



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

EXTREMOS SAZONAIS NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL E ASSOCIAÇÃO COM MUDANÇAS CLIMÁTICAS

RELATÓRIO FINAL PIBIC DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/INPE/CNPq)

José Victor Orlandi Simões (UNESP, Bolsista PIBIC/CNPq)

Email: jose.orlandi@unesp.br

Lincoln Muniz Alves (DIIAV/INPE, Orientador)

Email: lincoln.alves@inpe.br

George Ulguim Pedra (DIIAV/INPE, Coorientador)

Email: george.pedra@inpe.br

INPE

2022

São José dos Campos

RESUMO

A mudança do clima é um fenômeno atribuído diretamente à atividade humana devido a emissões de gases de efeito estufa. Dessa maneira, a mudança do clima tem e terá impactos diretos e indiretos sobre os componentes do sistema climático, entre eles o ciclo hidrológico através do aumento na frequência e intensidade dos eventos extremos, tais como chuvas intensas ou secas, impactando os sistemas naturais, grupos e sistemas humanos, assim como sobre a atividade econômica, a exemplo dos setores energético, agrícola e hídricos que têm uma dependência direta das variáveis do ciclo hidrológico. A região sudeste do Brasil produz 60% das riquezas nacionais e boa parte da eletricidade do país, além de abrigar 80 milhões de pessoas. Eventos climáticos extremos têm castigado essa região nas últimas décadas, a exemplo da crise hídrica 2014/15 e chuvas intensas, em particular, nos verões, provocando uma crescente quantidade de desastres naturais. Dado a importância dessa temática, o presente estudo tem como objetivo analisar a variabilidade espacial e temporal da precipitação sobre a região sudeste do Brasil através do método da distribuição generalizada de valores extremos (GEV, sigla em inglês). Para tal, analisou-se a variabilidade sazonal, tendências de longo prazo e mudança nos padrões dos extremos de precipitação no período de 1981-2020, a partir de dados obtidos junto ao CPC (Climate Predict Center). O estudo faz uma abordagem dos eventos climáticos extremos na região relacionados a fortes chuvas e busca responder às seguintes perguntas: Como vem se comportando o padrão espaço-temporal de precipitação na região nos últimos anos? O número de eventos climáticos extremos têm aumentado ou diminuído? Os resultados dessa pesquisa revelaram que a frequência e intensidade dos eventos extremos de chuva vem sofrendo alteração, em particular diminuição em grande parte das estações, principalmente no verão.

Palavras-chave: eventos climáticos extremos, mudança do clima, GEV.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da região sudeste do Brasil	3
Figura 2 - Estatísticas descritivas da estação de verão nos três períodos de estudo	6
Figura 3 - Estatísticas descritivas da estação de outono nos três períodos de estudo	7
Figura 4 - Estatísticas descritivas da estação de inverno nos três períodos de estudo	7
Figura 5 - Estatísticas descritivas da estação de primavera nos três períodos de estudo	8
Figura 6 - Parâmetro de escala da GEV para cada estação da região sudeste durante todo período de estudo	9
Figura 7 - Parâmetro de escala da GEV para cada estação da região sudeste durante os anos de 1981 a 2010	10
Figura 8 - Parâmetro de escala da GEV para cada estação da região sudeste durante os anos de 1991 a 2020	11
Figura 9 - Parâmetro de localização da GEV para cada estação da região sudeste durante todo período de estudo	12
Figura 10 - Parâmetro de localização da GEV para cada estação da região sudeste durante os anos de 1981 a 2010	13
Figura 11 - Parâmetro de localização da GEV para cada estação da região sudeste durante os anos de 1991 a 2020	14
Figura 12 - Parâmetro de forma da GEV para cada estação da região sudeste durante todo período de estudo	15
Figura 13 - Parâmetro de forma da GEV para cada estação da região sudeste durante os anos de 1981 a 2010	16
Figura 14 - Parâmetro de forma da GEV para cada estação da região sudeste durante os anos de 1991 a 2020	17
Figura 15 - Níveis de retorno da estação de verão das três épocas de estudo para os períodos de retorno de 5, 10, 15, 20 e 30 anos	18
Figura 16 - Níveis de retorno da estação de outono das três épocas de estudo para os períodos de retorno de 5, 10, 15, 20 e 30 anos	18
Figura 17 - Níveis de retorno da estação de inverno das três épocas de estudo para os períodos de retorno de 5, 10, 15, 20 e 30 anos	19

Figura 18 - Níveis de retorno da estação de primavera das três épocas de estudo para os períodos de retorno de 5, 10, 15, 20 e 30 anos	20
Figura 19 - Diferença entre os níveis de retorno previstos em 30 anos para os dois recortes de estudo em relação a série temporal completa para todas as estações	21

SUMÁRIO

Introdução	1
Materiais e Métodos	3
Área de Estudo	3
Aquisição e tratamento dos dados	4
Resultados	6
Discussão dos Resultados	22
Conclusões	24
Referências Bibliográficas	25

1. Introdução

As mudanças climáticas são responsáveis por mudanças no ciclo hidrológico, magnitude e frequência, resultado do aumento da temperatura média global. Os eventos climáticos extremos tiveram mudanças significativas a partir de 1950, sendo frequentemente associados a fatores antrópicos, porém a gravidade destas mudanças não afetam apenas o clima mas também outros sistemas terrestres, tais como humanos e naturais (IPCC, 2012).

A análise dos eventos climáticos extremos observados ao longo do último século mostrou que grande parte do mundo se tornou mais quente, enquanto em algumas regiões as taxas de precipitação aumentaram. Muitos são os impactos negativos causados pela ocorrência desses eventos, principalmente, na agricultura (COGATO *et al.*, 2019; RAYMOND *et al.*, 2020) e gestão hídrica (NOBRE *et al.*, 2016), mas também riscos sociais (BELL *et al.*, 2018) e ambientais (MAZAS, 2019), evidenciando a relevância da realização de estudos sobre esses eventos.

Desastres naturais são ocasionados por conta de riscos antrópicos, como a degradação ambiental, e naturais, através de fenômenos geológicos, meteorológicos ou até mesmo biológicos. No Brasil, não é incomum a ocorrência de enchentes em cidades, ao mesmo tempo que a escassez hídrica também é um grande problema de cidades com alto nível de urbanização, fazendo com que áreas urbanas sejam muito vulneráveis à ocorrência de desastres desse tipo (MARENGO *et al.*, 2020).

Alves *et al.* (2021) avaliaram projeções futuras da variabilidade da chuva e eventos extremos de precipitação nas sub-regiões brasileiras, chegando à conclusão que o Brasil irá apresentar maior variabilidade de chuvas no futuro, em que os períodos secos e intensidade das chuvas serão maiores. Cunha *et al.* (2019) realizaram uma avaliação dos eventos de seca ocorridos no Brasil durante os anos de 2011 a 2019 e constatou que, com exceção da região Sul, todas as regiões brasileiras sofreram com eventos de seca, em que o mais severo ocorreu na região nordeste (2011-2017) e o mais intenso na região sudeste (2014-2015).

Estudos realizados no estado de Minas Gerais, avaliando os impactos socioeconômicos da ocorrência de eventos extremos de precipitação sobre o estado durante o mês de Janeiro de 2020, observaram que pelo menos 70% dos eventos ocorridos foram devido ao efeito das mudanças climáticas de causas antrópicas (DALAGNOL *et al.*, 2021). Jesus *et al.* (2020) verificaram a interação entre secas meteorológicas e hidrológicas durante os anos de 1987 a 2017 na Bacia do Rio Doce, localizada na região sudeste, e observaram a influência da seca meteorológica sobre a hidrológica em escala anual e sazonal.

Nesse contexto, compreender e antecipar a mudança nos padrões de ocorrência de eventos extremos de precipitação ajudará o poder público a se preparar para um futuro mais sustentável, a fim de tornar as cidades mais resilientes a desastres relacionados ao clima e gerenciar riscos climáticos. Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar mudanças nos padrões espaço-temporais de extremos sazonais de precipitação na Região Sudeste do Brasil.

Para tanto este trabalho tem como objetivos específicos: a) identificar a distribuição de probabilidade que melhor representa o comportamento de extremos de precipitação para a região; e, b) avaliar mudanças nos padrões dos eventos extremos nos últimos 30 anos.

Este relatório está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 contém os materiais e métodos utilizados neste projeto de iniciação científica e o Capítulo 3 apresenta os resultados obtidos ao longo desse período da pesquisa e, no Capítulo 4, suas respectivas discussões. Por último, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais deste relatório seguido pelas referências bibliográficas utilizadas ao fim deste documento.

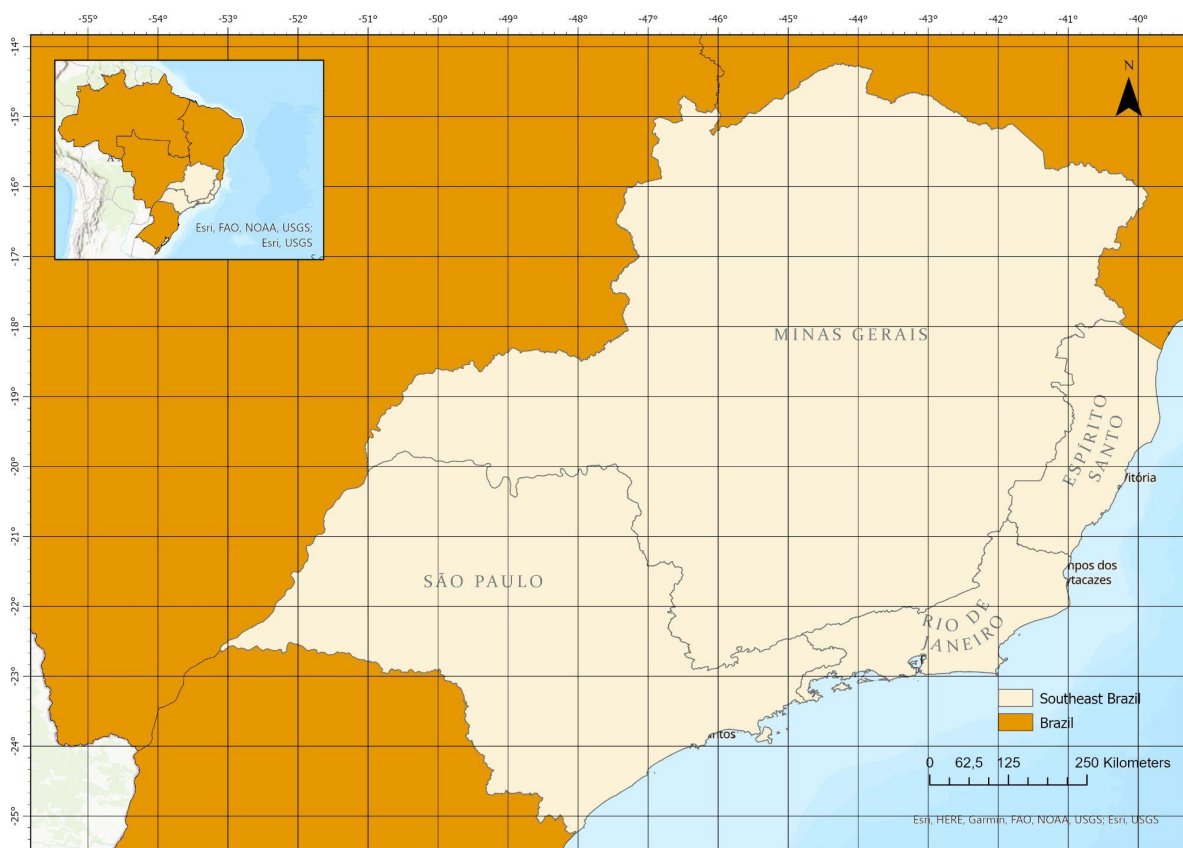
2. Materiais e Métodos

Área de Estudo

A região Sudeste é a região mais populosa do Brasil, possuindo mais de 80 milhões de habitantes. Esta é responsável por mais de 50% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e pela maior taxa de crescimento urbano do país, devendo, portanto, ser uma das regiões mais afetadas do território nacional com as mudanças climáticas (IBGE, 2017).

A região é caracterizada por fortes chuvas sazonais, principalmente no verão (ALVAREZ *et al.*, 2013), devido à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), bem como frentes frias frequentes. A ZCAS é responsável pelo maior volume de precipitação ocorrido entre os meses de outubro e março. Ela é caracterizada por uma região de alta conectividade, posicionada na direção do sul da Amazônia ao Sudeste do Brasil (SANTOS *et al.*, 2021). Carvalho *et al.* (2002) verificaram que tanto a intensidade quanto a forma de convecção da ZCAS afetam diretamente a ocorrência de eventos extremos na região sudeste do Brasil, principalmente na estação de verão.

Figura 1: Localização da região sudeste do Brasil.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

Aquisição e tratamento dos dados

O desenvolvimento do presente trabalho começou a partir da sistematização de dados pluviométricos diários da região obtidos junto ao CPC (Climate Predict Center) da NOAA (National Ocean and Atmospheric Agency) (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/>) durante os anos de 1981 a 2020, a fim de realizar análises em dois recortes distintos: 1981 a 2010 e 1991 a 2020.

A partir da série temporal de precipitação foram calculadas estatísticas sobre a região que compreende o sudeste do Brasil ($14^{\circ}13' S - 22^{\circ}54' S$ e $39^{\circ}51' W - 51^{\circ}02' W$). Neste trabalho os dados diários foram transformados em dados mensais, em seguida separados em acumulados sazonais para os períodos: dezembro a fevereiro (DJF - Verão), março a maio (MAM - Outono), junho a agosto (JJA - Inverno) e setembro a novembro (SON - Primavera).

Para estimar as alterações nos níveis e períodos de retorno dos eventos extremos de precipitação foram utilizadas as técnicas "Generalized Extreme Value Analysis" (GEV) e "Generalized Pareto Distribution" (GPD), que são técnicas bastante utilizadas em ciências

aplicadas nas últimas décadas (Coles *et al.*, 2001). A distribuição GEV, que será aplicada nos dados climáticos obtidos, é dependente de três parâmetros: μ , σ , ξ . Onde μ é o parâmetro de localização variando de $-\infty < \mu < +\infty$, σ é o parâmetro de escala com $0 < \sigma < \infty$, ξ é o parâmetro de forma com $-\infty < \xi < +\infty$.

O parâmetro de localização é um parâmetro escalar, que determina o deslocamento da distribuição de probabilidade, ou seja, caso ele aumente, a densidade de probabilidade se desloca para a direita, mantendo sua forma (EKAWATI *et al.*, 2015); já o parâmetro de escala é diretamente proporcional ao espalhamento da distribuição de probabilidade (BHATTACHARYA & BHATTACHARJEE, 2010). Por fim, ξ trata literalmente da forma da distribuição de probabilidade, diferente dos demais parâmetros que deslocam ou encolhem/esticam a função (HAN, 2004).

A distribuição GEV é a combinação de três formas assintóticas para distribuições de extremos: Gumbel, Weibull, and Frechet (FISHER & TIPPETT, 1928; WILKS, 2011). Quando se trata das distribuições de Weibull e Frechet, $\xi < 0$ e $\xi > 0$, respectivamente, se a distribuição assume a forma que representa uma distribuição de Gumbel tem-se $\xi = 0$.

Na distribuição GEV, a amostra é dividida em sub-períodos, podendo ser mensal, sazonal ou anual, em cada bloco o máximo ou mínimo é extraído para compor os dados de extremos (SANTOS *et al.*, 2015). Neste projeto, foram considerados extremos os máximos sazonais de precipitação. Nessa teoria, o período de retorno (intervalo médio de recorrência) corresponde à probabilidade p de um nível de retorno ter 100% de chance de ser excedido em um determinado ano. Lima *et al.* (2016) destacam que a GEV possui baixa estimativa de incerteza quanto aos cálculos dos níveis de retorno, porém informam que quanto maior o período de retorno, maior a incerteza associada.

A função de distribuição acumulada da GPD é dependente de três parâmetros: μ , σ , ξ . Onde μ é o parâmetro de localização variando de $-\infty < \mu < +\infty$, σ é o parâmetro de escala com $0 < \sigma < \infty$, ξ é o parâmetro de forma com $-\infty < \xi < +\infty$. Os casos especiais da GPD são representados pelas seguintes situações: i) Se tanto o parâmetro de forma quanto o de localização são iguais a zero a GDP é equivalente a uma distribuição exponencial; ii) Se o parâmetro de forma é maior que zero e a localização ser igual a razão entre a escala e a forma, então temos o equivalente a uma Distribuição de Pareto com um parâmetros restritos; iii) Se o parâmetro de localização for igual a zero, a distribuição associada pode ser uma distribuição generalizada de pareto exponencializada.

Usualmente os parâmetros da GPD são estimados pelo método da máxima verossimilhança, porém também pode ser utilizado o método dos L-moments por ser

computacionalmente mais simples e os estimadores representarem melhor as propriedades da amostra, principalmente quando comparados com outros métodos (HOSKING, 1990; ZWIERS & KHARIN, 1998). Ao contrário da GEV que trabalha utilizando máximos por bloco, a GPD utiliza limites para definir quais elementos irão compor sua amostra.

Com a estimativa dos níveis de retorno para os determinados períodos de retorno, será calculada a porcentagem de alteração e probabilidade de ocorrência desses níveis nos dois recortes de estudo, propondo-se prever onde irá ocorrer a mudança de padrão de ocorrência de precipitação.

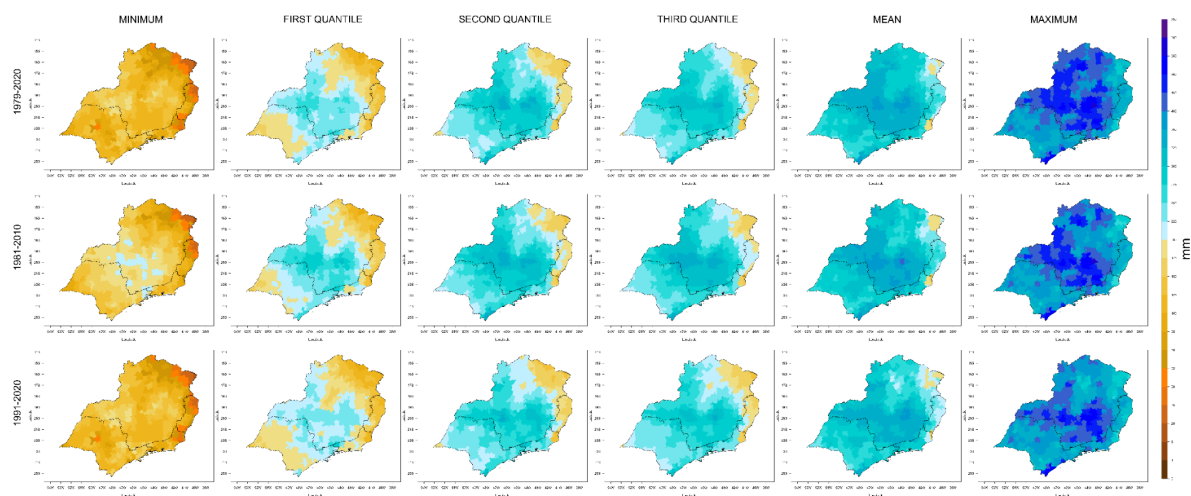
3. Resultados

Com a planilha de dados de precipitação diária por pixel da área de estudo, foi calculada a precipitação mensal e depois a segregação sazonal, possibilitando o cálculo das estatísticas descritivas de cada recorte (Figuras 2, 3, 4 e 5).

Analisando a Figura 2, foi possível concluir que, no verão, houveram mudanças nos padrões espaço-temporais de precipitação, uma vez que na primeira coluna no recorte de 1981 a 2010, o sul do estado de Minas Gerais apresentam valores de precipitação mais elevados (200-225 mm), enquanto no período de 1991 a 2020, esse local apresenta precipitação entre 125 e 150 mm, fato que demonstra uma diminuição nos níveis de precipitação na área citada.

Sobre os máximos de precipitação nesta estação, foi verificado que o norte do estado de Minas Gerais também apresentou diminuição nos valores de precipitação do primeiro para o segundo recorte, já que no período de 1981 a 2010 a localidade apresentou valores entre 400 e 550 mm; enquanto no intervalo de 1991 a 2020, os valores ficam entre 325 e 450 mm.

Figura 2: Estatísticas descritivas da estação de verão nos três períodos de estudo.

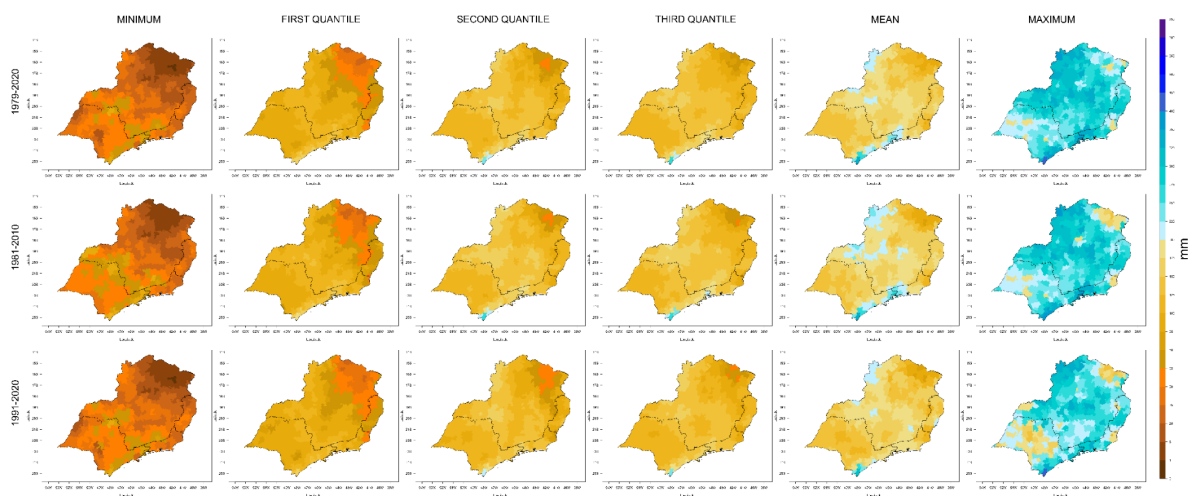


Fonte: realizado pelos autores, 2022.

A Figura 3 exibe as estatísticas descritivas na estação de outono. Sobre os mínimos de precipitação, foi possível verificar que na região norte do estado de São Paulo durante os anos de 1981 a 2010 a precipitação se encontra no intervalo de 65 a 100 mm; enquanto no período de 1991 a 2020, a mesma localidade apresentou precipitação entre 50 e 95 mm, demonstrando uma diminuição conforme o passar do tempo.

Analisando os máximos de precipitação, foi possível identificar que também ocorreu diminuição nos valores de precipitação entre os recortes de estudo, porém, desta vez, no centro do estado de São Paulo, uma vez que no período de 1981 a 2010 a região apresentou precipitação máxima entre 200 e 250 mm; já no período de 1991 a 2020, o mesmo local exibiu valores entre 175 e 225 mm.

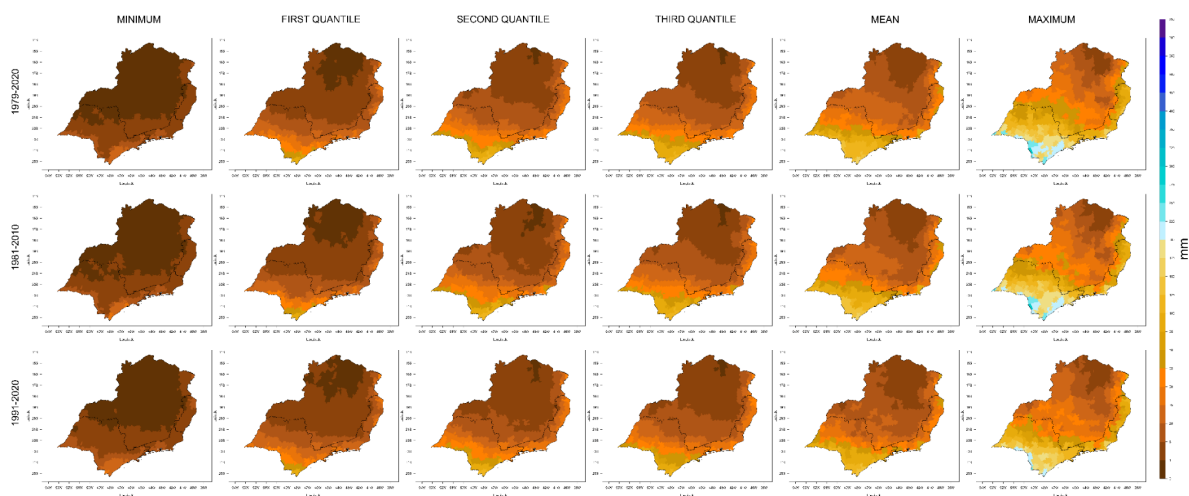
Figura 3: Estatísticas descritivas da estação de outono nos três períodos de estudo.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

Nas estatísticas descritivas da estação de inverno, foi possível verificar que houve um aumento, ainda que pouco expressivo, nos valores mínimos de precipitação do primeiro recorte (1981-2010) para o segundo (1991-2020) a noroeste do estado de São Paulo. No que se diz respeito aos máximos de precipitação dos períodos de estudo, também foi identificado diminuição dos valores de precipitação no estado de São Paulo, desta vez ao sul. Além disso, também ocorreu diminuição nos níveis de precipitação no centro do estado de Minas Gerais (Figura 4).

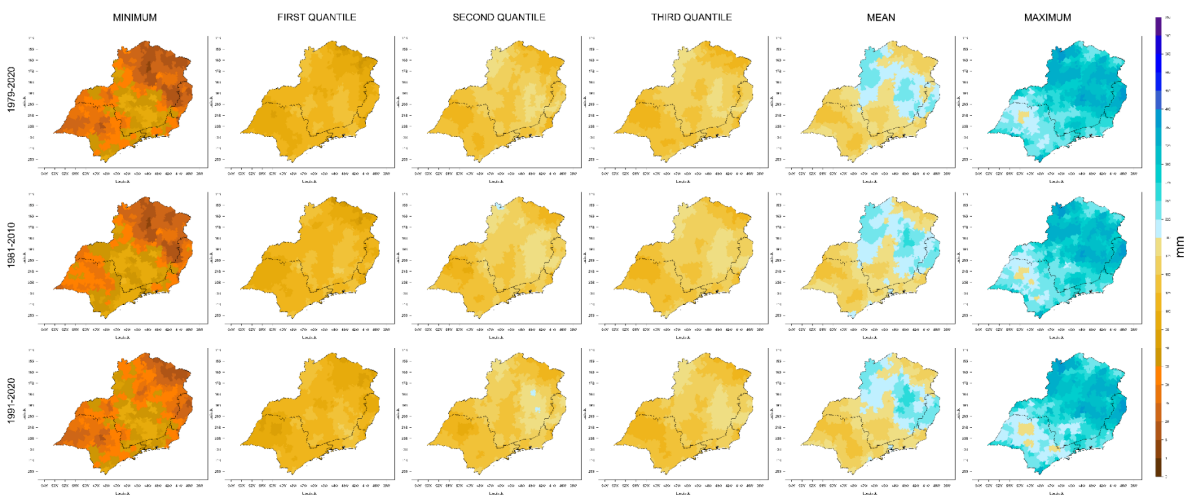
Figura 4: Estatísticas descritivas da estação de inverno nos três períodos de estudo.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

Por fim, a Figura 5 ilustra as estatísticas descritivas da estação de primavera. Assim como nas demais estações, a primavera também apresentou diminuição nos valores de precipitação, tanto nos mínimos, quanto nos máximos, comparando os dois recortes de estudo. Nos mínimos, essa diminuição ocorreu, principalmente, no centro do estado de São Paulo, mas também a oeste do estado de Minas Gerais; já sobre os máximos, a diminuição também foi verificada no centro do estado de São Paulo e ao sul de Minas Gerais.

Figura 5: Estatísticas descritivas da estação de primavera nos três períodos de estudo.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

Após o cálculo das estatísticas descritivas sazonais, foram aplicados os métodos GEV e GPD, dentre elas a GEV foi a que melhor se ajustou ao conjunto de dados, uma vez que a GPD gerava muitos outliers, tornando os cálculos inconsistentes.

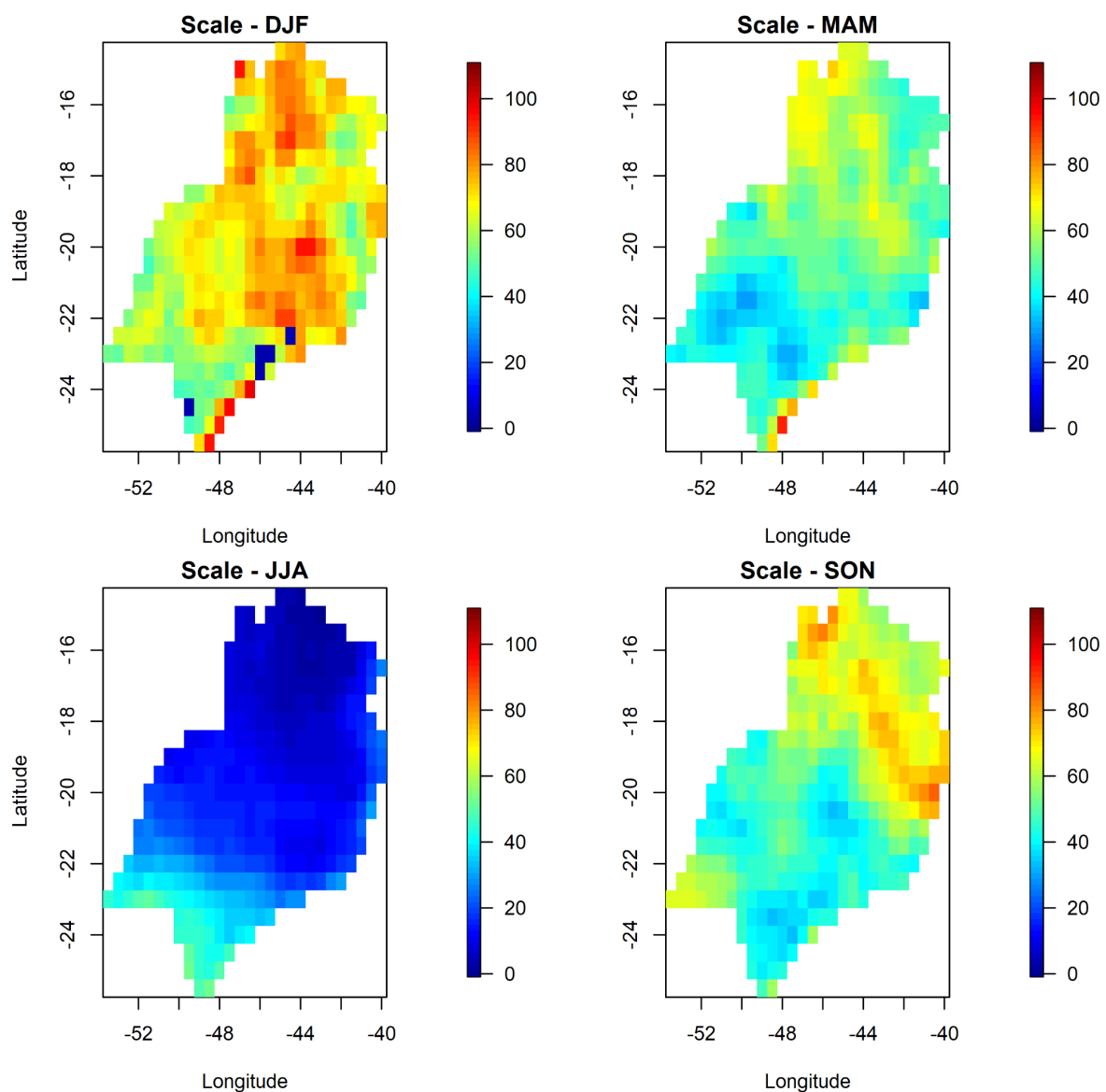
Desta forma, as Figura 6, 7 e 8 exibem os valores do parâmetro de escala, calculados pela GEV, de cada pixel na série toda, primeiro recorte (1981 a 2010) e segundo recorte (1991 a 2020), respectivamente.

Analisando a Figura 6, foi possível concluir que, no verão, os menores valores do parâmetro em questão (50-70) se concentram ao sul (estado de São Paulo), enquanto os valores superiores (80-100) se concentram ao centro-leste na divisa entre os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo; já na estação de outono, os maiores valores (70-90) estão localizados ao norte de Minas Gerais, já os menores (30-60) são predominantes pela área de estudo.

Na estação de inverno, foi verificado que grande parte dos estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e Espírito Santo concentram os menores valores do parâmetro em análise

(0-20), enquanto a maior parte do estado de São Paulo, contém os maiores (30-50), formando um efeito degradê da distribuição espacial; por fim, na primavera, seus menores valores (35-55) estão concentrados no estado de São Paulo e parte em Minas Gerais; enquanto os maiores (70-85), ao norte de Minas Gerais e Espírito Santo.

Figura 6: Parâmetro de escala da GEV para cada estação da região sudeste durante todo período de estudo.

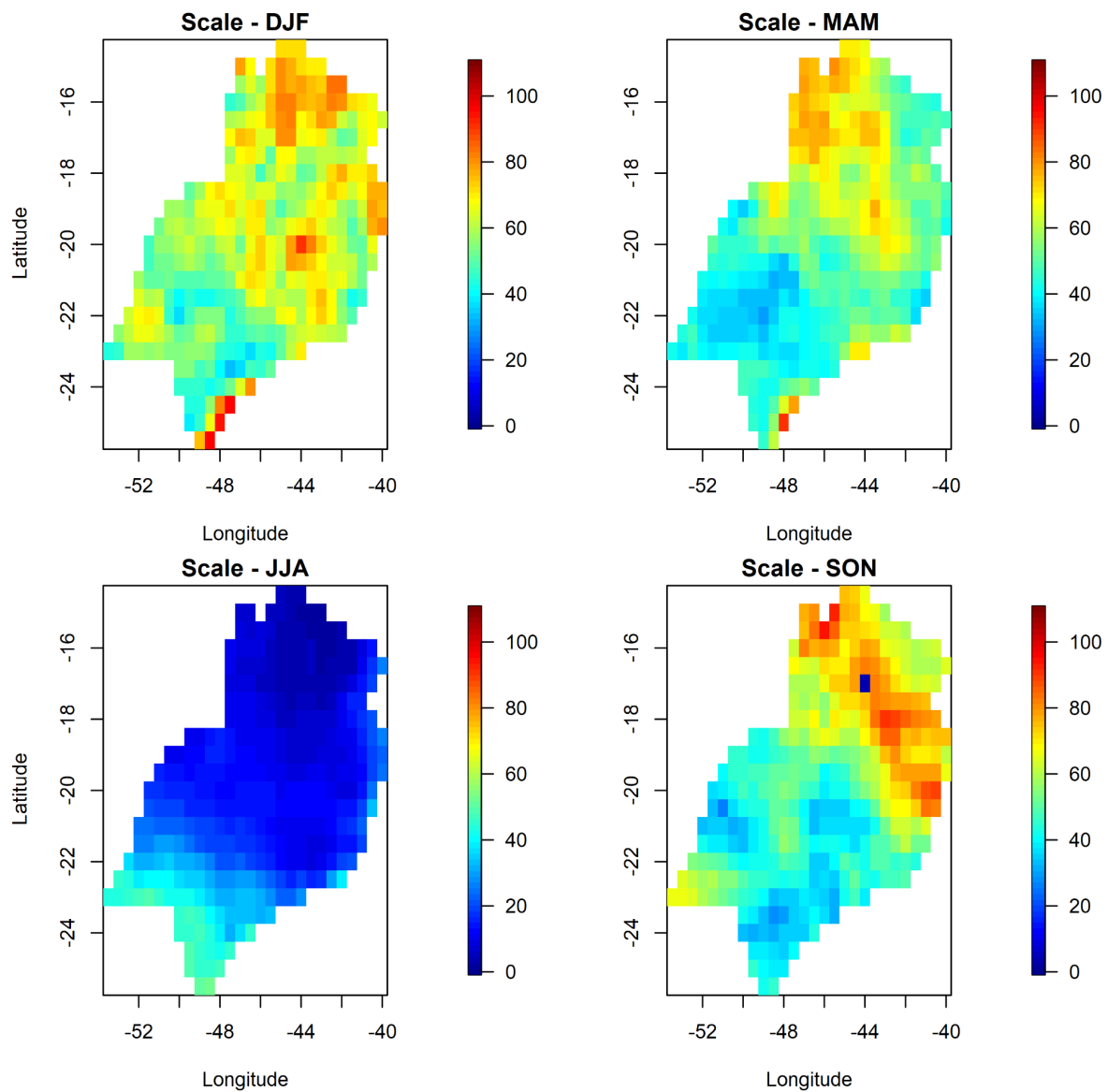


Fonte: realizado pelos autores, 2022.

A Figura 7 exibe os valores do mesmo parâmetro para o primeiro recorte de estudo. No verão, é possível perceber que o centro/norte, localizado em Minas Gerais e parte do Rio

de Janeiro, apresenta altos valores (60-100), enquanto no estado de São Paulo há menores valores (~40); já no outono, a maior parte da área de estudo apresenta baixos valores, com destaque para a região oeste, localizada no estado de São Paulo (35-55), enquanto o norte (Minas Gerais) apresenta os valores mais elevados (70-90). A estação de inverno exhibe comportamento espacial do parâmetro em questão muito semelhante ao visto na Figura 2, enquanto a primavera apresenta diferenças significativas entre o centro/sul (estado de São Paulo), apresentando menores valores (20-50), com o norte, localizado na divisa entre os estados de Espírito Santo e Minas Gerais, de altos valores do parâmetro (65-90).

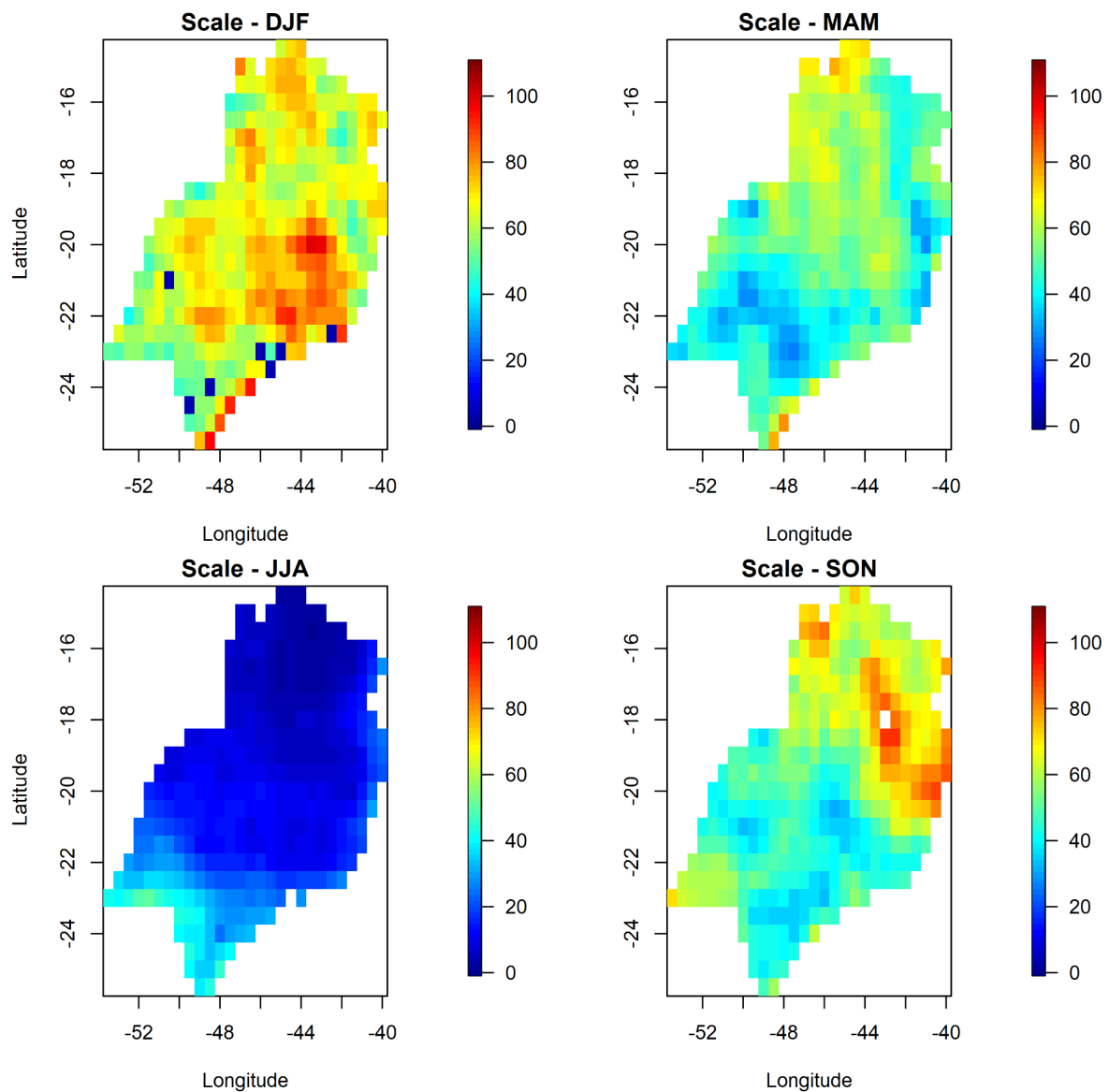
Figura 7: Parâmetro de escala da GEV para cada estação da região sudeste durante os anos de 1981 a 2010.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

Ainda sobre o parâmetro de escala, durante o segundo recorte de estudo (1991 a 2020), foi possível verificar mudança brusca de comportamento espaço-temporal somente na estação de verão, enquanto as demais exibiram distribuição do parâmetro muito semelhante a do primeiro recorte, exibido na Figura 7. No recorte de 1991 a 2020 (Figura 8), o verão apresenta altos valores (60-100) em quase toda a extensão da área de estudo, com destaque para a divisa entre os estados de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro.

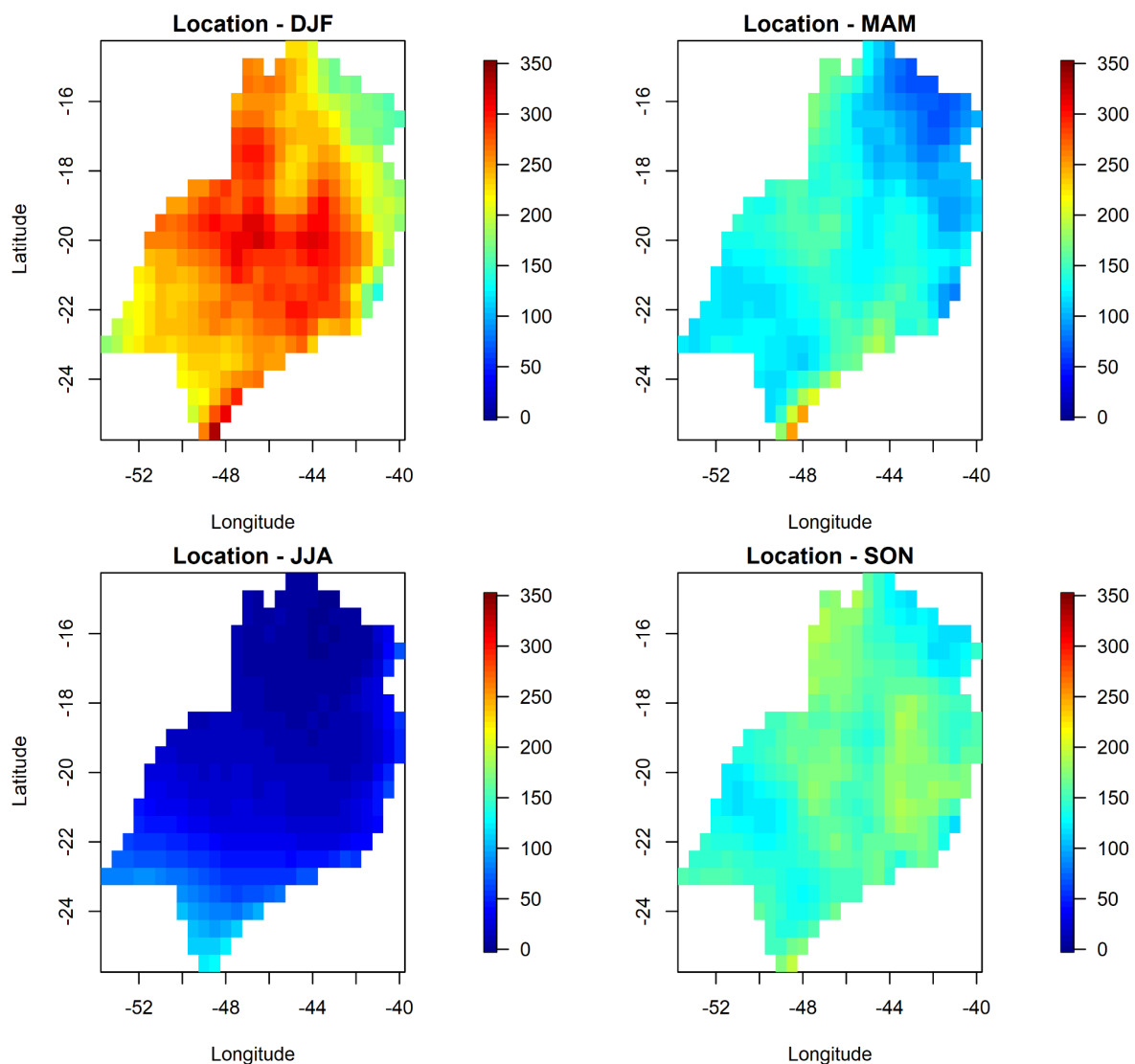
Figura 8: Parâmetro de escala da GEV para cada estação da região sudeste durante os anos de 1991 a 2020.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

Na análise do parâmetro de localização a respeito de todo o período de estudo, foi possível a verificação de que a estação de verão apresentou seus maiores valores (250-350) concentrados no centro/leste da área de estudo (Minas Gerais), enquanto suas bordas, localizadas a leste do Espírito Santo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, apresentaram valores menores; já no outono, a área tem predominância de valores menores do parâmetro (50-150). Sobre as estações de inverno e primavera, a distribuição espacial do parâmetro de localização apresentou comportamento muito semelhante ao parâmetro de escala (Figura 9).

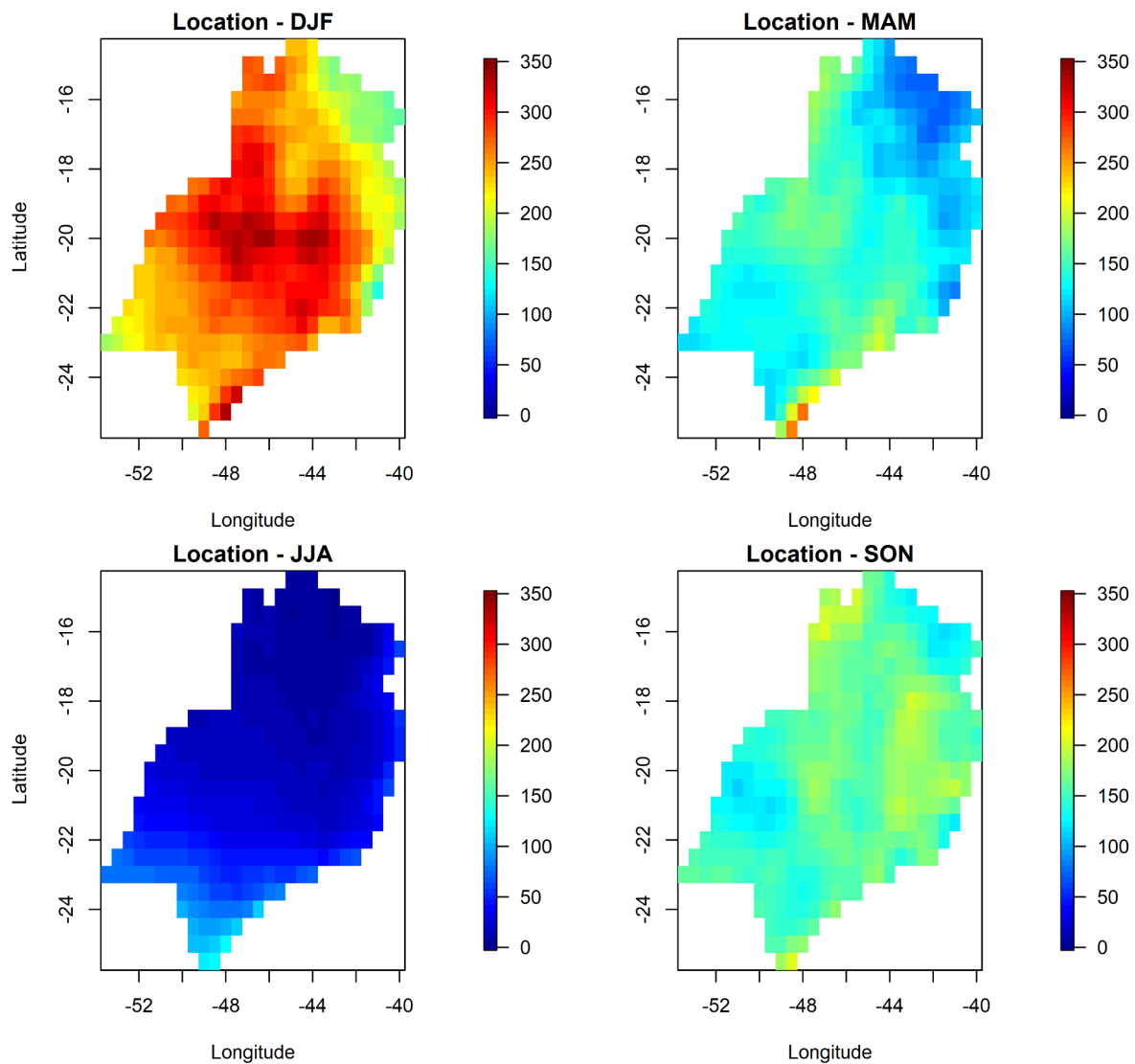
Figura 9: Parâmetro de localização da GEV para cada estação da região sudeste durante todo período de estudo.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

A Figura 10 exibe os valores do mesmo parâmetro para o primeiro recorte de estudo. No verão, é possível perceber que o centro, na divisa entre os estados de São Paulo e Minas Gerais, apresenta altos valores (275-350), enquanto em grande parte das bordas a nordeste de Minas Gerais) e leste do Espírito Santo estão os menores valores (150-225); já no outono, a maior parte da área de estudo apresenta baixos valores, com destaque para ao leste de Minas Gerais (75-150), enquanto somente o extremo sul do estado de São Paulo apresenta poucos pixels com altos valores (170-250). A estação de inverno e da primavera exibem comportamento espacial do parâmetro em questão muito semelhante ao visto na Figura 9.

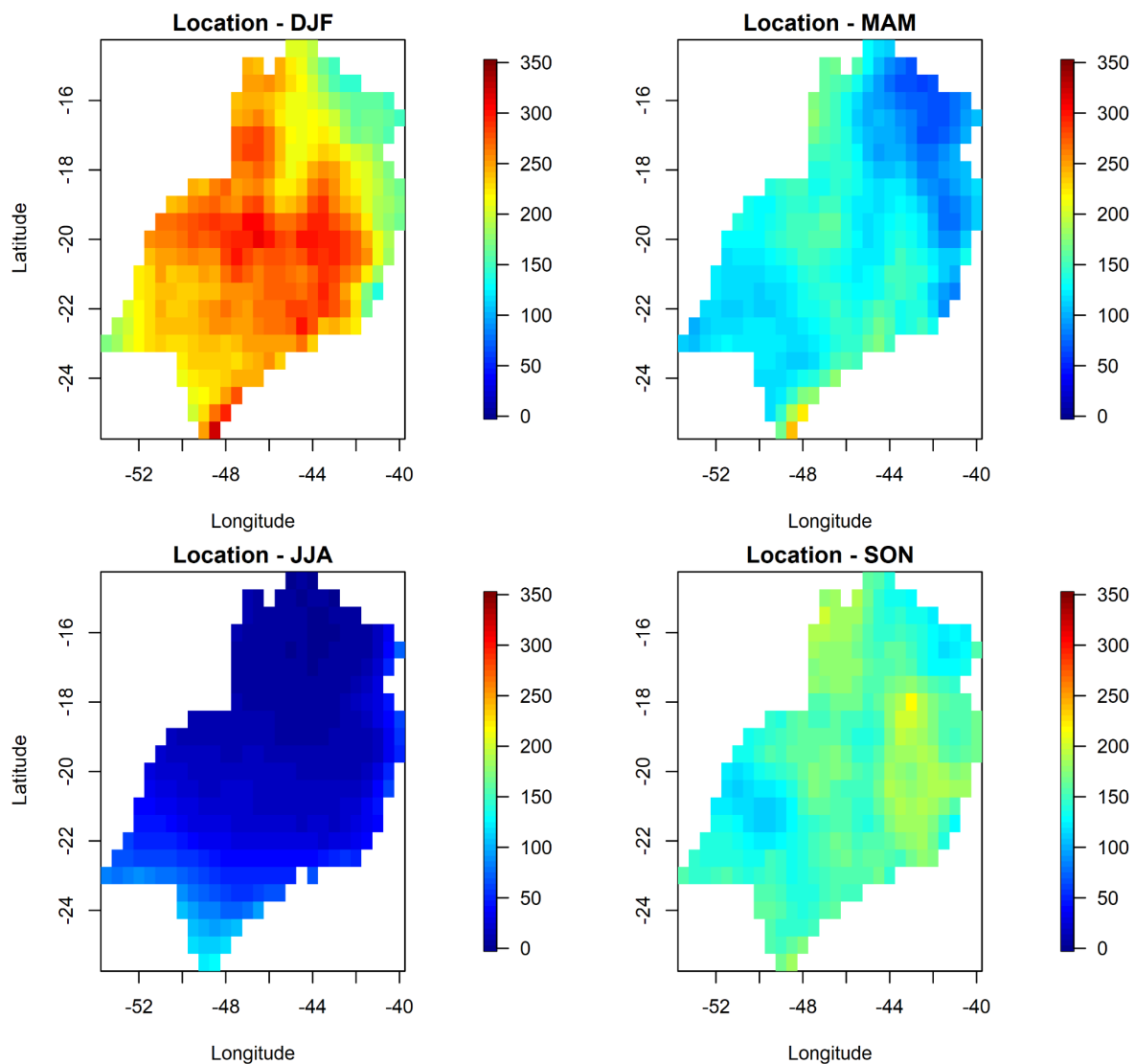
Figura 10: Parâmetro de localização da GEV para cada estação da região sudeste durante os anos de 1981 a 2010.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

Durante o segundo recorte de estudo, entre os anos de 1991 a 2020, as estações mantêm os padrões espaço-temporais desse parâmetro, apresentando somente diferenças na magnitude do parâmetro analisado.

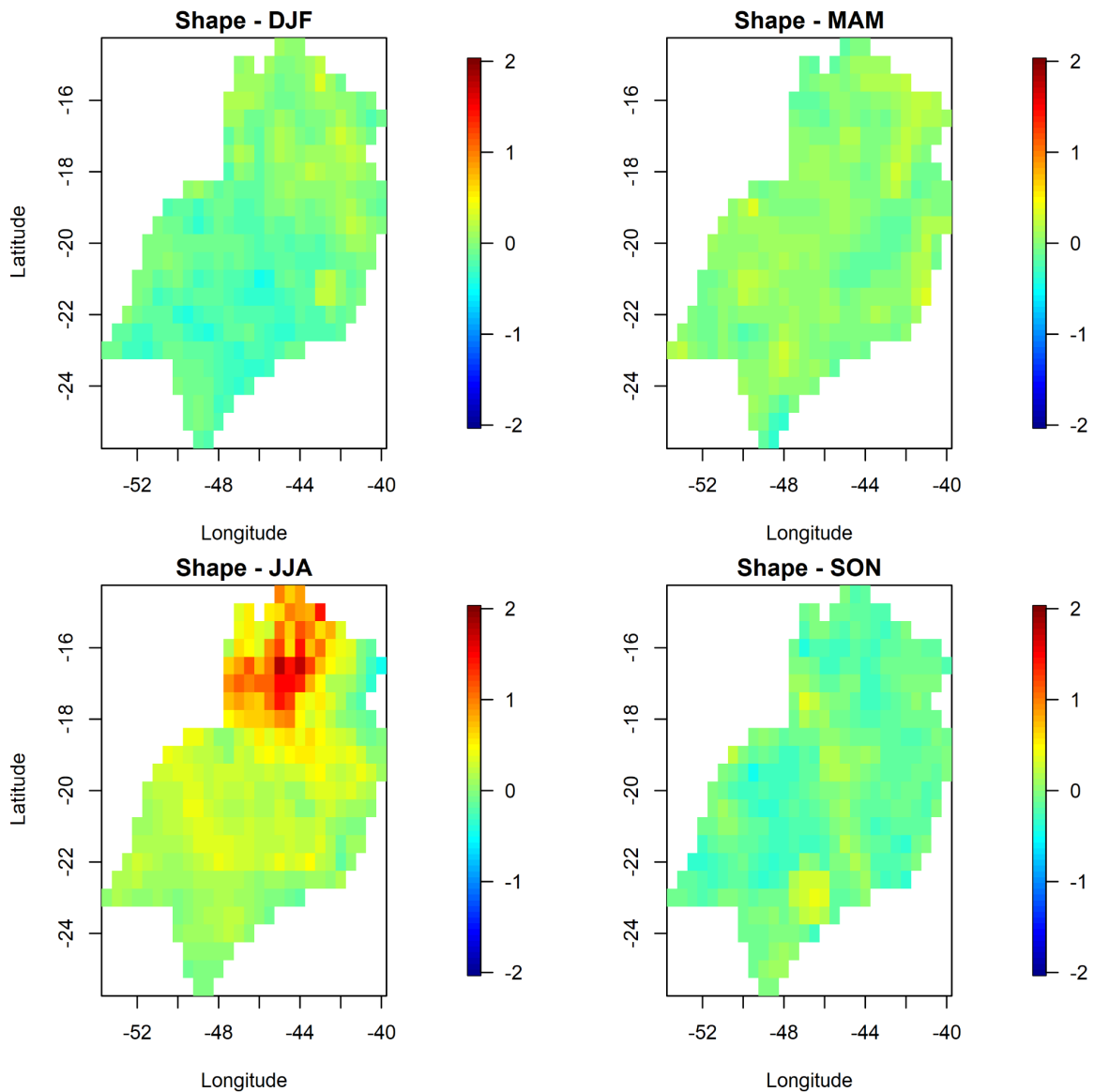
Figura 11: Parâmetro de localização da GEV para cada estação da região sudeste durante os anos de 1991 a 2020.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

Tratando agora sobre o parâmetro de forma, é possível verificar na Figura 12 que há uma predominância de valores do parâmetro de forma igual a zero, o que indica uma distribuição de Gumbel no verão, outono e primavera, porém, no inverno, grande parte dos valores são positivos no sentido centro/norte, localizado em Minas Gerais, o que indica que os valores serão aplicados à distribuição de Fréchet.

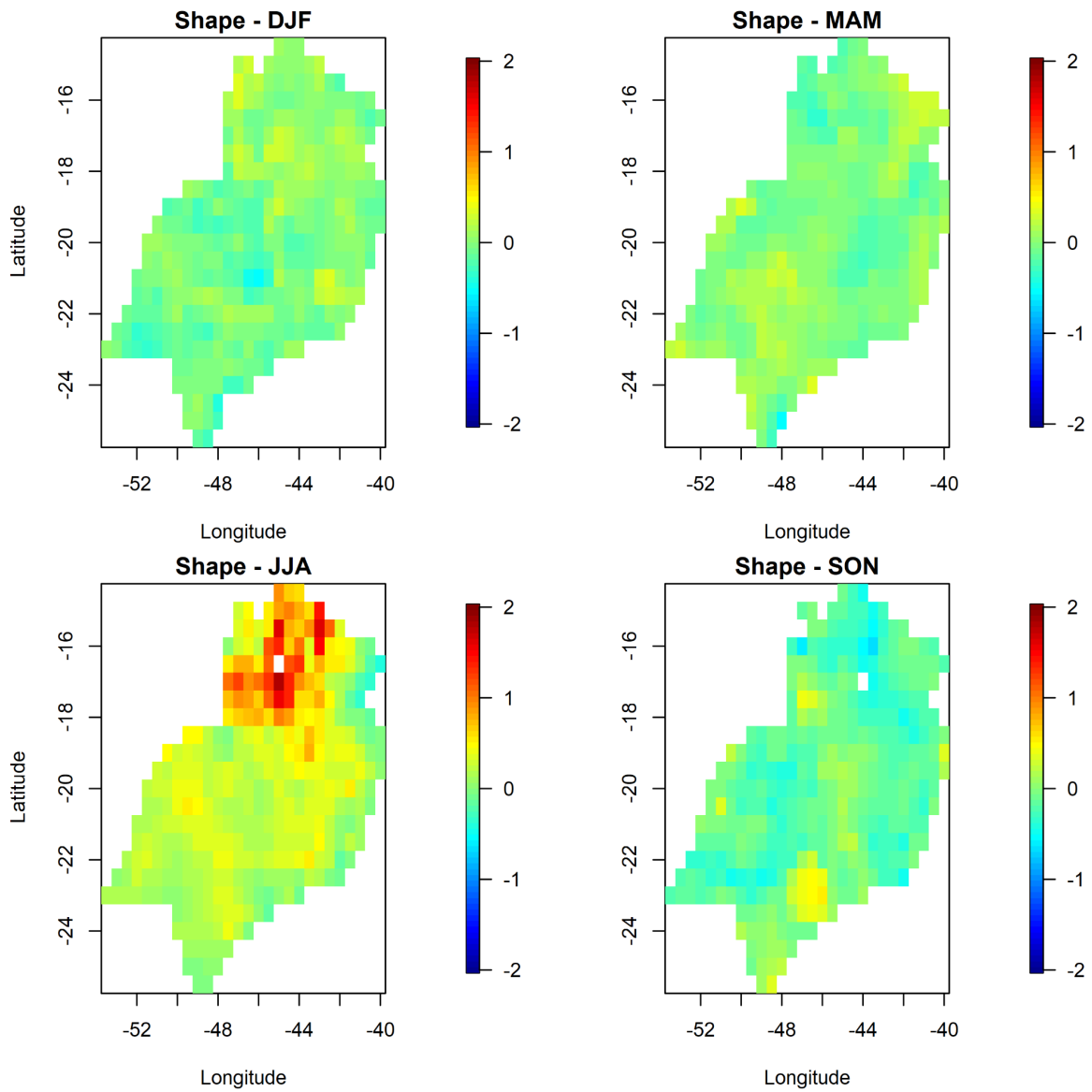
Figura 12: Parâmetro de forma da GEV para cada estação da região sudeste durante todo período de estudo.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

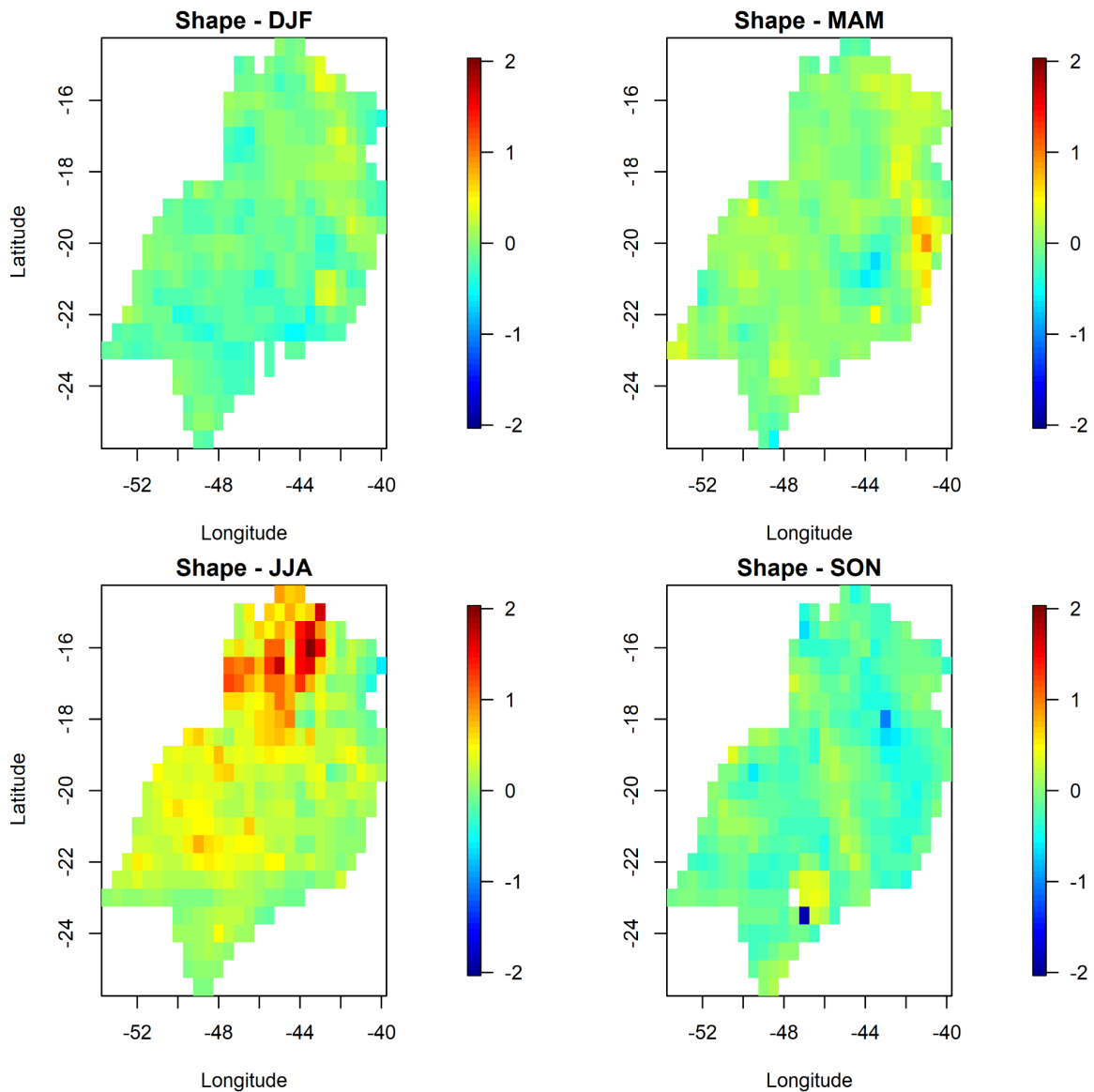
As Figuras 13 e 14 exibem os valores do mesmo parâmetro para o primeiro e segundo recorte de estudo. Foi possível verificar que a distribuição espaço-temporal desse parâmetro é muito semelhante ao do período completo (Figura 12), alterando apenas sua intensidade, comportamento muito semelhante ao parâmetro de localização, já discutido anteriormente.

Figura 13: Parâmetro de forma da GEV para cada estação da região sudeste durante os anos de 1981 a 2010.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

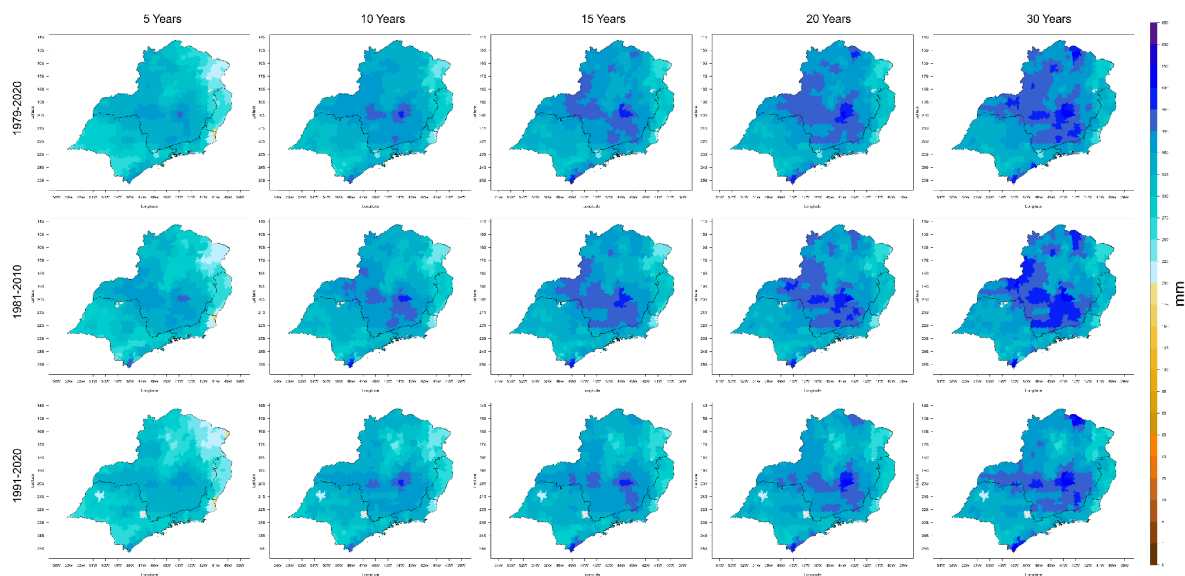
Figura 14: Parâmetro de forma da GEV para cada estação da região sudeste durante os anos de 1991 a 2020.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

A aplicação da GEV também permitiu a estimativa dos níveis de retorno para os períodos de retorno de 5, 10, 15, 20 e 30 anos para toda a série temporal e demais recortes. A Figura 15 exhibe os valores desses níveis para os determinados períodos durante a estação de verão de nas épocas de estudo. Ao comparar os períodos de 1981 a 2010 e 1991 a 2020, foi possível concluir que, nesta estação, os níveis de retorno em 30 anos ao norte do estado de Minas Gerais diminuíram, enquanto nas demais regiões não há diferenças muito bruscas.

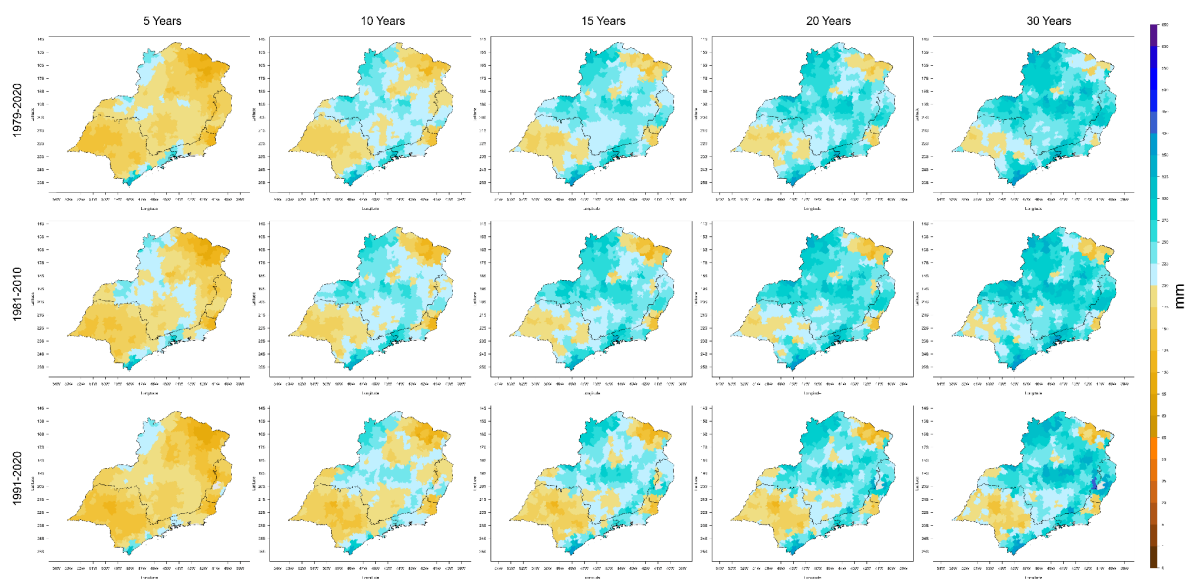
Figura 15: Níveis de retorno da estação de verão das três épocas de estudo para os períodos de retorno de 5, 10, 15, 20 e 30 anos.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

No outono, ao comparar os níveis de retorno em 30 anos, entre os anos de 1981 a 2010 e 1991 a 2020, é possível concluir que houve diminuição dos mesmos principalmente no centro do estado de São Paulo, apesar da verificação de aumento no centro do estado do Espírito Santo (Figura 16).

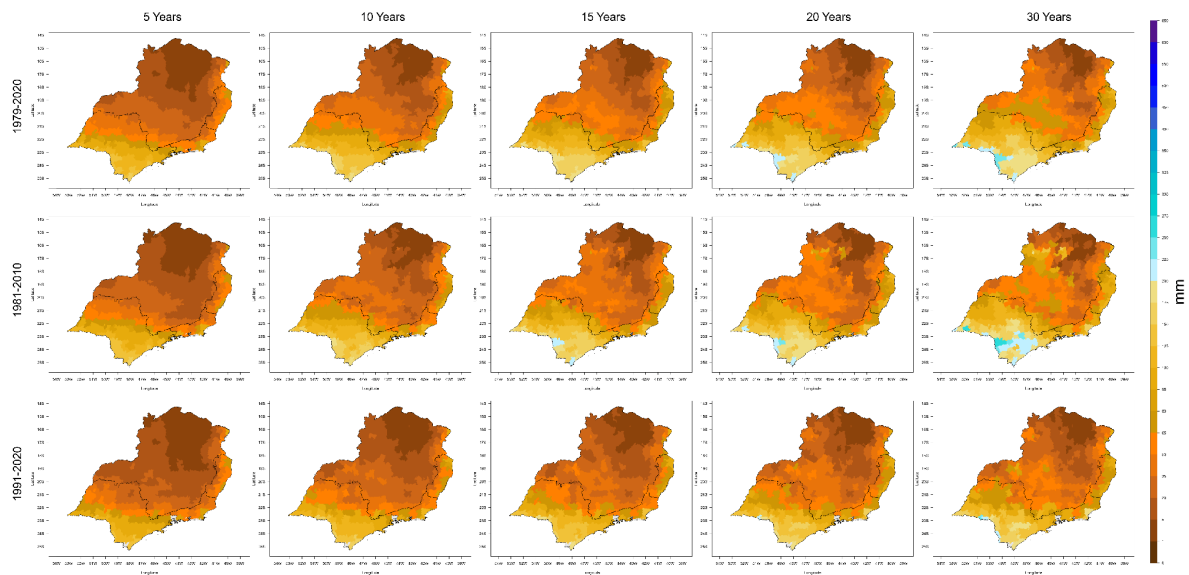
Figura 16: Níveis de retorno da estação de outono das três épocas de estudo para os períodos de retorno de 5, 10, 15, 20 e 30 anos.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

Na estação de inverno, também foi verificada diminuição dos níveis de retorno em 30 anos na comparação entre os intervalos de 1981 a 2010 e 1991 a 2020, uma vez que o sul de São Paulo e de Minas Gerais diminuíram (Figura 17).

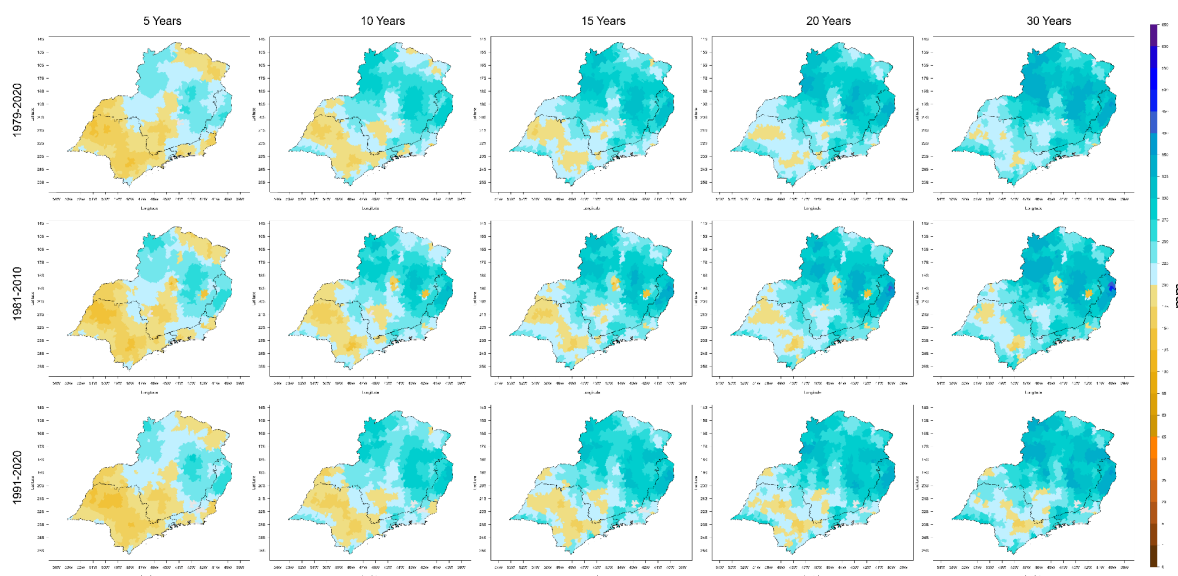
Figura 17: Níveis de retorno da estação de inverno das três épocas de estudo para os períodos de retorno de 5, 10, 15, 20 e 30 anos.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

Por fim, como pode ser visto na Figura 18, assim como as demais estações, a primavera apresentou diminuição dos níveis de retorno em 30 anos do recorte mais antigo para o mais recente na região centro-oeste do estado de São Paulo.

Figura 18: Níveis de retorno da estação de primavera das três épocas de estudo para os períodos de retorno de 5, 10, 15, 20 e 30 anos.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

Após isso, foram calculadas as porcentagens de alteração dos níveis de retorno calculados/simulados pela GEV de cada recorte (1981-2010 e 1991-2020) em relação a série temporal completa (1979-2020). A Figura 19 ilustra a diferença entre os níveis de retorno dos recortes em relação a série temporal completa para o período de retorno de 30 anos, de forma que a primeira linha da imagem trata do recorte mais antigo e a segunda do mais recente, sendo as colunas as respectivas estações de análise (Verão, Outono, Inverno e Primavera).

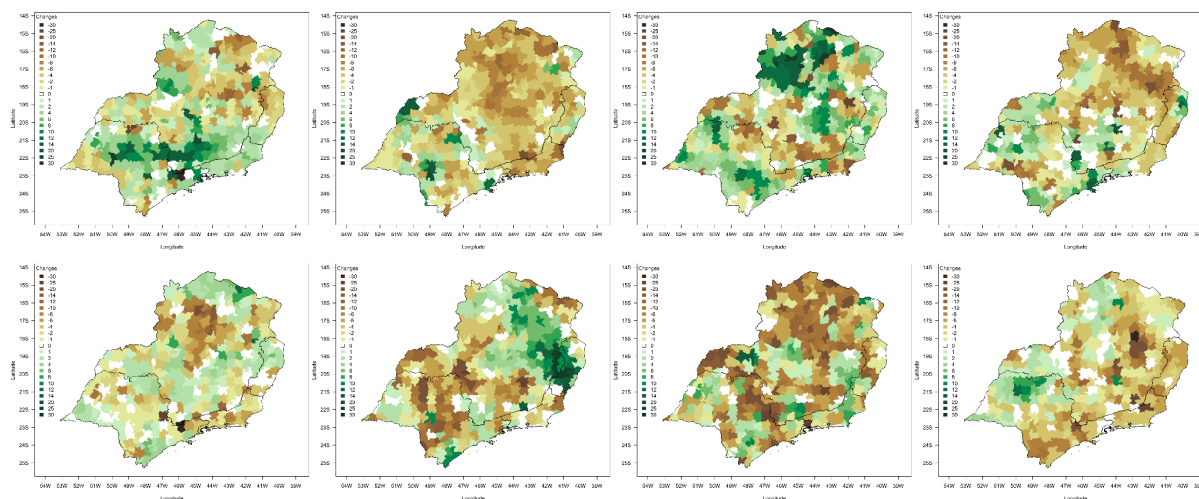
Analisando a ilustração para a estação de verão, é possível verificar que no sentido centro-leste do estado de São Paulo, no sul de Minas Gerais, no norte do Espírito Santo e no Rio de Janeiro a alteração verificada no primeiro recorte era positiva, enquanto no segundo se tornou negativa, demonstrando mudanças no comportamento da precipitação nas regiões.

Apesar do aumento verificado a oeste e sul de São Paulo. Já na estação de outono, foi possível detectar aumento nessa diferença em análise no sentido centro-sul do estado de Espírito Santo e centro-oeste de Minas Gerais, enquanto o centro de São Paulo apresentou diminuição entre os níveis de retorno de cada recorte.

Sobre a estação de inverno, é possível concluir que ocorreu considerável diminuição dos níveis de retorno do recorte mais antigo para o mais recente no norte de Minas Gerais e de São Paulo, além do estado do Espírito Santo. Por fim, analisando os mapas para a estação de primavera, é possível verificar diminuição nos estados do Espírito Santo e Rio de Janeiro,

sentidos centro-sul e centro-leste de São Paulo e oeste de Minas Gerais, apesar do aumento no norte de Minas Gerais.

Figura 19: Diferença entre os níveis de retorno previstos em 30 anos para os dois recortes de estudo em relação a série temporal completa para todas as estações.



Fonte: realizado pelos autores, 2022.

4. Discussão dos Resultados

O estudo da mudança nos padrões de ocorrência de eventos extremos tem se intensificado em diversas partes do mundo (DAVISON *et al.*, 2012; ABREU *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2019), em que diversos autores destacam a ação das mudanças climáticas como uma possível causa para tal (ARMAL *et al.*, 2018; DAI *et al.*, 2018; OSAKA & BELLAMY, 2020). A avaliação desses eventos é de extrema importância para preparação e gerenciamento de desastres naturais (AGHAKOUCHAK *et al.*, 2020; MARENGO *et al.*, 2021). Muitos autores também realizam a análise desses eventos de forma sinótica (BRASILIENSE *et al.*, 2018; AMORIM *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Nesse sentido, a espacialização desses dados é uma ferramenta poderosa para a prevenção e mitigação das consequências desses eventos (AHMAD *et al.*, 2018; RUPA & MUJUMDAR, 2018; GAO *et al.*, 2021). Brubacher *et al.* (2020) revisaram diversos métodos de preenchimento de falhas e de interpolação espacial de dados de precipitação. Xi *et al.* (2018) apresentaram uma visão geral das mudanças nas médias e extremos climáticos em sua área de estudo durante o período 1961-2015, seguida da análise da distribuição espacial e tendências temporais para cada indicador das variáveis climáticas estudadas, e verificaram

que a frequência de extremos de alta temperatura aumentou, enquanto a frequência de extremos secos diminuiu.

No contexto brasileiro, existem diversos estudos realizados em diferentes regiões do país, não só com uso da GEV (CARVALHO *et al.*, 2013; LIMA *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2016; PEDRON *et al.*, 2017; FISCHER *et al.*, 2019), mas também com outras técnicas para modelagem de eventos extremos de precipitação (FERNANDES & RODRIGUES, 2018; KIM *et al.*, 2019; MARTINS *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2020). A utilização dessas funções de distribuição de probabilidade nos permitem calcular os níveis e períodos de retorno na área de estudo (COOLEY *et al.*, 2007; MONDAL e MUJUNDAR 2015; OLIVEIRA & LIMA, 2019). Muitos trabalhos empregam metodologias semelhantes a deste artigo, o que evidencia o sucesso da mesma (SHAO *et al.*, 2019; TONG *et al.*, 2019).

No âmbito da região sudeste do Brasil, o período entre os anos de 2014/2015 ficou marcado por uma severa seca na região, explicada por Marengo e Alves (2016) e Geirinhas *et al.* (2021). Vásquez *et al.* (2018) investigaram o mesmo fenômeno, porém com a utilização de imagens de sensoriamento remoto para análise. Também há diversos estudos sobre a ocorrência de eventos extremos em localidades da região, com diferentes metodologias (NUNES *et al.*, 2018; AVILA-DIAZ *et al.*, 2020a; AVILA-DIAZ *et al.*, 2020b; LIMA *et al.*, 2021).

Zilli *et al.* (2017) realizaram uma análise abrangente da variabilidade espacial das tendências de precipitação extrema sobre o sudeste brasileiro no litoral dos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo. Os resultados deste estudo evidenciam que os aumentos na frequência e intensidade de eventos extremos contribuíram para tendências positivas na precipitação total sazonal e média diária sobre São Paulo. Os autores também comentam que esses aumentos são influenciados pela proximidade de grandes centros urbanos e feições topográficas na região.

Miranda *et al.* (2020) avaliaram a aplicação de métodos de agrupamento em dados do projeto GPM para identificar regiões homogêneas no sudeste do Brasil quanto à precipitação anual e sazonal de 2001 a 2019. Os autores descobriram que o método K-Means foi o mais adequado para o objetivo de estudo e que, no período de estudo, as distribuições sazonais e anuais têm diferentes impactos na análise dos padrões pluviométricos na área de estudo, pois podem ser influenciadas por diversos fatores, como zonas de convergência, estiagens, maior duração do período chuvoso, incêndios, entre outros.

Batista *et al.* (2019) investigaram o ajuste da GEV aos dados anuais de precipitação máxima diária para estações pluviométricas no sudeste do Brasil e os resultados permitiram a interpolação espacial satisfatória por krigagem ordinária e a geração de mapas dos parâmetros de distribuição, o que possibilitou a classificação da área de estudo em quatro classes com regimes de precipitação distintos.

5. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo avaliar as mudanças espaço-temporais de extremos sazonais de precipitação na região sudeste do Brasil durante o período de 1981 a 2020. Esse objetivo foi alcançado através da análise das estatísticas descritivas da área de estudo, seguido da aplicação da função de distribuição de probabilidade “Generalized Extreme Value” (GEV), que permitiu observar o comportamento desses eventos na série temporal completa e em dois diferentes recortes da série temporal (1981-2010 e 1991-2020), além do cálculo dos níveis de retorno para os períodos de retorno de 5, 10, 15, 20 e 30 anos. Por fim, foram realizados os cálculos de alteração dos níveis de retorno na área de estudo sazonal nos dois recortes distintos em relação à série total.

Os resultados obtidos demonstram que os níveis de precipitação na área de estudo, predominantemente, estão diminuindo em sua intensidade e frequência. Um exemplo desse fato é a diminuição dos níveis de retorno estimados na estação de verão, uma vez que no recorte mais antigo (1981-2010), esses níveis eram superiores em relação ao recorte mais recente. Além disso, essa diminuição verificada no verão também foi observada nas demais estações, porém de forma menos intensa.

Mais estudos devem ser feitos a fim de avaliar o comportamento dos eventos extremos de precipitação na área em questão, como por exemplo, buscar as causas da diferença de comportamento, a identificação dos períodos de mudança, entre outros aspectos.

De qualquer forma, este estudo utilizou um método eficaz para a realização de análise do comportamento de eventos como estes, gerando informações muito valiosas para tomadores de decisão na formulação e implementação das estratégias de mitigação de desastres naturais hidroclimatológicos.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao CNPq pela concessão da bolsa de iniciação científica e ao INPE pela oportunidade de participar do programa PIBIC, além de meu orientador e coorientador pela excelente condução da pesquisa.

Referências Bibliográficas

ABREU, M. C. et al. Critérios para Escolha de Distribuições de Probabilidades em Estudos de Eventos Extremos de Precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 4, p. 601–613, 2018.

AGHAKOUCHAK, A. et al. Climate Extremes and Compound Hazards in a Warming World. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 48, p. 519–548, 2020.

AHMAD, I. et al. Spatiotemporal analysis of precipitation variability in annual, seasonal and extreme values over upper Indus River basin. **Atmospheric Research**, v. 213, n. June, p. 346–360, 2018.

ALVAREZ, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVES, L. M. et al. Assessment of rainfall variability and future change in Brazil across multiple timescales. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. S1, p. E1875–E1888, 2021.

AMORIM, A. C. B. et al. Extreme rainfall events on the coastland of Paraná state (Paranaguá bay). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 4, p. 563–575, 2020.

ARMAL, S.; DEVINENI, N.; KHANBILVARDI, R. Trends in extreme rainfall frequency in the contiguous United States: Attribution to climate change and climate variability modes. **Journal of Climate**, v. 31, n. 1, p. 369–385, 2018.

ASSIS, L. C. et al. A model-based site selection approach associated with regional frequency analysis for modeling extreme rainfall depths in Minas Gerais state, Southeast Brazil. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 32, n. 2, p. 469–484, 2018.

AVILA-DIAZ, A. et al. Extreme climate indices in Brazil: evaluation of downscaled earth system models at high horizontal resolution. **Climate Dynamics**, v. 54, n. 11–12, p. 5065–5088, 2020.

AVILA-DIAZ, A. et al. Climatological aspects and changes in temperature and precipitation extremes in viçosa-Minas Gerais. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, n. 2, p. 1–19, 2020.

- BATISTA, M. L. et al. Spatialization of the Annual Maximum Daily Rainfall in Southeastern Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 4430, p. 97–109, 2019.
- BELL, J. E. et al. Changes in extreme events and the potential impacts on human health. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 68, n. 4, p. 265–287, 2018.
- BHATTACHARYA, Paritosh; BHATTACHARJEE, Rakhi. A study on Weibull distribution for estimating the parameters. **Journal of Applied Quantitative Methods**, v. 5, n. 2, p. 234-241, 2010.
- BRASILIENSE, C. S. 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.
- BRUBACHER, J. P.; OLIVEIRA, G. G. DE; GUASSELLI, L. A. Preenchimento de Falhas e Espacialização de Dados Pluviométricos: Desafios e Perspectivas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 4, p. 615–629, 2020.
- 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**, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, 2002.
- CARVALHO, J. R. et al. Estimation of dry spells in three Brazilian regions - Analysis of extremes. **Atmospheric Research**, v. 132–133, p. 12–21, 2013.
- COGATO, A. et al. Extreme weather events in agriculture: A systematic review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 9, p. 1–18, 2019.
- COLES, Stuart e colab. **An introduction to statistical modeling of extreme values**. [S.l.]: Springer, 2001. v. 208.
- COOLEY, D.; NYCHKA, D.; NAVEAU, P. Bayesian spatial modeling of extreme precipitation return levels. **Journal of the American Statistical Association**, v. 102, n. 479, p. 824–840, 2007.
- CUNHA, A. P. M. A. et al. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, 2019.
- DAI, A.; ZHAO, T.; CHEN, J. Climate Change and Drought: a Precipitation and Evaporation Perspective. **Current Climate Change Reports**, v. 4, n. 3, p. 301–312, 2018.
- 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**, n. July 2021, p. 1–15, 2021.
- DAVISON, A. C.; PADOAN, S. A.; RIBATET, M. Statistical modeling of spatial extremes. **Statistical Science**, v. 27, n. 2, p. 161–186, 2012.

DE JESUS, E. T. et al. Meteorological and hydrological drought from 1987 to 2017 in doce river basin, Southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, p. 1–10, 2020.

DE OLIVEIRA, M. M. F. et al. Extreme climatic characteristics near the coastline of the southeast region of Brazil in the last 40 years. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 146, n. 1–2, p. 657–674, 2021.

DING, D. et al. Modeling extreme events in time series prediction. **Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining**, v. 1, p. 1114–1122, 2019.

EKAWATI, Dian; WARSONO, Warsono; KURNIASARI, Dian. On the Moments, Cumulants, and Characteristic Function of the Log-Logistic Distribution. **IPTEK The Journal for Technology and Science**, v. 25, n. 3, 2015.

FERNANDES, L. G.; RODRIGUES, R. R. Changes in the patterns of extreme rainfall events in Southern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 3, p. 1337–1352, 2018.

FISCHER, M.; RUST, H. W.; ULBRICH, U. A spatial and seasonal climatology of extreme precipitation return levels: A case study. **Spatial Statistics**, v. 34, 2019.

GAO, J. et al. Spatial distribution of extreme precipitation in the Tibetan Plateau and effects of external forcing factors based on Generalized Pareto Distribution. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 21, n. 3, p. 1253–1262, 2021.

GEIRINHAS, J. L. et al. Recent increasing frequency of compound summer drought and heat waves in Southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 3, 2021.

HAN, Xuli. Cubic trigonometric polynomial curves with a shape parameter. **Computer Aided Geometric Design**, v. 21, n. 6, p. 535–548, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sistema de contas regionais: Brasil: 2017**. 2017.

IPCC, 2012: **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

KANE, R. P. 0 O Timings and Rainfall Extremes in India, El Nin. **International Journal of Climatology**, v. 672, p. 653–672, 1999.

KIM, Y. et al. A Modified Hybrid Gamma and Generalized Pareto Distribution for Precipitation Data. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 55, n. 4, p. 609–616, 2019.

- LIMA, A. O. et al. Extreme rainfall events over Rio de Janeiro State, Brazil: Characterization using probability distribution functions and clustering analysis. **Atmospheric Research**, v. 247, n. August 2020, p. 105221, 2021.
- LIMA, C. H. R. et al. A hierarchical Bayesian GEV model for improving local and regional flood quantile estimates. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 816–823, 2016.
- MARENGO, J. A. et al. Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1472, n. 1, p. 5–20, 2020.
- MARENGO, J. A. et al. Extreme Rainfall and Hydro-Geo-Meteorological Disaster Risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C Global Warming Scenarios: An Analysis for Brazil. **Frontiers in Climate**, v. 3, n. March, p. 1–17, 2021.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Crise Hídrica em São Paulo em 2014: Seca e Desmatamento. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, v. 19, n. 3, p. 485, 2015.
- MARTINS, A. L. A. et al. Generalized Pareto distribution applied to the analysis of maximum rainfall events in Uruguaiana, RS, Brazil. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 9, p. 1–13, 2020.
- MAZAS, F. Extreme events: a framework for assessing natural hazards. **Natural Hazards**, v. 98, n. 3, p. 823–848, 2019.
- MIRANDA, Bruno Guerreiro; NEGRI, Rogério Galante; PAMPUCH, Luana Albertani. Using clustering algorithms and GPM data to identify spatial precipitation patterns over southeastern Brazil. **Atmosfera**, 2020.
- MONDAL, A.; MUJUMDAR, P. P. Return levels of hydrologic droughts under climate change. **Advances in Water Resources**, v. 75, p. 67–79, 2015.
- NOBRE, C. A. et al. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 08, n. 02, p. 252–262, 2016.
- NUNES, A. DE A.; PINTO, E. J. DE A.; BAPTISTA, M. B. Detection of trends for extreme events of precipitation in the Metropolitan Region of Belo Horizonte through statistical methods. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, 2018.
- OLIVEIRA, D. H. M. C.; LIMA, K. C. What is the return period of intense rainfall events in the capital cities of the northeast region of Brazil? **Atmospheric Science Letters**, v. 20, n. 10, p. 1–11, 2019.
- OLIVEIRA, D. H. M. C.; LIMA, K. C.; SPYRIDES, M. H. C. Rainfall and streamflow extreme events in the São Francisco hydrographic region. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 2, p. 1279–1291, 2021.

- OSAKA, S.; BELLAMY, R. Natural variability or climate change? Stakeholder and citizen perceptions of extreme event attribution. **Global Environmental Change**, v. 62, n. April, p. 102070, 2020.
- PEDRON, I. T. et al. Trends and variability in extremes of precipitation in Curitiba – Southern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 3, p. 1250–1264, 2017.
- RAYMOND, Colin et al. Understanding and managing connected extreme events. **Nature climate change**, v. 10, n. 7, p. 611–621, 2020.
- REGOTO, P. et al. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 11, p. 5125–5142, 2021.
- RODRIGUES, D. T. et al. Spatial distribution of the level of return of extreme precipitation events in Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 12, p. 5098–5113, 2020.
- RUPA, C.; MUJUMDAR, P. P. Quantification of Uncertainty in Spatial Return Levels of Urban Precipitation Extremes. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 23, n. 1, p. 04017053, 2018.
- SANTOS, C. et al. Isotopic composition of precipitation in a southeastern region of Brazil during the action of the south Atlantic convergence zone. **Atmosphere**, v. 12, n. 4, 2021.
- SANTOS, E. B.; LUCIO, P. S.; SANTOS E SILVA, C. M. Estimating return periods for daily precipitation extreme events over the Brazilian Amazon. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 126, n. 3–4, p. 585–595, 2016.
- SHAO, Y. et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation events at multi-time scales in the Qinling-Daba mountains region, China. **Quaternary International**, v. 525, n. June, p. 89–102, 2019.
- SUIZU, T. M.; NANSON, G. C. Temporal and spatial adjustments of channel migration and planform geometry: responses to ENSO driven climate anomalies on the tropical freely-meandering Aguapeí River, São Paulo, Brazil. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, n. 8, p. 1636–1647, 2018.
- TONG, S. et al. Spatial and temporal variability in extreme temperature and precipitation events in Inner Mongolia (China) during 1960–2017. **Science of the Total Environment**, v. 649, p. 75–89, 2019.
- VÁSQUEZ P, I. L. et al. Historical analysis of interannual rainfall variability and trends in southeastern Brazil based on observational and remotely sensed data. **Climate Dynamics**, v. 50, n. 3–4, p. 801–824, 2018.
- XI, Y. et al. Spatiotemporal Changes in Extreme Temperature and Precipitation Events in the Three-Rivers Headwater Region, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 123, n. 11, p. 5827–5844, 2018.

ZILLI, M. T. et al. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2269–2279, 2017.

ZWIERS, Francis W. e KHARIN, Viatcheslav V. Changes in the Extremes of the Climate Simulated by CCC GCM2 under CO2 Doubling. **Journal of Climate**, v. 11, n. 1993, p. 2200–2222, 1998.