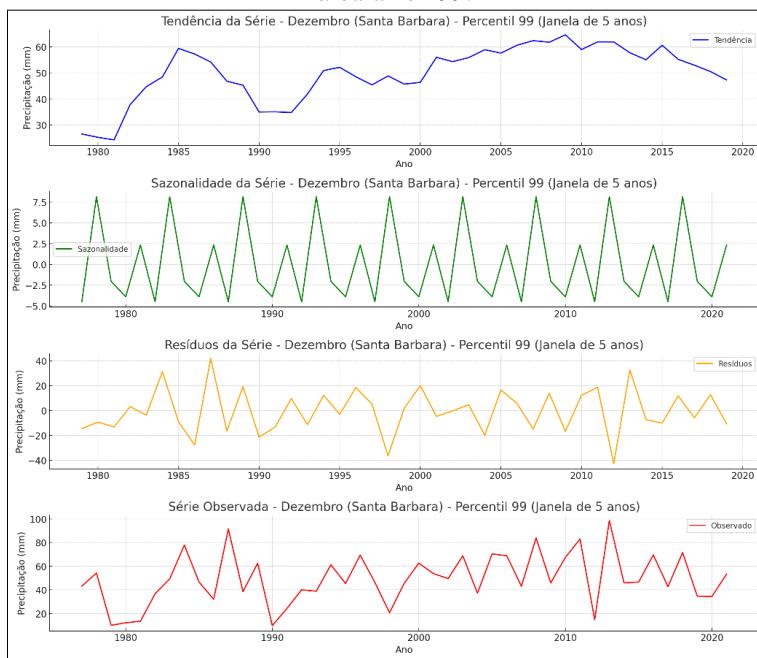
A série observada mostrou que os eventos extremos de precipitação atingiram picos de até 70 mm, principalmente em anos mais recentes, o que coincide com o aumento da tendência.

4. Estação Santa Bárbara – Dezembro (↑)

A Figura 4.29 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de dezembro da estação Santa Bárbara no percentil 99.

A tendência iniciou em torno de 30 mm no final dos anos 1970 e subiu rapidamente até cerca de 60 mm em meados da década de 1980. Posteriormente, a tendência permaneceu relativamente constante, com uma leve redução em anos recentes, voltando para cerca de 55 mm.

Figura 4.29 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de dezembro na Estação Santa Bárbara no P99.



Fonte: A autora (2024).

A componente sazonal variou de aproximadamente -5 mm a +7 mm ao longo de toda a série. Esse padrão sugere que os efeitos sazonais desempenharam um papel consistente na variação da precipitação extrema em dezembro, reforçando a influência da sazonalidade.

Os resíduos apresentaram variações que oscilaram entre -20 mm e +40 mm, sugerindo a presença de fatores externos que não foram capturados pela tendência ou sazonalidade. Observa-se que os resíduos apresentaram picos ao longo dos anos, indicando a influência de eventos climáticos imprevisíveis ou fatores externos.

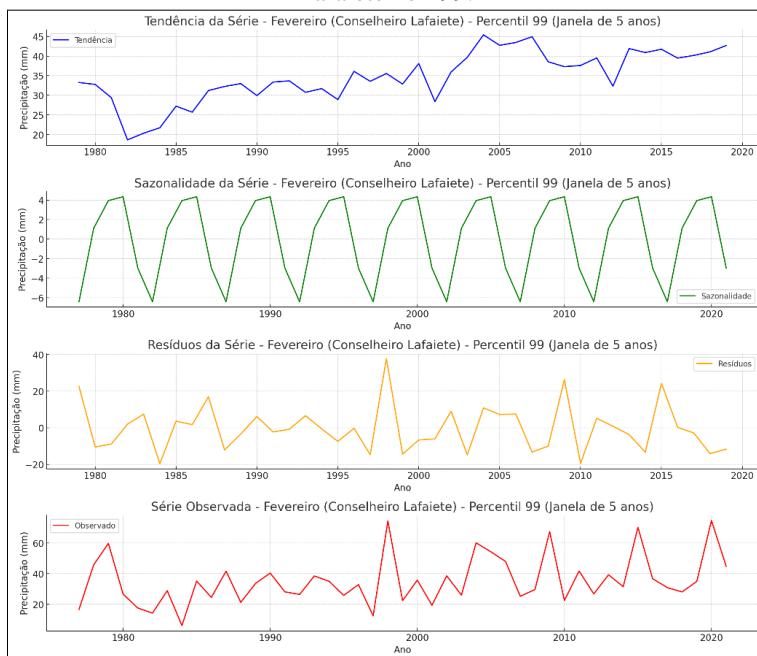
A série observada mostrou que os eventos extremos de precipitação em dezembro atingiram picos de até 80 mm em determinados anos, especialmente na década de 1980 e em anos mais recentes, indicando a ocorrência de eventos de precipitação intensa ao longo do período com tendência de aumento.

5. Estação Conselheiro Lafaiete – Fevereiro (↑)

A Figura 4.30 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de fevereiro da estação Conselheiro Lafaiete no percentil 99.

A tendência começou em torno de 30 mm no final dos anos 1970 e apresentou flutuações ao longo do tempo. Observa-se um aumento na tendência a partir de meados dos anos de 1980, atingindo picos em torno de 45 mm.

Figura 4.30 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de fevereiro na Estação Conselheiro Lafaiete no P99.



Fonte: A autora (2024).

A componente sazonal variou de aproximadamente -10 mm a +8 mm de maneira consistente ao longo do período. Essa amplitude sazonal mostra que os efeitos sazonais tiveram um papel estável na variabilidade dos eventos extremos de precipitação em fevereiro.

Os resíduos apresentaram variações entre -20 mm e +30 mm, indicando a presença de fatores externos que não foram capturados pelas componentes de tendência e sazonalidade. Em alguns anos, os picos nos resíduos foram mais pronunciados, sugerindo a influência de eventos climáticos pontuais.

A série observada mostrou que os eventos extremos de precipitação atingiram valores acima de 70 mm em determinados anos, especialmente em períodos mais recentes.

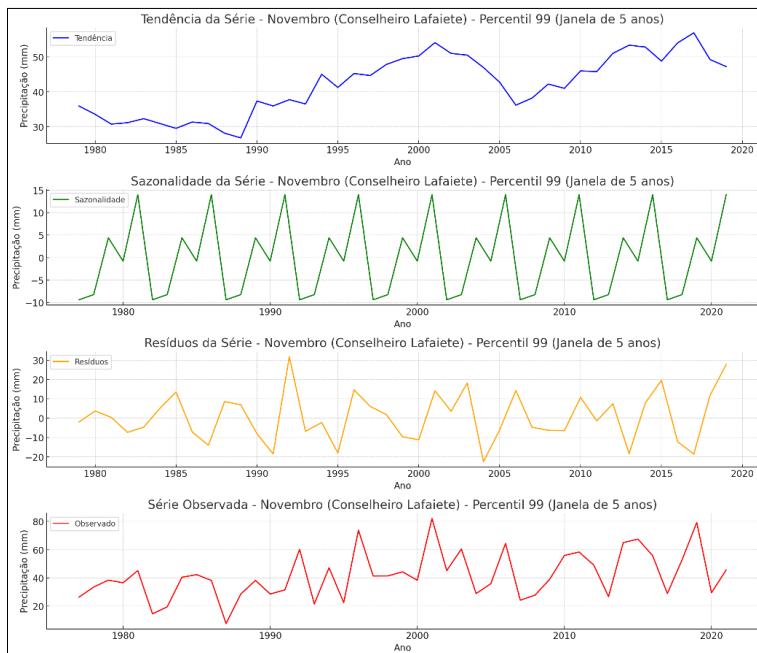
6. Estação Conselheiro Lafaiete – Novembro (↑)

A Figura 4.31 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de novembro da estação Conselheiro Lafaiete no percentil 99.

A tendência começou em torno de 35 mm no final dos anos 1970 e mostrou um aumento ao longo dos anos, superando os 50 mm por volta dos anos 2000, em 2005 voltou a cair para menos de 40 mm, subindo novamente nos anos finais. Houve certa estabilidade na tendência após o pico, embora ainda se mantenha em um nível relativamente elevado

nos anos mais recentes, indicando que os eventos extremos de precipitação em novembro tornaram-se mais frequentes ou intensos ao longo do período.

Figura 4.31 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de novembro na Estação Conselheiro Lafaiete no P99.



Fonte: A autora (2024).

A componente sazonal variou aproximadamente entre -10 mm a +15 mm, mantendo-se relativamente constante ao longo do período. A amplitude sazonal mostra que os efeitos sazonais tiveram um papel estável na variabilidade dos eventos extremos de precipitação, o que sugere que a sazonalidade desempenha um papel previsível e consistente nos eventos de precipitação extrema em novembro.

Os resíduos apresentaram variações que oscilaram entre -20 mm e +30 mm, indicando a presença de influências externas ou eventos climáticos que não foram capturados pelas componentes de tendência e sazonalidade. Os picos nos resíduos sugerem que houve anos em que os eventos extremos de precipitação foram significativamente influenciados por fatores inesperados ou anomalias climáticas.

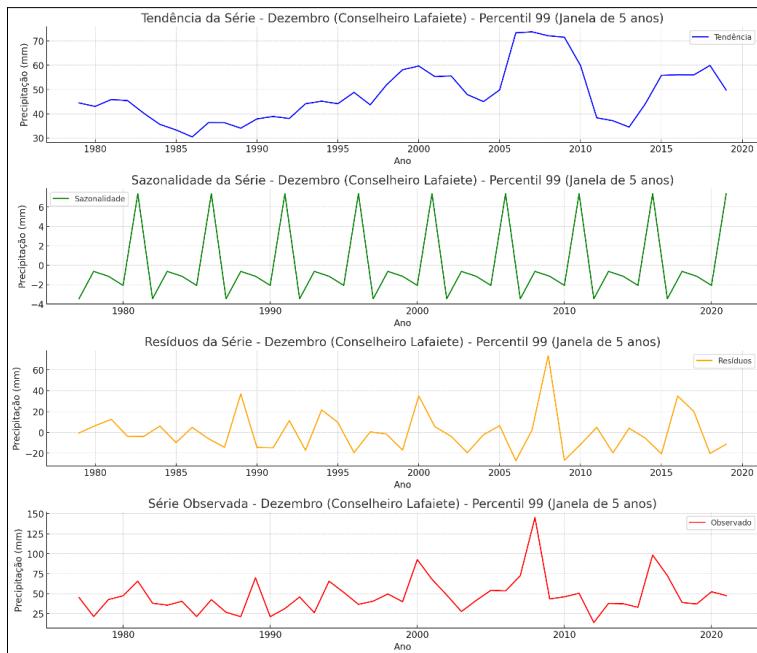
A série observada apresentou picos de precipitação extrema de até aproximadamente 80 mm em alguns anos, sugerindo eventos de precipitação muito intensa durante o mês de novembro ao longo da série.

7. Estação Conselheiro Lafaiete – Dezembro (↑)

A Figura 4.32 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série

observada para o mês de dezembro da estação Conselheiro Lafaiete no percentil 99.

Figura 4.32 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de dezembro na Estação Conselheiro Lafaiete no P99.



Fonte: A autora (2024).

A tendência começou em torno de 40 mm no final dos anos 1970 e mostrou um aumento gradual, chegando a atingir aproximadamente 70 mm em meados dos anos 2000. Após esse período, houve certa estabilidade, mas com uma ligeira redução nos anos recentes, retornando a níveis em torno de 60 mm. Isso indica que os eventos extremos de precipitação em dezembro aumentaram em intensidade ao longo dos anos, com uma tendência geral de crescimento até estabilizarem em patamares elevados.

A componente sazonal apresentou variações entre aproximadamente -4 mm a +6 mm ao longo de toda a série. Isso sugere que a sazonalidade teve um papel consistente e previsível nos eventos extremos de precipitação em dezembro, mantendo uma influência constante ao longo do período analisado.

Os resíduos apresentaram variações que oscilaram entre -20 mm e +60 mm, isso sugere uma variabilidade significativa que não foi explicada pelas componentes de tendência e sazonalidade. Essas variações mais elevadas, principalmente os picos que atingiram até +60 mm, indicam a presença de fatores externos que influenciaram eventos extremos de precipitação de forma imprevisível em alguns anos. Esses valores de resíduos refletem a ocorrência de eventos que foram anormalmente altos em determinados anos e mostram que a variabilidade dos eventos extremos em dezembro não é totalmente

capturada pelas componentes estruturais da série. Isso reforça a necessidade de considerar fatores climáticos mais amplos e inesperados ao analisar e prever eventos extremos de precipitação na região. Esses picos nos resíduos, também sugerem que houve anos em que os eventos extremos de precipitação foram significativamente influenciados por fatores imprevisíveis ou anomalias climáticas.

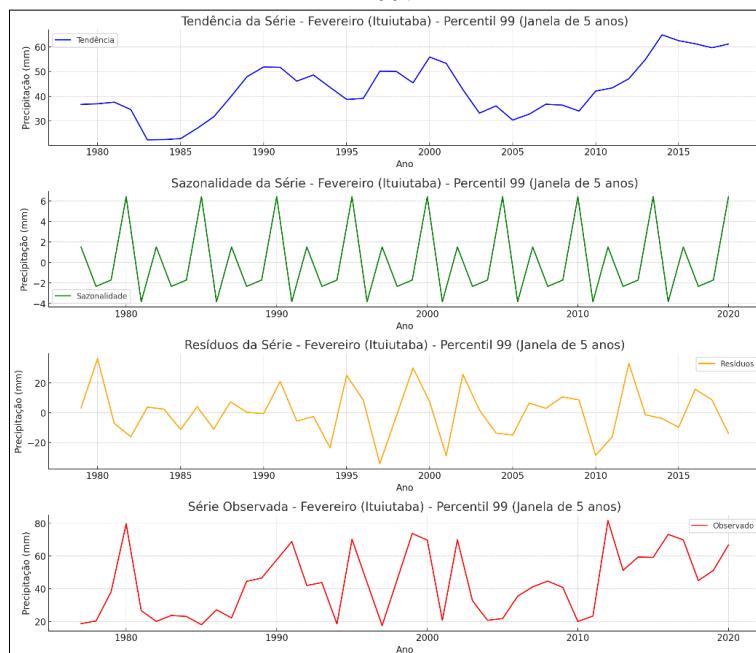
A série observada mostrou que os eventos extremos de precipitação em dezembro atingiram picos de quase 150 mm em alguns anos, indicando a presença de precipitações muito intensas ao longo da série.

8. Estação Ituiutaba – Fevereiro (↑)

A Figura 4.33 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de fevereiro da estação Ituiutaba no percentil 99.

A tendência começou em torno de 35 mm no final dos anos 1970 e apresentou um aumento ao longo do tempo, atingindo cerca de 50 mm nos anos recentes entre 1990 e 2000, depois uma queda mantendo um nível ainda mais elevado que nos anos iniciais e voltando a subir nos anos mais recentes, superando os 60 mm. Isso indica que houve um aumento na intensidade dos eventos extremos de precipitação em fevereiro ao longo do período analisado.

Figura 4.33 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de fevereiro na Estação Ituiutaba no P99.



Fonte: A autora (2024).

A componente sazonal apresentou variações entre aproximadamente -4 mm a +6

mm de forma consistente ao longo dos anos. A influência sazonal manteve-se constante, sugerindo que os efeitos sazonais têm um papel previsível e contínuo na variação da precipitação extrema durante o mês de fevereiro.

Os resíduos oscilaram entre -30 mm e +30 mm, sugerindo a presença de influências externas ou fatores climáticos que não foram capturados pelas componentes de tendência e sazonalidade. Esses picos indicam que em alguns anos houve variações significativas não explicadas pelos padrões sazonais ou pela tendência geral.

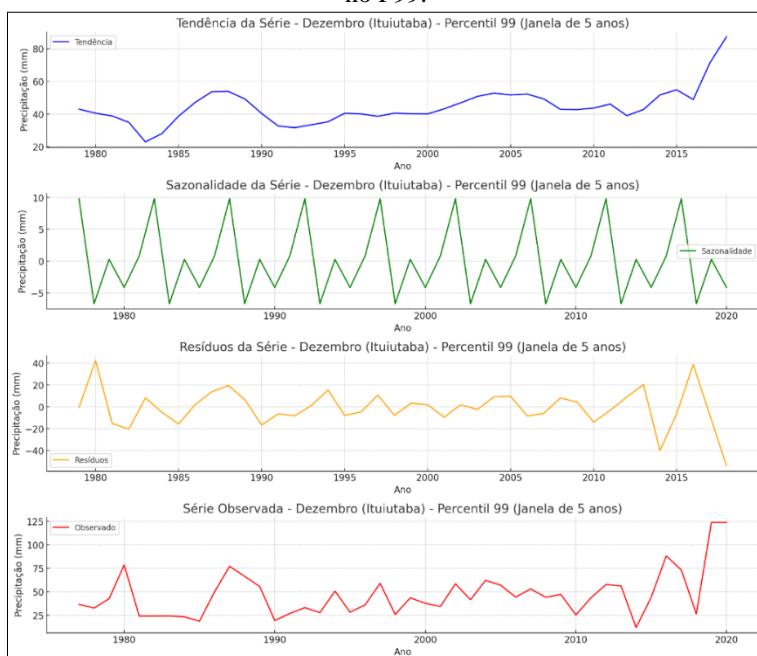
A série observada mostrou picos de precipitação extrema de até 80 mm em alguns anos, indicando que fevereiro experimentou eventos de precipitação muito intensos durante o período da série.

9. Estação Ituiutaba – Dezembro (↑)

A Figura 4.34 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de dezembro da estação Ituiutaba no percentil 99.

A tendência começou em torno de 40 mm no final dos anos 1970 e apresentou um aumento gradual ao longo do tempo, superando os 80 mm nos anos mais recentes. Esse crescimento indica que os eventos extremos de precipitação em dezembro tornaram-se mais intensos em Ituiutaba ao longo do período analisado.

Figura 4.34 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de dezembro na Estação Ituiutaba no P99.



Fonte: A autora (2024).

A componente sazonal variou entre aproximadamente -5 mm a +10 mm de forma consistente ao longo dos anos. Esse padrão sugere que os efeitos sazonais influenciam a precipitação extrema em dezembro de maneira estável e previsível, indicando que a sazonalidade desempenha um papel significativo na variação dos eventos extremos de precipitação na região.

Os resíduos oscilaram entre -40 mm e +40 mm, indicando a presença de variações que não foram capturadas pelas componentes de tendência e sazonalidade, no início e no final da série. Esses picos nos resíduos sugerem que houve anos em que os eventos extremos de precipitação em dezembro foram influenciados por fatores externos ou anomalias climáticas que não seguem o padrão geral da série.

A série observada mostrou picos de precipitação extrema que atingiram até 125 mm nos últimos anos.

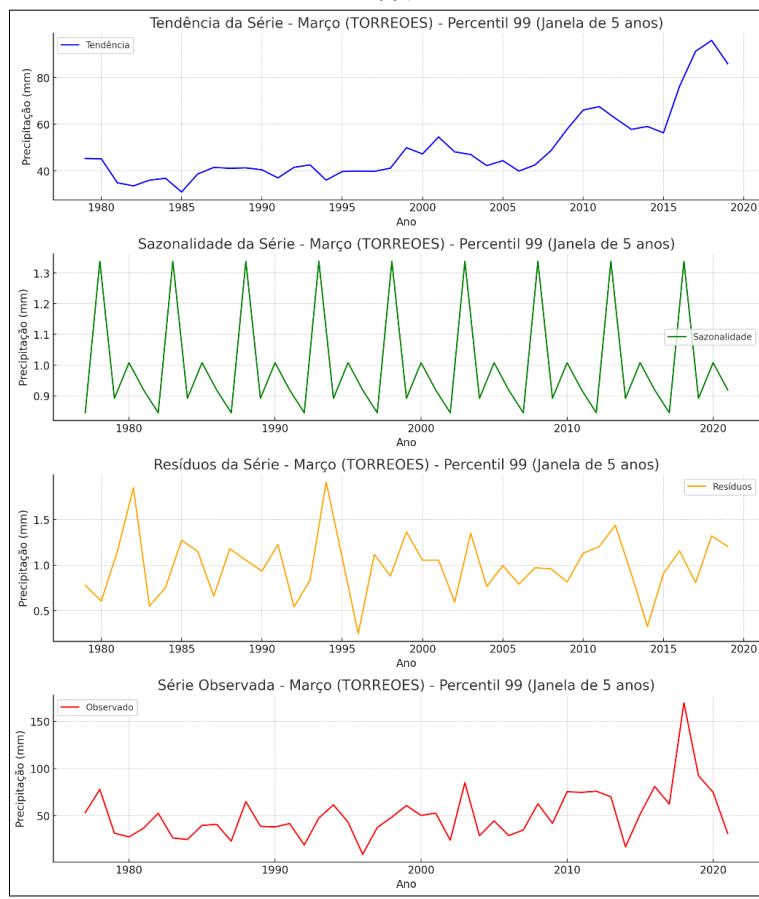
10. Estação Torreões – Março (↑)

A Figura 4.35 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de março da estação Torreões no percentil 99.

A tendência iniciou com valores em torno de 40 mm a 45 mm, sem grandes oscilações durante esses anos. A partir dos anos 2000, apresentou um aumento significativo, atingindo um valor de quase 100 mm em torno de 2018, indicando um aumento expressivo na intensidade dos eventos de precipitação extrema. Esses valores confirmam que a série apresenta uma tendência de aumento na precipitação extrema ao longo das últimas décadas, especialmente após o ano 2000.

A componente sazonal mostrou padrões repetitivos com amplitude entre aproximadamente 0,9 e 1,3 ao longo do período, indicando que os extremos de precipitação em março não são fortemente afetados por padrões sazonais, resultando em uma sazonalidade mais suave. As variações nos resíduos oscilam entre aproximadamente 0,5 e 1,5. Os resíduos de março são mais contidos, com flutuações menores e mais regulares. Isso sugere que o comportamento residual em março é mais estável, com menos eventos extremos fora dos padrões de tendência e sazonalidade.

Figura 4.35 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de março na estação Torreões no P99.



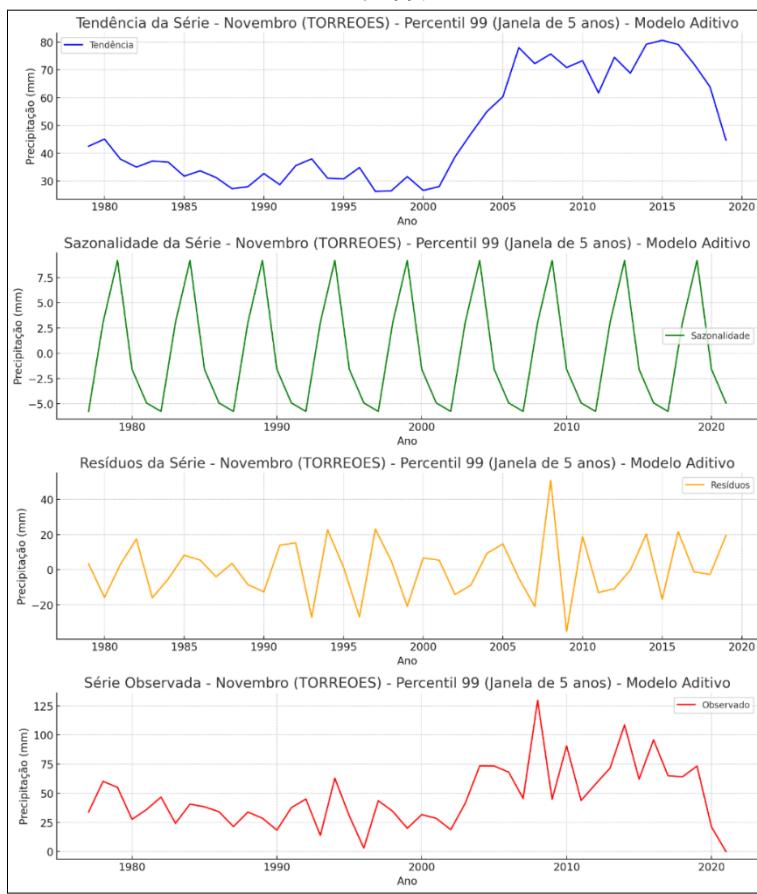
Fonte: A autora (2024).

A série observada reflete os valores reais de precipitação extrema para o percentil 99 ao longo do período. A série começa em 1977 com valores em torno de 50 mm, e mantém flutuações até o início dos anos 2000, com valores variando entre 30 mm e 60 mm. A partir de 2010, os valores observados atingem níveis mais altos, com o pico chegando a aproximadamente 180 mm em 2018, representando um evento extremo incomum para o período analisado (todo o restante da série está abaixo de 100 mm).

11. Estação Torreões – Novembro (↑)

A Figura 4.36 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de novembro da estação Torreões no percentil 99.

Figura 4.36 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de novembro na estação Torreões no P99.



Fonte: A autora (2024).

A tendência fica em torno de 20 a 40 mm até início dos anos 2000 e a partir de então percebe-se um aumento significativo e constante até atingir um pico próximo de 80 mm após o ano de 2005. De 2018 em diante há uma redução na tendência, com valores voltando a cerca de 40 a 50 mm, porém ainda com valores acima dos anos iniciais.

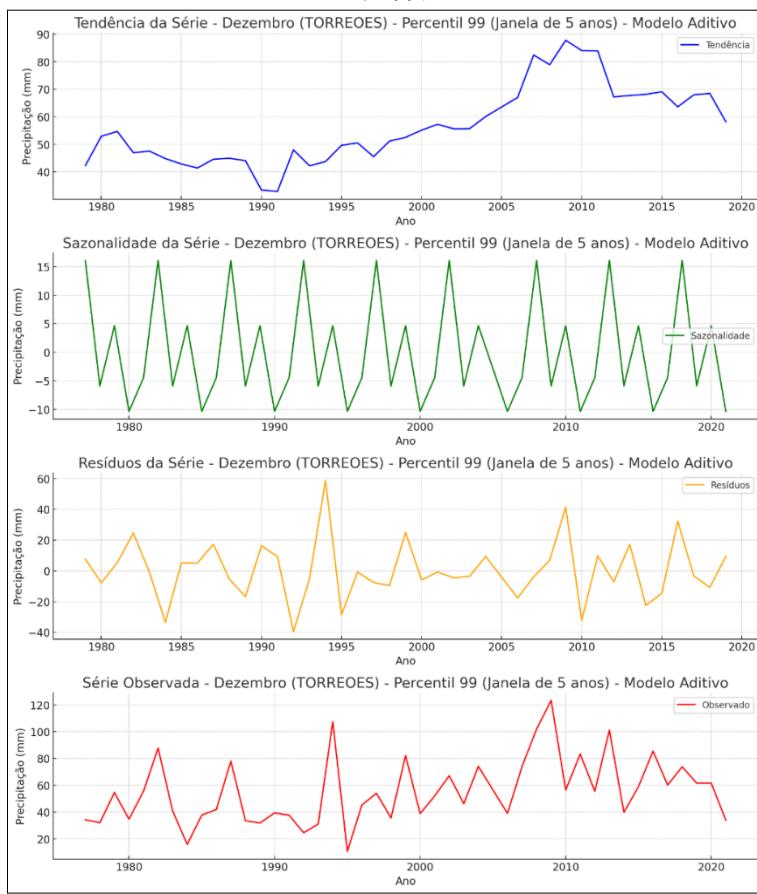
A sazonalidade apresenta variações de aproximadamente -6 mm a 8 mm. Os picos sazonais ocorrem regularmente, indicando um aumento esperado nos extremos em alguns anos e uma redução em outros.

A amplitude dos resíduos varia de -20 mm a +40 mm, o que indica uma variabilidade significativa e imprevisível nos eventos de precipitação extrema. Picos nos resíduos sugerem anos com precipitação muito acima do esperado, como em 2008, que mostra um desvio significativo.

12. Estação Torreões – Dezembro (↑)

A Figura 4.37 mostra os gráficos de tendência, sazonalidade, resíduos e série observada para o mês de dezembro da estação Torreões no percentil 99.

Figura 4.37 - Gráficos da decomposição da série temporal para o mês de dezembro na estação Torreões no P99.



Fonte: A autora (2024).

A tendência começa com valores em torno de 40 a 50 mm até próximo ao final da década de 1980. A partir de meados da primeira metade da década de 1990 observa-se um aumento gradual significativo na tendência até final da década dos anos 2000. Após 2010 aproximadamente observa-se uma diminuição na tendência, mas ainda ficando com valores acima dos períodos iniciais da série.

A sazonalidade aditiva varia aproximadamente entre -10 mm a +15 mm, o que significa que há oscilações previsíveis na intensidade da precipitação extrema em dezembro. O padrão sazonal indica que, mesmo dentro do mês de dezembro, há anos em que a precipitação é consistentemente maior ou menor do que a média.

A amplitude dos resíduos varia de -40 mm a +60 mm, indicando que há variações inesperadas na precipitação extrema em dezembro que não são capturadas pelos outros componentes. Picos nos resíduos, como o observado em 2008, sugerem anos com precipitação extrema muito acima do esperado, destacando a ocorrência de eventos extremos que não seguem o padrão geral da série.

Discussão Geral

Ao longo das análises realizadas, ficou evidente que algumas estações, como Pirapama (RMBH) e Pedro Versiani (Vale do Mucuri), mostraram uma clara tendência de redução nos extremos de precipitação ao longo das últimas décadas. Isso sugere que, em alguns locais, os eventos extremos de chuva têm se tornado menos frequentes ou intensos. A tendência de redução na precipitação extrema pode estar associada a fatores como: mudanças no padrão de circulação atmosférica, pois estudos recentes sugerem que alterações na circulação atmosférica, especialmente na Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), têm impactado os padrões de chuva na região Sudeste do Brasil (Barros *et al.*, 2000; Carvalho, Jones & Liebmann, 2004; Silva, Reboita & Escobar, 2019). Uma modificação na posição e intensidade da ZCAS pode influenciar a frequência e intensidade das chuvas extremas em Minas Gerais; fenômenos climáticos de larga escala, como El Niño e La Niña afetam significativamente a distribuição da precipitação em várias regiões do Brasil (Grimm; Tedeschi, 2009). Durante eventos de El Niño, por exemplo, a região Sudeste tende a apresentar redução nas chuvas, o que poderia explicar a diminuição observada em algumas séries.

Por outro lado, outras estações, como Santa Bárbara (RMBH, mais ao sul) e Torreões (Zona da Mata, extremo sul do estado), evidenciaram uma tendência de aumento nos extremos de precipitação ao longo das últimas décadas, especialmente no percentil 99. Este aumento sugere que eventos de chuvas intensas estão se tornando mais frequentes ou intensos em certas regiões, o que pode ser também atribuído a mudanças climáticas globais, a elevação da temperatura global tem sido associada ao aumento da capacidade da atmosfera de reter umidade, levando a eventos de precipitação mais intensos (Trenberth, 2011, 2020). Esse fenômeno, conhecido como efeito Clausius-Clapeyron, implica que cada 1°C de aumento na temperatura resulta em um potencial de 7% a mais de umidade na atmosfera, o que pode contribuir para a intensificação das chuvas extremas; mudanças no uso e cobertura do solo, o aumento da urbanização e desmatamento em Minas Gerais pode ter alterado o ciclo hidrológico local, contribuindo para o aumento da frequência e intensidade de eventos extremos (Oliveira; Moraes; Tavares, 2021).

A componente sazonal manteve-se relativamente constante em todas as estações analisadas, indicando que a variação anual da precipitação segue um padrão previsível. No entanto, a amplitude da sazonalidade foi mais acentuada em algumas estações, como em Torreões para o mês de novembro, sugerindo que os efeitos sazonais desempenham

um papel mais relevante nos extremos de precipitação nesses locais. A sazonalidade da precipitação é fortemente influenciada pela topografia e cobertura vegetal, que afetam a formação de nuvens e a distribuição das chuvas (Pereira *et al.*, 2018). Em regiões montanhosas, a chuva orográfica pode amplificar a sazonalidade da precipitação, resultando em maiores extremos em determinadas épocas do ano. A sazonalidade também pode estar relacionada à variabilidade de temperatura e umidade ao longo do ano. Durante os meses de verão, há maior disponibilidade de umidade na atmosfera, o que, combinado com altas temperaturas, pode resultar em chuvas convectivas intensas.

Os resíduos da decomposição apresentaram variações consideráveis, indicando que há fatores externos e eventos pontuais que afetam a precipitação extrema em algumas estações pluviométricas de Minas Gerais. A presença de picos nos resíduos sugere a ocorrência de eventos extremos que não são capturados pelas componentes de tendência e sazonalidade. A ocorrência de ciclones extratropicais, frentes frias e linhas de instabilidade podem causar episódios de chuva extrema que não seguem a sazonalidade esperada (Ferreira; Reboita, 2022; Reboita; Ambrizzi; Rocha, 2009). Esses fenômenos podem explicar a variabilidade não capturada pela decomposição em certas estações e meses. As atividades humanas, como o desmatamento e a expansão agrícola, alteram a cobertura do solo e o ciclo hidrológico, afetando os padrões de precipitação extrema. Além disso, a urbanização crescente em Minas Gerais pode exacerbar os eventos extremos devido ao aumento do escoamento superficial e à redução da infiltração (Nunes, 2018).

Há uma clara variação regional nos extremos de precipitação em Minas Gerais, com algumas áreas mostrando tendência de redução, enquanto outras apresentam um aumento nos eventos extremos. A sazonalidade desempenha um papel importante, mas há evidências de que fatores climáticos de larga escala e a influência antrópica estão contribuindo para a variabilidade dos extremos pluviométricos. As tendências observadas nos percentis 95 e 99 indicam que o estado de Minas Gerais está experimentando mudanças que podem estar associadas às alterações climáticas globais, mudanças no uso do solo e variabilidade climática natural.

4.4 CONCLUSÕES

O capítulo apresenta análises detalhadas sobre a decomposição e comportamento das séries temporais de precipitação extrema, para as estações meteorológicas de Minas Gerais, utilizando os percentis 95 e 99 como métricas para identificar eventos extremos de precipitação. A metodologia adotada, que inclui a decomposição em componentes de tendência, sazonalidade e ruído, permitiu identificar padrões importantes relacionados à variação da precipitação ao longo do tempo em diferentes estações e meses.

Diversas estações, como Guarani, Pedro Versiani, Pirapama e Ponte do Rodrigues, mostraram uma tendência decrescente na intensidade dos eventos extremos de precipitação ao longo dos últimos 44 anos, especialmente nos meses de janeiro, fevereiro e março. Como exemplo, na estação Guarani, a tendência de precipitação para o mês de janeiro (no percentil 95) diminuiu de aproximadamente 45 mm no final dos anos 1970 para 25 mm nos anos mais recentes, indicando uma redução significativa nos eventos extremos ao longo do tempo. A decomposição revelou que a tendência decrescente não foi uniforme, mas, em geral, houve uma clara redução na frequência e na intensidade dos eventos de precipitação extrema ao longo do período analisado. Essa diminuição pode estar relacionada a mudanças climáticas regionais que afetaram a intensidade das chuvas extremas.

A componente sazonal manteve-se relativamente constante na maioria das estações e períodos analisados, independentemente das mudanças nas tendências gerais. Por exemplo, na estação Guarani, o padrão sazonal apresentou uma amplitude entre -5 mm e +5 mm, permanecendo estável ao longo dos anos. Esta constância indica que, mesmo com variações na intensidade geral dos eventos de precipitação extrema, a sazonalidade continuou a exercer uma influência previsível sobre a precipitação extrema, sugerindo que os padrões climáticos sazonais não foram significativamente afetados pelas mudanças observadas nas tendências de longo prazo.

A estação Pirapama se destacou como um exemplo de comportamento instável e foi identificada como uma série não estacionária, apresentando um padrão claro de mudança ao longo do período analisado, especialmente para o mês de janeiro no percentil 99. A análise da decomposição da série temporal da estação Pirapama mostrou que ela apresentou uma clara característica de não estacionariedade, indicando que a precipitação extrema nessa estação sofreu mudanças significativas ao longo do tempo. A não estacionariedade é evidenciada pela alteração na tendência da precipitação, sugerindo que

os eventos extremos de precipitação não seguiram um padrão estável ao longo das décadas. A característica de não estacionariedade da série temporal da estação Pirapama aponta para uma mudança clara nos padrões de precipitação extrema, o que pode estar relacionado a fatores climáticos de longo prazo, como as mudanças climáticas globais ou regionais, variabilidades interanuais (como fenômenos ENSO - El Niño/Southern Oscillation), ou mudanças na dinâmica atmosférica que afetam a distribuição das chuvas extremas. A não estacionariedade observada sugere que o regime de chuvas extremas mudou significativamente, tornando a previsão e o gerenciamento de riscos mais complexos para essa região.

A análise dos resíduos revelou variações significativas que indicam a presença de influências externas ou anomalias climáticas que não foram capturadas pelas componentes de tendência e sazonalidade em várias estações. Um exemplo, é a estação Pedro Versiani, que apresentou resíduos com amplitudes variando entre -40 mm e +60 mm, sugerindo que eventos climáticos anômalos ou fatores externos impactaram a precipitação extrema durante certos períodos. Os resíduos mais pronunciados nos anos 1980 sugerem a influência de eventos climáticos extremos ou variabilidades interanuais, como fenômenos associados ao El Niño/Southern Oscillation (ENSO), que poderiam ter influenciado a variabilidade da precipitação na região.

Em algumas estações, como Pirapama, houve uma estabilização nos eventos extremos de precipitação nos anos mais recentes, com a intensidade e a variabilidade dos resíduos diminuindo ao longo do tempo. Isso sugere que os fatores externos que causaram variações extremas nos primeiros anos da série temporal se tornaram menos influentes nos períodos mais recentes. Este comportamento pode indicar uma adaptação ou ajuste do sistema climático local a mudanças climáticas de longo prazo, resultando em eventos extremos de precipitação que são menos intensos e mais previsíveis.

Em contraste, a estação Santa Bárbara apresentou uma tendência crescente na intensidade dos eventos extremos de precipitação ao longo do tempo. Por exemplo, no mês de fevereiro, a tendência passou de cerca de 10 mm no final dos anos 1970 para 40 mm nos anos recentes, refletindo um aumento na intensidade e frequência dos eventos extremos. Essa tendência de aumento pode estar associada a mudanças climáticas locais que resultaram em uma maior disponibilidade de umidade atmosférica ou em mudanças na dinâmica dos sistemas meteorológicos que afetam a precipitação extrema na região.

A decomposição de séries temporais é uma ferramenta poderosa que permitiu identificar não apenas a direção das tendências, mas também compreender a complexa

interação entre as componentes de tendência, sazonalidade e ruído nas séries de precipitação extrema. As tendências decrescentes ou crescentes identificadas podem ter implicações importantes para a gestão de recursos hídricos, o planejamento de infraestrutura e a prevenção de desastres naturais na região de Minas Gerais. A diminuição dos eventos extremos em algumas áreas pode reduzir o risco de enchentes, enquanto o aumento em outras pode indicar a necessidade de estratégias de adaptação para lidar com eventos de precipitação mais intensos.

O estudo da decomposição das séries temporais de precipitação extrema nas estações analisadas revelou padrões claros de variação na intensidade dos eventos extremos ao longo do tempo, ressaltando a importância de estudos com objetivo de aumentar a resolução dos modelos e análises, de globais e regionais para locais. Houve uma predominância de tendências decrescentes em várias estações, com algumas áreas apresentando tendências crescentes, destacando a complexidade das mudanças climáticas regionais no estado de Minas Gerais. A constância da componente sazonal em muitas das análises sugere que, apesar das mudanças nas tendências de longo prazo, os padrões sazonais de precipitação extrema permanecem uma característica dominante na região.

Esta análise detalhada contribui para a compreensão das mudanças nos eventos extremos de precipitação e oferece percepções valiosas para o desenvolvimento de políticas e estratégias de adaptação e mitigação relacionadas às mudanças climáticas e à gestão dos recursos hídricos em Minas Gerais.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, L. V. *et al.* Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, [s. l.], v. 111, n. 5, p. 1–22, 2006.

BARROS, V. *et al.* Influence of the South Atlantic convergence zone and South Atlantic Sea surface temperature on interannual summer rainfall variability in Southeastern South America. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 67, n. 3–4, p. 123–133, 2000. <https://doi.org/10.1007/s007040070002>

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 88–108, 2004. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2)

CHATFIELD, C. **The Analysis of Time Series: An Introduction**. [S. l.: s. n.], 1996.

CLEVELAND, R. B. *et al.* **STL: A Season-Trend Decomposition Procedure Based on Loess**. [S. l.: s. n.], 1990. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2207653>.

FERREIRA, G. W. S.; REBOITA, M. S. A New Look into the South America Precipitation Regimes: Observation and Forecast. **Atmosphere**, [s. l.], v. 13, n. 6, 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13060873>

GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G. ENSO and extreme rainfall events in South America. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 22, n. 7, p. 1589–1609, 2009. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2429.1>

HYNDMAN, R. J.; ATHANASOPOULOS, G. Athanasopoulos, George_ Hyndman, Rob J. - Forecasting_ Principles and Practice (2018).pdf. [s. l.], 2018.

NUNES, A. de A. Tendências em eventos extremos de precipitação na região metropolitana de belo horizonte: detecção, impactos e adaptabilidade. [s. l.], p. 191, 2018.

OLIVEIRA, T. A. De; MORAES, C. De; TAVARES, G. Gênese aos impactos do evento no perímetro urbano de Juiz de Fora (MG). **Revista de Ciências Humanas**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 104–131, 2021.

PEREIRA, G. *et al.* Análise Da Variabilidade Da Precipitação Para O Estado De Minas Gerais (1981-2017). **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 1, p. 213–229, 2018. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.61028>

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. da. Relationship between the southern annular mode and southern hemisphere atmospheric systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 48–55, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000100005>

SILVA, J. P. R.; REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G. C. J. Caracterización de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur en campos atmosféricos recientes. [s. l.], v. 25, p. 355–377, 2019. <https://doi.org/10.5380/abclima.v25i0.64101>

SPYROS G. MAKRIDAKIS; WHEELWRIGHT, S. C.; HYNDMAN, R. J. 1 / THE FORECASTING PERSPECTIVE. [s. l.], p. 656, 1997.

TRENBERTH, K. E. Changes in precipitation with climate change. **Climate Research**, [s. l.], v. 47, n. 1–2, p. 123–138, 2011. <https://doi.org/10.3354/cr00953>

TRENBERTH, K. E. Understanding climate change through Earth's energy flows. **Journal of the Royal Society of New Zealand**, [s. l.], v. 50, n. 2, p. 331–347, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03036758.2020.1741404>
<https://doi.org/10.1080/03036758.2020.1741404>

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

As considerações finais desta tese destacam a importância e a necessidade de uma abordagem meticulosa e regionalizada para compreender a dinâmica dos eventos extremos de precipitação em Minas Gerais, especialmente em um contexto de mudanças climáticas globais. Ao utilizar dados brutos, sem preenchimento de falhas, provenientes de 232 estações pluviométricas locais ao longo de 44 anos, o estudo garantiu a integridade e a autenticidade dos resultados, evitando possíveis distorções e fornecendo uma análise fiel das condições climáticas ao longo do período analisado.

Um aspecto crucial desta pesquisa é que, diferentemente de estudos anteriores que tratam valores *outliers* – aqueles que se afastam significativamente das médias – como "erros" a serem excluídos, esses valores não foram removidos das séries. Pelo contrário, foram cuidadosamente investigados, pois representam eventos de precipitação extrema que efetivamente geram impactos significativos.

A aplicação do *downscaling* estatístico representou um avanço metodológico significativo, permitindo a adaptação das projeções climáticas globais para uma escala mais local e detalhada. Essa abordagem possibilitou uma análise de alta resolução, identificando variações e padrões espaciais que seriam indetectáveis em estudos com menor resolução, evidenciando a variabilidade e tendências de precipitação extrema em diferentes regiões de Minas Gerais. A decisão de realizar análises mensais, ao invés de se basear apenas nas estações do ano, foi igualmente crucial, pois permitiu capturar nuances sazonais e identificar mudanças específicas de cada mês, proporcionando percepções mais profundas sobre a evolução dos eventos extremos ao longo do ano.

Os resultados demonstraram tendências claras de mudança na frequência e intensidade dos extremos de precipitação, com uma diminuição observada no mês de janeiro e um aumento significativo em outros meses, como fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro, em especial para os dois últimos. As análises espaciais revelaram que a região central de Minas Gerais apresenta maior estabilidade nos padrões de precipitação extrema, enquanto as regiões leste e nordeste são mais suscetíveis a variações e tendências de diminuição. Estes achados refletem a influência de processos climáticos locais e globais, como fenômenos atmosféricos e a variabilidade climática induzida pelas mudanças globais.

A aplicação de testes estatísticos robustos, incluindo ADF, KPSS, Mann-Kendall e Mann-Kendall Modificado, confirmou a presença de comportamentos não estacionários

em muitas das séries temporais de precipitação, evidenciando a complexidade e a dinâmica dos eventos extremos ao longo do tempo. A metodologia adotada provou ser eficaz na identificação de tendências e padrões significativos, reforçando a necessidade de utilizar múltiplas abordagens estatísticas para uma compreensão completa dos extremos climáticos.

Estas considerações reforçam que os extremos de precipitação em Minas Gerais são influenciados por uma combinação de fatores globais e regionais e que as mudanças climáticas estão afetando de maneira significativa a distribuição e a intensidade desses eventos. A tese contribui de maneira substancial para a literatura ao demonstrar que análises de alta resolução espacial e temporal, aliadas ao uso de dados brutos e técnicas estatísticas avançadas, são essenciais para a identificação de tendências e padrões climáticos em escala local.

Finalmente, este trabalho serve como uma importante referência para a gestão de recursos hídricos e a elaboração de estratégias de mitigação e adaptação aos eventos climáticos extremos em Minas Gerais. A compreensão detalhada dos padrões sazonais e espaciais de precipitação proporcionada por esta tese oferece subsídios valiosos para a tomada de decisões no planejamento urbano, na agricultura e na prevenção de desastres naturais, em um cenário de mudanças climáticas cada vez mais evidentes. Desta forma, a pesquisa reafirma a necessidade de estudos regionais aprofundados e metodologicamente rigorosos para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas no futuro.

Perspectivas futuras

Como perspectivas futuras, a aplicação da Distribuição Generalizada de Valores Extremos (DGVE), Cadeia de Markov e Redes Neurais Artificiais (RNAs) apresenta oportunidades de pesquisas promissoras para aprimorar a análise de eventos extremos de precipitação e melhorar a previsão de padrões climáticos em Minas Gerais, especialmente em escala local.

Sugestões para futuras pesquisas:

1. Realizar estudos comparativos utilizando a DGVE para diferentes períodos históricos e cenários climáticos futuros, aprimorando a compreensão das tendências de eventos extremos em um contexto de mudanças climáticas.
2. Aplicar modelos de Cadeias de *Markov* de ordem superior para capturar relações mais complexas entre eventos climáticos consecutivos.

3. Integrar a Cadeia de *Markov* com outros modelos, como a DGVE, para criar um sistema de previsão de eventos extremos que considere tanto a magnitude quanto a sequência dos eventos.
4. Treinar redes neurais utilizando uma ampla gama de variáveis climáticas, geográficas e de uso do solo, aprimorando a precisão na previsão de eventos extremos.
5. Integrar redes neurais com modelos tradicionais, como DGVE e Cadeia de *Markov*, para desenvolver modelos híbridos que combinem a robustez estatística e a capacidade de aprendizado de máquina.

A aplicação combinada da DGVE, Cadeia de *Markov* e redes neurais representará um avanço metodológico significativo para a previsão e análise de eventos extremos de precipitação em Minas Gerais. A DGVE permite caracterizar a frequência e magnitude de eventos extremos, a Cadeia de *Markov* facilita a análise da persistência e transição de estados climáticos, enquanto as redes neurais oferecem uma abordagem avançada para capturar padrões complexos e não lineares. Integrar essas metodologias em estudos futuros pode levar a modelos de previsão mais precisos e eficazes, contribuindo para uma melhor compreensão dos impactos das mudanças climáticas e auxiliando na elaboração de estratégias de adaptação e mitigação.