

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

Anna Flávia Almeida Perini

**CARACTERIZAÇÃO DO RISCO A SECAS METEOROLÓGICAS NA PORÇÃO MINEIRA
DA BACIA DO RIO JEQUITINHONHA: UMA ABORDAGEM BASEADA EM IMPACTOS**

Belo Horizonte
2025

Anna Flávia Almeida Perini

**CARACTERIZAÇÃO DO RISCO A SECAS METEOROLÓGICAS NA PORÇÃO MINEIRA
DA BACIA DO RIO JEQUITINHONHA: UMA ABORDAGEM BASEADA EM IMPACTOS**

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

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Hidrologia

Orientador: André Ferreira Rodrigues

Belo Horizonte
2025

P445c

Perini, Anna Flávia Almeida.

Caracterização do risco a secas meteorológicas na porção mineira da bacia do rio Jequitinhonha [recurso eletrônico] : uma abordagem baseada em impactos / Anna Flávia Almeida Perini. - 2025.

1 recurso online (155 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: André Ferreira Rodrigues.

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

Inclui apêndices.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Secas - Minas Gerais - Teses. 4. Secas - Aspectos sociais - Teses. 5. Secas - Aspectos econômicos - Teses. I. Rodrigues, André Ferreira. II..Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ENGENHARIA - COORDENADORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO SANEAMENTO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Caracterização do Risco A Secas Meteorológicas Na Porção Mineira da Bacia do Rio Jequitinhonha: Uma Abordagem Baseada Em Impactos

ANNA FLÁVIA ALMEIDA PERINI

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. ANDRÉ FERREIRA RODRIGUES

Prof. CARLOS ROGÉRIO DE MELLO

MICAEL DE SOUZA FRAGA

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH Versão Final aprovada por

Prof. Eduardo Coutinho de Paula
Coordenador

Prof. André Ferreira Rodrigues
Orientador

Belo Horizonte, 27 de fevereiro de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Andre Ferreira Rodrigues, Professor do Magistério Superior**, em 27/02/2025, às 16:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Micael de Souza Fraga, Usuário Externo**, em 27/02/2025, às 16:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Rogério de Mello, Usuário Externo**, em 28/02/2025, às 08:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Coutinho de Paula, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 25/04/2025, às 07:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3999085** e o código CRC **AEC8EB29**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela oportunidade de viver essa experiência e por me guiar ao longo de todo este processo.

Agradeço profundamente ao meu orientador, André Rodrigues, pelo apoio incondicional, pelos ensinamentos e pela orientação precisa em cada etapa do desenvolvimento desta dissertação. Sua paciência e dedicação foram fundamentais, e não poderia ter escolhido melhor.

À minha família, sou eternamente grata. À Luciana, Márcio e Anna Júlia, muito obrigada pelo amor, compreensão e por estarem sempre ao meu lado, oferecendo suporte emocional durante toda a trajetória acadêmica.

À Giovanna, Lucas, Renata e Tássia, agradeço pela força, incentivo e amizade. Sem a presença de vocês, essa jornada não teria sido possível. Aos colegas acadêmicos, Alan, Vinícius, Perdigão e Thiago, sou grata pela empatia e pelos momentos de colaboração. E, em especial, a Raissa, por ter me concedido dados fundamentais para a realização de parte deste trabalho.

Aos meus líderes profissionais, Adolfo e Tatiani, expresso meu sincero agradecimento pelo apoio constante, orientação e oportunidades.

Agradeço também aos membros da minha banca examinadora, Carlos Mello e Micael Fraga, assim como aos professores Jhones Amorim e Gustavo Meirelles, pelas valiosas sugestões e críticas construtivas, que, sem dúvida, enriqueceram o conteúdo deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

"É preciso que eu suporte duas ou três larvas se quiser conhecer as borboletas."
Antoine de Saint-Exupéry, *O Pequeno Príncipe*.

RESUMO

Eventos de seca têm ganhado considerável destaque devido à sua significativa influência em diversas partes do mundo. Esses eventos são alguns dos desastres naturais mais impactantes, afetando o meio ambiente, a economia, a sociedade e a segurança alimentar. A seca é um fenômeno complexo que se desenvolve gradualmente em várias escalas temporais e sua definição varia conforme a região, o período e as variáveis hidrológicas analisadas. Para melhor compreender esses eventos, as secas são classificadas como seca meteorológica, quando há déficit de precipitações e, possivelmente, aumento na evapotranspiração; seca hidrológica, manifestada por anomalias negativas nas águas superficiais e subterrâneas; seca agrícola, decorrente da falta de umidade no solo necessária para o crescimento das plantações; seca socioeconômica, relacionada às demandas e condições sociais e econômicas da região afetada. Diante desse cenário, é essencial monitorar o comportamento espacial e temporal do fenômeno para respaldar decisões informadas e otimizar a distribuição de recursos no enfrentamento dos riscos vinculados às secas. Além disso, é crucial entender onde e como os impactos afetam a população para uma compreensão mais ampla da situação. Este trabalho visa calcular e avaliar o índice de risco a seca (DRI) meteorológica juntamente com os seus impactos nos municípios da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, uma região caracterizada por um clima semiárido com baixa disponibilidade hídrica que afeta a economia local. O DRI será calculado usando o índice de perigo de seca (DHI) e o índice de vulnerabilidade de seca (DVI). O DHI será obtido através do SPI (Índice de Seca Padronizado), calculado para cada município em múltiplas escalas temporais (SPI-3, -6, -9 e -12), considerando as características como intensidade, magnitude e duração. Neste estudo, além do índice que considera a intensidade dos eventos (DRI-i), propõem-se dois novos índices: um que leva em conta a duração (DRI-d) e outro que considera a magnitude (DRI-m) dos eventos. Para suprir a baixa cobertura de estações de monitoramento, os dados de precipitação do ERA5 e MSWEP foram avaliados estatisticamente, destacando-se o MSWEP com melhores métricas de desempenho (R^2 , REMQ, NSE e Log-NSE). O comportamento espacial do DRI variou conforme a escala temporal do SPI e a característica de seca adotada, indicando diferentes padrões espaciais e as incertezas associadas à caracterização do risco à secas baseada em eventos. A análise de componentes principais mostrou que os impactos sociais, econômicos, agricultura e qualidade da água foram melhor delimitados pelo DRI-i considerando o SPI-3 e -12. Conclui-se que a abordagem baseada em impactos é essencial para averiguar a aplicabilidade de índices, diminuindo as incertezas e aprimorando as ferramentas de tomada de decisão.

Palavras-chave: Monitoramento de secas. Vulnerabilidade socioeconômica. Reanálise. Conjunto de dados.

ABSTRACT

Drought events have gained considerable attention due to their significant influence in various parts of the world. These events are among the most impactful natural disasters, affecting the environment, the economy, society, and food security. Drought is a complex phenomenon that develops gradually over various temporal scales, and its definition varies according to the region, period, and hydrological variables analyzed. To better understand these events, droughts are commonly classified as meteorological droughts, which occur when there is a precipitation deficit and possibly increased evapotranspiration; hydrological droughts, characterized by negative anomalies in surface and groundwater levels; agricultural droughts, resulting from insufficient soil moisture required for crop growth; and socio-economic droughts, associated with the demands and socio-economic conditions of the affected region. Given this scenario, it is essential to monitor the spatial and temporal behavior of the phenomenon to support informed decisions and optimize the distribution of resources in addressing the risks associated with droughts. Furthermore, it is crucial to understand where and how the impacts affect the population for a broader understanding of the situation. This work aims to calculate and evaluate the meteorological drought risk index (DRI) along with its impacts on the municipalities of the Minas Gerais portion of the Jequitinhonha River Basin, a region characterized by a semi-arid climate with low water availability that affects the local economy. The DRI will be calculated using the drought occurrence index (DHI) and the drought vulnerability index (DVI). The DHI will be obtained through the SPI (Standardized Precipitation Index), calculated for each municipality at multiple temporal scales (SPI-3, -6, -9, and -12), considering characteristics such as intensity, magnitude, and duration. In this study, besides the index that considers event intensity (DRI-i), two new indices are proposed: one that takes into account duration (DRI-d) and another that considers magnitude (DRI-m) of the events. To address the low coverage of monitoring stations, ERA5 and MSWEP precipitation data were statistically evaluated, with MSWEP standing out with better performance metrics (R^2 , RMSE, NSE, and Log-NSE). The spatial behavior of the DRI varied according to the temporal scale of the SPI and the drought characteristic adopted, indicating different spatial patterns and the uncertainties associated with risk characterization based on drought events. Principal component analysis showed that social, economic, agriculture, and water quality impacts were better delineated by DRI-i considering SPI-3 and -12. In conclusion, the impact-based approach is essential to ascertain the applicability of indices, reducing uncertainties and improving decision-making tools.

Keywords: Drought monitoring. Socioeconomic vulnerability. Reanalysis. Dataset.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferentes categorias de seca e seu desenvolvimento.	26
Figura 2 – Representação das características da seca usando a teoria de execução para um determinado limiar.....	30
Figura 3 - Transformação de uma distribuição para índices padronizados.	37
Figura 4 – Área referente a bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha.	50
Figura 5 - Municípios inseridos totalmente e parcialmente na porção mineira da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha.	52
Figura 6 – IVS na porção mineira da Bacia Hidrográfica do rio Jequitinhonha.	62
Figura 7 – Gráficos boxplots da precipitação mensal referente aos 31 pontos de estudos.....	65
Figura 8 – Gráficos do tipo boxplot do Coeficiente de Determinação (R^2), Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) e Viés Médio.	66
Figura 9 – Gráficos do tipo boxplot do Nash-Sutcliffe (NSE) e do Log Nash-Sutcliffe (<i>Log-NSE</i>).	68
Figura 10 – Gráficos boxplots das características das secas – SPI-3.....	71
Figura 11 – Gráficos boxplots das características das secas – SPI-6.....	72
Figura 12 – Gráficos boxplots das características das secas – SPI-9.....	73
Figura 13 – Gráficos boxplots das características das secas – SPI-12.....	74
Figura 14 – Gráficos do índice de perigo de seca (DHI) para diferentes escalas temporais.....	81
Figura 15 – Gráfico do risco à seca (DRI) para diferentes escalas temporais.....	82
Figura 16 – Mapa de calor do quantitativo de decretos referente aos impactos das secas em cada municípios.	89
Figura 17 - Quantitativo de decretos por município.....	90
Figura 18 - Gráfico do tipo PCA (Análise de Componentes Principais) – SPI-3.....	99
Figura 19 - Gráfico do tipo PCA (Análise de Componentes Principais) – SPI6.....	100
Figura 20 - Gráfico do tipo PCA (Análise de Componentes Principais) – SPI-9.....	101
Figura 21 - Gráfico do tipo PCA (Análise de Componentes Principais) – SPI-12....	102
Figura 22 – Boxplot das características de secas agrupadas em clusters por escala temporal.	104
Figura 23 - Boxplot dos riscos a secas agrupados em clusters juntamente com os impactos por escala temporal.....	106

Figura 24 – Mapa de clusterização dos municípios para diferentes escalas temporais.
..... 107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das secas conforme o valor do SPI.	37
Quadro 2 – Análises e equações estatísticas utilizadas na validação dos dados.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificações (Dr) e pesos (Dw) para categorias de seca, juntamente com as probabilidades de ocorrência para o SPI-3.....	58
Tabela 2 – Categorização do DRI	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFDM - African Flood and Drought Monitor (Monitor Africano de Cheias e Secas)
LAFDM - Latin America Flood and Drought Monitor (Monitor de Cheias e Secas na América Latina)
AHP - Analytic Hierarchy Process (Processo Analítico Hierárquico)
ANA - Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico
CDI - Australian Combined Drought Indicator (Indicador Combinado de Seca da Austrália)
DHI - Drought Hazard Index (Índice de Perigo de Seca)
DRel - Drought Resilience Index (Índice de Resiliência a Seca)
DRI - Drought Risk Index (Índice de Risco à Seca)
DRI-d - Risco à seca associado à duração, magnitude e intensidade
DRI-i - Risco à seca associado à duração, magnitude e intensidade
DRI-m - Risco à seca associado à duração, magnitude e intensidade
DVI – Drought Vulnerability Index (Índice de Vulnerabilidade a Seca)
EDO - European Drought Monitor (Monitor Europeu de Secas)
ERA5 - 5th Generation of European ReAnalysis
FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura)
GDM - Germany Drought Monitor (Monitor de Secas da Alemanha)
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INSA - Instituto Nacional do Semiárido
IPEA - Pesquisa Econômica Aplicada
IVDNS - Índice de Vulnerabilidade aos Desastres Naturais relacionados às Secas
IVS - Índice de Vulnerabilidade Social
LST - Land Surface Temperature (Temperatura da Superfície Terrestre)
MSM - Monitor de Sequía en México (Monitor de Secas no México)
MSWEP - Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation
NDMC - National Drought Mitigation Center (Centro Nacional de Mitigação de Secas)
NDVI - Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica)

PAA - Programa de Aquisição de Alimentos

PCA - Principal Component Analysis (Análises de Componentes Principais)

PDSI - Palmer Drought Severity Index (Índice de Severidade de Seca de Palmer)

PNADs - Pesquisas Nacionais por Amostra de Domicílios

PNAE - Programa Nacional de Alimentação Escolar

RSPI - Regional Standardized Precipitation Index (Índice Padrão de Precipitação Regional)

SM - Umidade do solo (Soil Moisture)

SPEI - Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (Índice de Evapotranspiração de Precipitação Padronizada)

SPI - Standardized Precipitation Index (Índice de Precipitação Padronizada)

UDHs - Unidades de Desenvolvimento Humano

UNCCD - United Nations Convention to Combat Drought and Desertification (Convenção das Nações Unidas para o Combate à Seca e Desertificação)

UPGRH - Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos

USDA - United States Department of Agriculture (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos)

USDA - United States Department of Agriculture (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos)

USDM - United States Drought Monitor (Monitor de Secas dos Estados Unidos)

WMO - World Meteorological Organization (Organização Meteorológica Mundial)

WWF - World Wide Fund for Nature (Fundo Mundial para a Natureza)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	21
2.1	Objetivo Geral	21
2.2	Objetivos Específicos.....	21
3	REVISÃO DA LITERATURA	22
3.1	Definição de Seca.....	22
3.1.1	Tipos de secas	24
3.2	Caracterização das Secas	29
3.3	Índice de Seca	32
3.3.1	Índice de Precipitação Padronizado – SPI	34
3.3.2	Índice Padrão de Precipitação Regional (RSPI)	38
3.3.3	Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI).....	38
3.3.4	Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI).....	39
3.4	Vulnerabilidade à Seca	40
3.5	Risco à seca	42
3.6	Base de Dados	45
4	METODOLOGIA / MATERIAL E MÉTODOS	49
4.1	Área de Estudo	49
4.1.1	Caracterização geodemográfica da bacia do rio Jequitinhonha	51
4.2	Seleção dos Dados de Monitoramento Pluviométricos	54
4.2.1	Validação dos conjuntos de dados de Reanálise	54
4.3	Cálculo do SPI	56
4.4	Índice de Perigo de Seca (DHI)	57
4.5	Índice de Vulnerabilidade a Seca (DVI)	60
4.6	Índice de Risco à seca (DRI)	62
4.7	Impactos Relacionados às Secas	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1	Validação dos Produtos ERA5 e MSWEP	64
5.2	Características das Secas - SPI calculado	69
5.2.1	Análise em relação a duração	69
5.2.2	Análise em relação à magnitude	75
5.2.3	Análise em relação à intensidade.....	78
5.3	Índice de Perigo de Seca (DHI) e Índice de Risco à Seca (DRI)	79
5.3.1	Análise do risco à seca quanto a duração (DRI-d)	81
5.3.2	Análise do risco à seca quanto a Magnitude (DRI-m)	83

5.3.3	Análise do risco à seca quanto a Intensidade (DRI-i).....	85
5.4	Impactos da Seca.....	88
5.5	Análises Multivariada.....	99
5.5.1	Análise do agrupamento de secas e impactos.....	104
6	CONCLUSÕES.....	111
7	RECOMENDAÇÕES.....	113
8	REFERENCIAS.....	114
	APÊNDICE A – Municípios inseridos totalmente e parcialmente na porção mineira da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha.....	140
	APÊNDICE B – Relação dos dados pluviométricos.....	142
	APÊNDICE C – Classificações (Dr) e pesos (Dw) para categorias de seca, juntamente com as probabilidades de ocorrência para o SPI-6.....	144
	APÊNDICE D – Classificações (Dr) e pesos (Dw) para categorias de seca, juntamente com as probabilidades de ocorrência para o SPI-9.....	145
	APÊNDICE E – Classificações (Dr) e pesos (Dw) para categorias de seca, juntamente com as probabilidades de ocorrência para o SPI-12.....	146
	APÊNDICE F – SPI-3 - Período de 1999 a 2023.....	147
	APÊNDICE G – SPI-6 - Período de 1999 a 2023.....	149
	APÊNDICE H – SPI-9 - Período de 1999 a 2023.....	151
	APÊNDICE I – SPI-12 – Período de 1999 a 2023.....	153

1 INTRODUÇÃO

A seca é um evento hidrometeorológico caracterizado por uma deficiência prolongada de água em relação ao montante esperado, que pode variar em sua intensidade, duração e extensão espacial, afetando negativamente os recursos hídricos, ecossistemas, agricultura e sociedade (VAN LOON *et al.*, 2016; VAN LOON, 2019). No entanto, a definição dos eventos de seca ainda não é universal, pois depende da região, período e variáveis hidrológicas analisadas (VAN LOON *et al.*, 2016). Esse fenômeno pode ser presenciado em todas as zonas climáticas do planeta, abarcando tanto regiões áridas quanto úmidas. Contudo, a severidade e frequência de suas manifestações podem exibir variabilidades significativas (KHOSHNAZAR *et al.*, 2023).

Ao contrário de outros desastres naturais, como inundações ou furacões, a seca se desenvolve lentamente e pode durar meses ou até anos (WILHITE e PULWARTY, 2017). Essa característica dificulta a caracterização e monitoramento dos eventos de seca, pois seus efeitos são cumulativos e não têm um início ou fim bem definidos (WILHITE *et al.*, 2014). Além disso, as atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis, desmatamento e produção industrial, têm levado ao aumento das temperaturas globais e alterações nos padrões de precipitação (IPCC, 2018). Esses fatores estão contribuindo para a intensificação das secas, que se tornam mais severas e frequentes. Isso é particularmente preocupante para os países em desenvolvimento, que frequentemente carecem da infraestrutura e dos recursos financeiros necessários para mitigar esses impactos e adaptar-se às mudanças (DIAS e MATOS, 2023; NOAA, 2023).

Devido à complexidade e às variações espaciais e temporais da seca, foram desenvolvidos vários índices para monitorar e caracterizar esse fenômeno. Um dos mais utilizados é o índice de precipitação padronizado (SPI, do inglês Standardized Precipitation Index), que foi introduzido para quantificar a seca de forma objetiva (MCKEE *et al.*, 1993). O SPI é um índice desenvolvido para a caracterização de secas meteorológicas e que pode ser utilizado para comparar a ocorrência, intensidade, magnitude e duração de secas entre regiões com regimes pluviométricos distintos, uma vez que é padronizado (FERNANDES *et al.*, 2009). Além disso, escalas sazonais ou anuais do SPI podem ser utilizados como proxy para o estudo de secas agrícolas e hidrológicas (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2010).

Em âmbito internacional, destaca-se o Monitor de Secas dos Estados Unidos (USDM, em inglês United States Drought Monitor), que atua desde o ano de 1999 sendo produzido pela National Drought Mitigation Center (NDMC). De forma geral, o monitor de secas é um mapa divulgado semanalmente que mostra as áreas afetadas por seca nos EUA (DROUGHT MONITOR, 2024). Outros indicadores, baseia-se no conceito do Monitor de Secas dos EUA, como o Indicador Combinado de Secas Australiano (CDI, do inglês Australian Combined Drought Indicator) que utiliza uma combinação de precipitação, umidade do solo, evapotranspiração e índice de vegetação por diferença normalizada para produzir um monitor de seca adaptado para a Austrália. Além desses, Zink *et al.* (2016) destacou outros sistemas de monitoramento distribuídos pelo mundo que estão disponíveis atualmente ao público, como: European Drought Monitor (EDO), African Flood and Drought Monitor (AFDM), Latin America Flood and Drought Monitor (LAFDM); Germany Drought Monitor (GDM) e o Monitor de Sequía em México (MSM).

Em âmbito nacional, a Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA) é a responsável pelo Monitor de Secas do Brasil, com o objetivo de unificar o conhecimento técnico e científico de diversas instituições estaduais e federais. O monitor visa fornecer uma compreensão integrada das condições de seca, considerando sua severidade, evolução espacial e temporal, além de seus impactos em diferentes setores (ANA, 2024). Podendo ser acessado pelo site (<https://monitordesecas.ana.gov.br>) ou também pelo aplicativo disponível gratuitamente para dispositivos móveis. Minas Gerais foi o primeiro estado a se integrar à expansão do Monitor de Secas depois do Nordeste, começando a validar os mapas em novembro de 2018. Atualmente, o Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM) é o órgão do Governo de Minas responsável pela produção dos documentos e mapas no estado (IGAM, 2024).

No Brasil, por exemplo, a região semiárida é uma das áreas mais afetadas pela seca, caracterizada por baixos índices pluviométricos, um extenso período anual de estiagem e elevadas taxas de evapotranspiração (MACIEL, 2021). Compreendendo aproximadamente 12% do território nacional e abrigando cerca de 22 milhões de habitantes, essa região enfrenta desafios significativos relacionados à disponibilidade de água, produção agrícola e segurança alimentar. Segundo estudos do Instituto

Nacional do Semiárido (INSA), o semiárido brasileiro abrange a maior parte do Nordeste e porções do Sudeste, sendo uma área de extrema importância socioeconômica devido à sua população e às atividades agrícolas predominantes (INSA, 2020). A vulnerabilidade das comunidades locais é exacerbada pelas limitações econômicas e pelas condições ambientais adversas, tornando a gestão da seca um elemento crucial para a sustentabilidade e o desenvolvimento regional (ALVALÁ *et al.*, 2019).

Grande parte do território da bacia do rio Jequitinhonha se encontra na região semiárida brasileira. A escassez hídrica desta bacia, em Minas Gerais, é um obstáculo significativo ao desenvolvimento socioeconômico da região, visto que, a economia da região é fortemente baseada na agricultura familiar e na agropecuária, setores altamente vulneráveis à escassez hídrica. As chuvas, geralmente concentradas no período de novembro a março, fazem com que o restante do ano seja caracterizado por menor disponibilidade hídrica, o que pode resultar em períodos de estiagem. Esses períodos impactam a pecuária e a agricultura, além de, em alguns casos, provocarem interrupções no abastecimento de água, essencial para garantir a efetivação dos direitos fundamentais da população (RESENDE *et al.*, 2020).

Algumas lacunas na gestão da seca decorrem da escassez de dados *in situ* e da falta de ferramentas eficazes de previsão e monitoramento existentes em diversas regiões do mundo, incluindo o Brasil. Nesse contexto, dados de precipitação provenientes de sensores remotos e reanálises devem ser avaliados para suprir a carência de monitoramento. Os conjuntos de dados ERA5 (produto de reanálise atmosférica) e MSWEP (dados globais de precipitação de alta resolução espacial e temporal) apresentam série histórica com mais de 50 anos e têm sido amplamente utilizados em estudos de seca ao redor do mundo (JUNIOR *et al.*, 2022; LI *et al.*, 2023), indicando o potencial de aplicação dos mesmos em regiões que carecem de monitoramento e representatividade espacial (VEGA-VIVIESCAS, 2019).

No entanto, vale ressaltar que, compreender a seca apenas no contexto do fenômeno climático é insuficiente para uma gestão adequada, uma vez que os impactos não são, geralmente, contemplados nessas análises. Para que os planejadores e a população implementem medidas eficazes de mitigação e preparação com intuito de reduzir os

impactos da seca, eles precisam entender sua evolução, complexidade, implicações sociais e vulnerabilidade da sociedade ao evento (UNISDR, 2009). Portanto, o estudo sobre a seca deve ir além da análise climática e incluir uma abordagem integrada que considere os impactos socioeconômicos e ambientais. Somente assim será possível desenvolver estratégias eficazes para enfrentar este desafio.

Deste modo, este trabalho tem por objetivo avaliar o índice de risco à seca (DRI, do inglês Drought Risk Index) nos municípios da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, determinado pela junção do índice de perigo de seca (DHI, do inglês Drought Hazard Index) com o índice de vulnerabilidade à seca (DVI, do inglês Drought Vulnerability Index). No qual, o DHI será obtido através do SPI utilizando dados de precipitação de produto de sensoriamento remoto, sendo calculado para cada município em múltiplas escalas temporais (SPI-3, -6, -9 e -12) considerando três características de seca (duração, magnitude e intensidade), e não apenas para a intensidade, como é corriqueiro encontrar em diversos estudos, como apresentado por Khoshnazar *et al.* (2023). Todavia, outras características da seca também merecem atenção para avaliação do risco às secas (i.e., duração e magnitude). Nesse sentido, duas alternativas ao DHI são propostas e validadas a partir de impactos relacionados a secas levantados a partir de decretos publicados oficialmente pelos municípios.

Além deste capítulo introdutório, esta dissertação é composta por 7 capítulos, os quais seguem a seguinte estruturação: o Capítulo 2 apresenta os objetivos gerais e específicos da pesquisa; o Capítulo 3 fornece uma revisão da literatura; o Capítulo 4 caracteriza a área de estudo, além de descrever a metodologia aplicada para a estimação do índice de risco à seca na região da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha na porção mineira, juntamente com a descrição dos impactos relacionados a secas levantados a partir de decretos publicados oficialmente pelos municípios; o Capítulo 5 apresenta os resultados dos estudos, o que inclui a comparação com outras pesquisas semelhantes; o Capítulo 6 abrange as conclusões derivadas da análise dos resultados; e o Capítulo 7 apresenta as recomendações, oportunidades de melhoria e de estudos futuros acerca da pesquisa apresentada.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Caracterizar o risco a secas meteorológicas na porção mineira da bacia do rio Jequitinhonha por meio de índices e impactos observados, visando aprimorar a tomada de decisão.

2.2 Objetivos Específicos

A seguir, estão apresentados os objetivos específicos a serem explorados no presente trabalho.

- Compreender o comportamento espaço-temporal da seca meteorológica na porção mineira da bacia do rio Jequitinhonha;
- Propor índices de risco para diferentes características das secas e avaliar sua aplicabilidade a partir dos impactos observados;
- Compreender as vulnerabilidades, exposições e resiliência à secas na porção mineira da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha; e
- Apresentar os municípios mais propícios à ocorrência de secas e os impactos decorrentes desses eventos.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão bibliográfica foi conduzida com o propósito de ressaltar o estado da arte dos estudos e métodos empregados no desenvolvimento do índice de risco à seca (DRI) para a porção mineira da bacia do rio Jequitinhonha, importante por sua vulnerabilidade socioeconômica e natural baixa disponibilidade hídrica. A estrutura desta seção segue a seguinte organização de tópicos:

- Definição de seca, apresentando os principais conceitos empregados na literatura associados aos eventos de seca; e os tipos de seca, incluindo a caracterização dos quatro tipos que a literatura abrange (meteorológica, hidrológica, agrícola e socioeconômica);
- Caracterização das secas, será apresentado o conceito das principais características das secas;
- Índice de seca, no qual será abordado o conceito dos índices e os principais métodos empregados na literatura;
- Definição de vulnerabilidade a secas e como esse índice influencia no cálculo de risco às secas;
- Definição do risco às secas; e
- Dados de reanálise, descrição e utilização.

3.1 Definição de Seca

A seca pode ser definida como um fenômeno climático caracterizado pela persistente e anormal falta de precipitação em relação à média histórica em uma determinada região, resultando em escassez de água e impactos adversos nos sistemas naturais e sociais (QUIRING, 2009). Ademais, a seca é um fenômeno temporário e corrente (SMAKHTIN e SCHIPPER, 2008) que pode se manifestar de diversas formas, incluindo a redução do abastecimento de água, diminuição da produção agrícola, degradação dos ecossistemas, aumento do risco de incêndios florestais, redução da geração hidrelétrica e ameaças à segurança alimentar e econômica das comunidades afetadas (WILHITE e GLANTZ, 1985; QUIRING, 2009).

De modo geral, a tarefa de desenvolver uma definição precisa para o fenômeno da seca é desafiadora, dada a complexidade derivada das disparidades nas variáveis

hidrometeorológicas, como a variabilidade espacial e temporal da precipitação, além de fatores socioeconômicos e da natureza estocástica da demanda de água em várias regiões do mundo. Essa característica pode levar a confusões, associando indevidamente a seca com outros conceitos como aridez, escassez e desertificação, o que resulta na atribuição equivocada de problemas a secas em diversas partes do mundo (SILVA, 2020a).

Regiões áridas e semiáridas possuem índices pluviométricos menores em comparação com outras áreas. Essa ocorrência aumenta a sensibilidade dessas regiões aos déficits de chuva, resultando em impactos rápidos e diversos na vida da população (ROSADO e MORAIS, 2010). Devido a essa característica, ocorre a confusão frequente entre aridez e seca (SANTOS, 2011). O conceito de aridez é aplicado para descrever o tipo de clima predominante em uma região caracterizada pela escassez crônica de água. Um clima é categorizado como árido quando as quantidades de precipitação na área são inferiores às perdas de água da superfície, expressas pela evapotranspiração potencial. Esta condição é geralmente de longo prazo, contrastando com a natureza temporária da seca (VAN LOON, 2015; ROYER, 2019). A escassez se distingue das secas ao ser caracterizada pelo uso excessivo desse recurso em relação às disponibilidades naturais existentes. Em uma perspectiva europeia, conforme definido pela DG Env EC (2007), a escassez de água é compreendida como a inadequação dos recursos hídricos para atender às demandas de longo prazo. Esse contexto engloba desequilíbrios de longo prazo nos quais os níveis de disponibilidade são insuficientes e as demandas excedem a capacidade de abastecimento dos sistemas naturais. Em suma, a escassez de água transcende a diminuição da disponibilidade, uma vez que considera também a demanda para o atendimento dos múltiplos usos.

Van Loon (2015) ressalta que diferenciar escassez de água de seca pode ser tarefa desafiadora, dada a estreita inter-relação entre esses fenômenos, que muitas vezes ocorrem concomitantemente. A autora ainda abrange o conceito de escassez, definido como uma insuficiência no fornecimento de água ou uma situação na qual a intervenção humana no sistema hídrico desempenha um papel significativo na redução da disponibilidade de água abaixo do padrão considerado “normal”. Essa escassez pode ser atribuída, em parte ou inteiramente, às atividades humanas e

reflete condições caracterizadas por desequilíbrios prolongados entre os recursos hídricos disponíveis e as demandas.

Sampaio *et al.* (2003), ressaltam a disparidade nos efeitos de temporalidade, espacialidade e causas entre as secas e a desertificação. Os autores definem a seca como um fenômeno natural reversível, manifestando-se esporadicamente ou repetidamente em uma periodicidade complexa e ainda não plenamente esclarecida. Áreas suscetíveis à desertificação, por sua vez, apresentam maior vulnerabilidade aos impactos das secas, estabelecendo, assim, uma estreita inter-relação entre esses dois fenômenos.

Para lidar com a complexidade na definição de seca, é imperativo fazer uma clara distinção entre definições conceituais e operacionais, conforme destacado por Wilhite e Glantz (1985). As definições conceituais, expressas em termos relativos, como a concepção de uma seca como um período longo com variações negativas da variável hidrológica de interesse, contrastam com as definições operacionais, que buscam identificar o início, a intensidade e o término dos períodos de seca. Essa diferenciação entre abordagens conceituais e operacionais é crucial para alcançar uma compreensão abrangente e eficaz da seca, proporcionando uma base sólida para investigações mais aprofundadas sobre o tema (MISHRA e SINGH, 2010).

Deste modo, ainda é difícil entender completamente o que são as secas e conseqüentemente suas características. Estudar quando as secas iniciam e terminam é uma das principais questões que continua em aberto (SILVA, 2020a). No entanto, destaca-se que é fundamental compreender as características dos eventos de seca como uma tarefa essencial para a formulação de estratégias eficazes de gestão da seca (RAPOSO *et al.*, 2023).

3.1.1 Tipos de secas

As secas são eventos climáticos complexos por apresentarem variabilidade temporal e espacial, além de manifestarem nos diferentes compartimentos do ciclo hidrológico (e.g., atmosfera, rios e lagos, aquíferos e solo). De acordo com a American Meteorological Society (2013), as secas podem ser classificadas em quatro tipos, conforme o processo hidrológico em que ocorrem: (i) secas meteorológicas, (ii)

agrícolas, (iii) hidrológicas e (iv) socioeconômicas, sendo a seca meteorológica a mais comum (ZHOU *et al.*, 2024).

Os demais tipos de seca estão intimamente relacionados à seca meteorológica, pois frequentemente resultam de padrões anormais de precipitação, que apresentam um certo atraso em relação à ela (ZHOU *et al.*, 2024). Conforme apresentado por Raposo *et al.* (2023), a seca meteorológica pode desencadear a ocorrência de outros tipos de seca, por meio do processo denominado "propagação da seca".

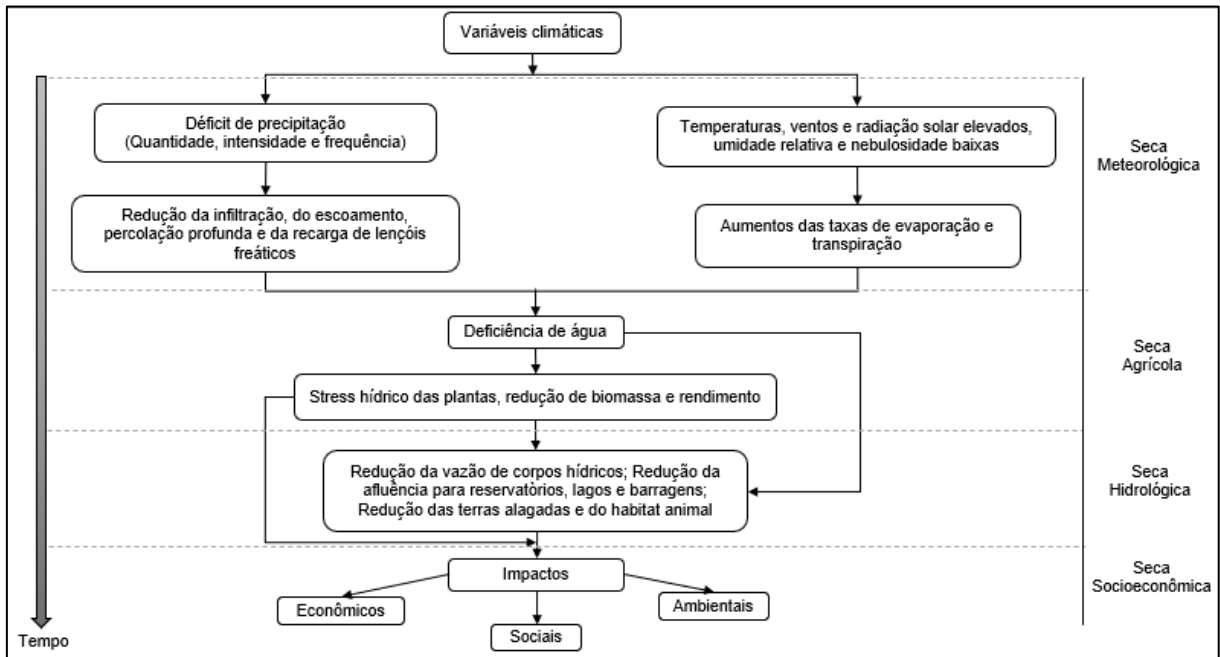
A propagação da seca é um processo de grande complexidade. Este fenômeno é influenciado por uma variedade de fatores de controle, que incluem condições meteorológicas, características específicas da bacia hidrográfica e intervenções antrópicas. A interação entre padrões de circulação atmosférica e o acoplamento local entre terra e atmosfera é o principal contexto meteorológico para a evolução da seca (HAN *et al.*, 2016; ZHOU *et al.*, 2024).

Conforme ilustrado na Figura 1, a precipitação insuficiente, resultante da variabilidade climática natural, pode levar à redução do escoamento e à depleção da umidade do solo, potencialmente causando secas hidrológicas e agrícolas, respectivamente. Quando o fornecimento de recursos hídricos não atende às demandas das atividades econômicas humanas, isso impacta negativamente os setores socioeconômicos, desencadeando a seca socioeconômica (ZHOU *et al.*, 2024).

É relevante observar que as configurações desses processos podem diferir conforme as características específicas de cada região. Por exemplo, no semiárido brasileiro, onde predominam solos rasos com capacidade limitada de retenção de água, uma diminuição nas precipitações provoca uma redução simultânea na umidade do solo e nos níveis dos reservatórios, desencadeando secas agrícolas e hidrológicas de maneira concomitante (CANAMARY, 2015).

A compreensão dos tipos de secas é importante para a formulação de modelos que orientem a atuação proativa em cenários globais diversos relacionados à seca (MISHRA e SINGH, 2010). Identificar os principais fatores que aceleram ou mitigam a seca é crucial para entender os mecanismos de propagação da seca e melhorar a previsão da seca (ZHOU *et al.*, 2024).

Figura 1 - Diferentes categorias de seca e seu desenvolvimento.



Fonte: adaptado de Zargar *et al.* (2011).

3.1.1.1 Secas Meteorológicas

Secas meteorológicas estão associadas à diminuição dos índices pluviométricos, ao aumento da demanda evapotranspirativa ou a uma atuação conjunta de ambos processos (PONTES FILHO *et al.*, 2019; PESSINI, 2017). Dessa forma, as secas meteorológicas estão relacionadas a processos atmosféricos (e.g., movimentos de massas de ar e bloqueios atmosféricos) (WEAVER *et al.*, 2024).

Esse tipo de seca, normalmente, é o primeiro a se manifestar, principalmente em regiões tropicais e subtropicais, uma vez que a precipitação é a principal entrada de água no sistema hidrológico (DAI, 2011).

Uma análise detalhada das secas durante os verões de 2022 e 2023 no Meio-Oeste dos EUA destacou o papel crucial dos bloqueios atmosféricos. Esses bloqueios contribuíram para a formação de sistemas de alta pressão persistentes, reduzindo a precipitação e aumentando as temperaturas, o que resultou em condições de seca na região (WEAVER *et al.*, 2024).

Eventos semelhantes também foram observados no Brasil. A seca de 2021-2022 no Centro-Sul, por exemplo, foi impulsionada por padrões atmosféricos anômalos que reduziram a umidade disponível e agravaram a crise hídrica (SILVA *et al.*, 2023). Já

no semiárido nordestino, a seca prolongada entre 2012 e 2017 destacou a influência dos bloqueios atmosféricos e da variabilidade climática, com impactos severos na agricultura e nos recursos hídricos (MARENGO *et al.*, 2018).

Pimenta (2020), investigou as consequências das mudanças climáticas no semiárido brasileiro, utilizando modelos de monitoramento climático para prever secas extremas e suas implicações na agricultura e nas condições socioeconômicas da região.

Além disso, um estudo realizado por Wang *et al.* (2023), analisou as trajetórias de migração das secas em várias regiões do Hemisfério Norte e identificou que esses movimentos são fortemente influenciados por fatores como a pressão atmosférica, ventos predominantes e interações entre massas de ar quente e fria. Assim, as pesquisas mostram que as secas meteorológicas não são eventos isolados, mas sim o resultado de complexas interações atmosféricas.

3.1.1.2 Secas Agrícolas

A seca agrícola refere-se a um período prolongado de condições meteorológicas que afetam negativamente a produção agrícola. Esse tipo de seca ocorre principalmente quando há um desequilíbrio entre a umidade disponível do solo e as necessidades hídricas das culturas, levando a impactos significativos nas produções e crescimento das plantações (DAI, 2011; VAN LOON, 2012).

A seca agrícola não depende apenas dos défices de precipitação. Também inclui fatores como o aumento das taxas de evapotranspiração, muitas vezes impulsionado por temperaturas e velocidades do vento elevadas, o que pode agravar a perda de umidade do solo e das plantas. Este tipo de seca normalmente ocorre gradualmente, com um intervalo de tempo após a seca meteorológica (CHEN e SUN, 2015). Esse atraso é devido ao fato de que as plantas podem inicialmente recorrer às reservas de umidade do solo, mas como estas esgotam-se, os efeitos sobre a vegetação tornam-se mais pronunciados (GHOLINIA e ABBASZADEH, 2024).

Durante uma seca agrícola, a quantidade insuficiente de chuva pode resultar em solos mais secos, o que pode comprometer o crescimento e desenvolvimento das plantas. A falta de água disponível para irrigação agrícola também é uma característica comum desse tipo de seca. Como resultado, os agricultores podem enfrentar dificuldades na

produção de culturas, o que pode levar à redução das colheitas, perda de produtividade e impactos econômicos significativos (MISHRA e SINGH, 2010).

A seca agrícola é uma preocupação importante para as comunidades rurais e para a segurança alimentar, uma vez que pode ter consequências diretas sobre a produção de alimentos e a subsistência das populações dependentes da agricultura. No Brasil, eventos recentes ilustram esses impactos. A seca de 2021-2022 no Centro-Sul, por exemplo, reduziu drasticamente a produtividade de grãos como soja e milho, afetando exportações e pressionando os preços dos alimentos (CONAB, 2022). Da mesma forma, a seca prolongada no semiárido nordestino entre 2012 e 2017 comprometeu safras e dificultou o acesso à água para pequenos produtores (MARENGO et al., 2018).

Diante desse cenário, estratégias de gestão da água, práticas agrícolas sustentáveis e monitoramento meteorológico são essenciais para mitigar os impactos da seca agrícola e fortalecer a resiliência do setor agropecuário.

3.1.1.3 Secas Hidrológicas

A seca hidrológica é um fenômeno climático caracterizado pela diminuição da disponibilidade de água em reservatórios naturais e artificiais, além dos sistemas hídricos ao longo de um período de tempo. Esse tipo de seca é frequentemente uma consequência de uma seca meteorológica persistente, onde a falta de precipitação contínua resulta em um déficit de escoamento e na redução dos níveis de água em rios, lagos e aquíferos (VAN LOON, 2015).

A incidência desse tipo específico de seca está intrinsecamente relacionada às características da bacia hidrográfica do curso d'água em consideração, sendo os aspectos geológicos apontados como um dos fatores preponderantes que impactam a ocorrência das secas hidrológicas (MISHRA e SINGH, 2010). A seca hidrológica também está relacionada a diminuições nas taxas de fluxo dos rios e nas reservas de água subterrânea, podendo desenvolver-se em intervalos de tempo sazonais ou ao longo de vários anos (RAPOSO et al., 2023).

3.1.1.4 Secas Socioeconômicas

A seca socioeconômica é caracterizada pela deficiência de água nos sistemas naturais, incapazes de satisfazer a demanda, estabelecendo, assim, uma correlação direta entre a ocorrência das secas e a disponibilidade econômica do recurso hídrico (AMS, 2004).

A seca socioeconômica é observada quando há um impacto direto na vida e nas atividades humanas, abrangendo setores como a produção agrícola, os serviços e as atividades econômicas em geral. Este conceito engloba tanto a demanda quanto a oferta de água, refletindo um déficit de disponibilidade que está intimamente relacionado com as condições climáticas. Portanto, é crucial assegurar uma gestão apropriada dos recursos hídricos, visando prevenir e minimizar os impactos associados a esse fenômeno (ROYER, 2019).

Para a avaliação da seca socioeconômica, Keyantash e Dracup (2002) destacam a utilização do índice monetário, entre outras abordagens possíveis. Além disso, os autores ressaltam a importância de seis critérios fundamentais no estabelecimento de índices necessários para avaliar as secas. Esses critérios incluem robustez, tratabilidade, transparência, sofisticação, extensibilidade e dimensionabilidade.

3.2 Caracterização das Secas

A compreensão das características dos eventos de seca é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gerenciamento e mitigação desse fenômeno (RAPOSO *et al.*, 2023). Para tanto, é crucial não apenas detectar, monitorar e avaliar os impactos da seca, mas também analisar de forma integrada seus atributos essenciais, como frequência, duração, severidade e intensidade, bem como a extensão espacial (VANN LOON, 2015). A análise individual de cada um desses atributos, ao longo do tempo, é fundamental para a gestão eficiente dos recursos hídricos; sua compreensão conjunta, por sua vez, fornece um instrumento valioso para o gerenciamento de riscos associados a esse fenômeno (NETO, 2020).

Yevjevich (1967) propôs a *run theory* para identificar os parâmetros da seca e investigar suas propriedades estatísticas: duração, magnitude e intensidade. Para isso, primeiro é necessário determinar o limiar (a partir do qual se inicia ou termina um

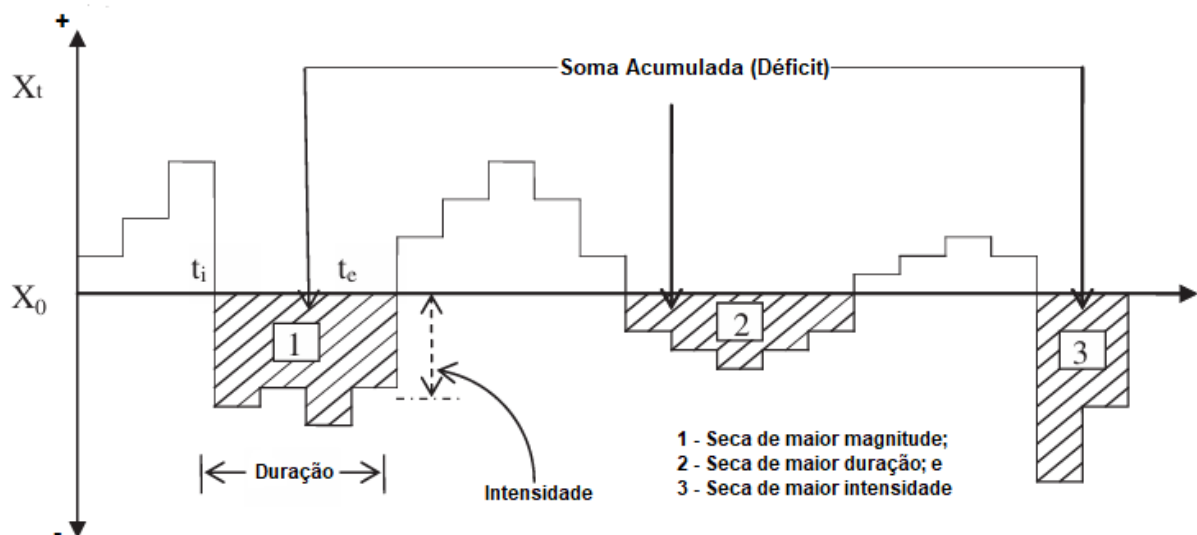
evento de seca), que pode ser constante ou função do tempo. Um 'run' é definido como uma porção de uma série temporal da variável de seca X_t , em que todos os valores estão abaixo ou acima do nível do limiar (X_0); conseqüentemente, é chamado de 'run' negativo ou 'run' positivo.

A Figura 2 representa um gráfico de uma variável de seca denotada por X_t , que é intersectada em muitos lugares pelo limiar X_0 .

Um evento de seca tem os seguintes componentes principais (DRACUP *et al.*, 1980):

- Tempo de início da seca (t_i): é o início do período de escassez de água, que indica o começo de uma seca;
- Tempo de término da seca (t_e): é o momento em que a escassez de água se torna suficientemente pequena para que as condições de seca não persistam mais; e
- Características da Seca: Duração, magnitude e intensidade.

Figura 2 – Representação das características da seca usando a teoria de execução para um determinado limiar.



Fonte: Adaptado de MISHRA e SINGH (2010).

A duração de um evento de seca, refere-se ao período contínuo em que os indicadores de seca se mantêm abaixo de um limiar estabelecido. Em outras palavras, é o período de tempo entre o início e o término de uma seca (RAPOSO *et al.*, 2023; MISHRA e SINGH, 2010). A análise da duração das secas evidencia que eventos de longa

duração têm um impacto significativo sobre a produção agrícola e os níveis hídricos de rios e reservatórios em diversas regiões (UFPB, 2024). Portanto, o estudo dos padrões espaciais e temporais da duração das secas e seus eventos é fundamental para identificar os setores da sociedade mais vulneráveis aos seus impactos (NETO, 2020).

A magnitude, também descrita como severidade por alguns autores, indica a deficiência cumulativa de um parâmetro de seca abaixo do limiar (X_0) (MISHRA e SINGH, 2010). Sendo relacionada aos impactos causados pela deficiência hídrica em elementos do balanço hídrico, como a precipitação, a umidade do solo, o armazenamento de água subterrânea e a vazão (RAPOSO *et al.*, 2023). Em relação a análise da severidade das secas e sua variabilidade espaço-temporal, representa uma etapa importante na mensuração dos danos impingidos à população (DASHTPAGERDI *et al.*, 2018), permitindo a avaliação da extensão de um evento de seca em relação ao histórico de eventos, possibilitando a hierarquização e classificação dos eventos de seca mais severos, com base em critérios como perdas econômicas na agricultura ou o número de indivíduos atingidos (NETO, 2020).

A intensidade da seca é o valor médio de um parâmetro de seca abaixo de X_0 , ou seja, é a razão entre magnitude e a duração de um evento de seca. Deste modo, Neto (2020) descreve que os ventos de seca com longa duração e baixa magnitude tendem a gerar impactos distintos daqueles com curta duração e alta magnitude. Portanto, a compreensão da intensidade de uma seca é essencial para determinar a urgência das medidas mitigadoras. Geralmente, as secas mais intensas, caracterizadas por alta magnitude e curta duração, tendem a impactar de forma mais rápida e prejudicial os diversos setores da sociedade, em comparação com secas menos intensas.

A frequência é definida como o número de eventos, não consecutivos, ocorridos em uma dada região (CHIANG *et al.*, 2021). Essa característica é de grande importância na caracterização das secas, principalmente por sua relação com o período de recorrência desses eventos. Em regiões com alta frequência de secas, o período de recorrência é menor, indicando a maior recorrência desses eventos. Assim, o monitoramento espaço-temporal da frequência é fundamental para o gerenciamento

de riscos, pois regiões com maior frequência de secas demandam maior atenção no manejo de recursos (NETO, 2020).

A avaliação do alcance espacial das secas é realizada considerando a medida pela área afetada. Conforme descrito por Neto (2020), essa análise permite identificar as áreas impactadas, estimar a extensão geográfica do evento, e relacionar seus efeitos com as teleconexões climáticas ou as características físicas da região. O autor ainda descreve que a identificação de regiões homogêneas vulneráveis à seca e a quantificação dessa vulnerabilidade em termos percentuais são importantes para a compreensão da dinâmica das secas e para o gerenciamento de riscos associados a eventos de alto alcance.

3.3 Índice de Seca

Compreender a dinâmica e a variabilidade dos eventos de seca em diferentes escalas espaciais e temporais é essencial para um planejamento eficaz, principalmente para a criação de medidas mitigadoras. A avaliação da seca pode ser realizada como um desvio relativo das condições normais a longo prazo (SLETTE *et al.*, 2020), permitindo comparações no espaço e no tempo entre regiões com distintos padrões climáticos, como as áreas áridas e úmidas.

Deste modo, uma abordagem eficiente para caracterizar e monitorar eventos de seca consiste na aplicação de índices. Esses índices desempenham um papel crucial como ferramentas de apoio à tomada de decisão (ZONSEIN, 2007; MIGUEZ *et al.*, 2018). Além disso, os eventos de seca são frequentemente caracterizados por índices devido às dificuldades de observação direta e à complexidade de definir as variáveis envolvidas no fenômeno, como a duração, o processo de desenvolvimento, a magnitude (severidade) e a influência (LIU *et al.*, 2016).

Dado que os eventos de secas apresentam uma grande diversidade e suas características variam de uma região para outra (e de acordo com os diferentes compartimentos do ciclo hidrológico), diversos índices foram desenvolvidos e internacionalmente disseminados para a sua análise. As diferentes categorias de seca, juntamente com os diversos setores afetados, tornam a definição quantitativa das secas um desafio significativo, devido à sua lenta manifestação e recuperação.

Isso resulta no surgimento de uma ampla gama de índices (LLOYD-HUGHES, 2014 apud VAN LOON, 2015).

Os relatórios técnicos da Organização Meteorológica Mundial (OMM) já catalogaram mais de 58 tipos de índices em escala global, projetados para avaliar aspectos específicos de distintas manifestações de seca, no qual consideravam suas origens meteorológicas, agrícolas ou hidrológicas (WU *et al.*, 2018; CUARTAS *et al.*, 2022).

No ano de 2016, foi desenvolvido por organizações como a WMO, UNCCD e FAO, um manual titulado de "Handbook of Drought Indicators and Indices" que apresenta uma abordagem detalhada sobre os diferentes indicadores e índices utilizados para caracterizar e monitorar as secas. O manual destaca a importância de monitorar esses eventos devido aos seus impactos significativos, que podem afetar desde desertos até florestas tropicais (SVOBODA e FUCHS, 2016).

Os índices de secas podem ser divididos em duas classes, índices padronizados e índices que utilizam como base limites. Os índices baseados em limites, conforme caracteriza as secas ao longo da série temporal original com base em um limite pré-determinado (RAPOSO *et al.*, 2023). Associadas a essas estratégias, as características necessárias (como a severidade e a duração) podem ser derivadas da *run theory* (YEVJEVICH, 1967), na qual um evento de seca é iniciado quando um indicador se encontra abaixo de um limite predeterminado e termina quando ultrapassa esse limite.

Já os índices padronizados, expressam a gravidade de um evento de seca apenas em termos relativos, o que pode limitar sua utilidade no gerenciamento de recursos hídricos, onde são necessários valores absolutos da quantidade de água em falta em relação às condições "normais". Além disso, esses tipos de índices fornecem uma base comum para avaliar e comparar os impactos da seca em diferentes regiões. Uma limitação desses métodos é que eles expressam a severidade das secas apenas de maneira relativa. Para a gestão eficiente dos recursos hídricos, também é essencial quantificar as secas de forma a determinar a disponibilidade hídrica específica de uma região.

Os indicadores e índices de seca, como o índice de precipitação padronizado (SPI, do inglês Standardized Precipitation Index), o índice de severidade de seca de Palmer (PDSI, do inglês Palmer Drought Severity Index) e o índice de evapotranspiração de precipitação padronizada (SPEI, do inglês Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), são ferramentas essenciais para medir a severidade, duração e ocorrência. Eles normalizam a variável hidrológica de interesse (e.g., precipitação), permitindo comparações ao longo do tempo e entre diferentes regiões. Isso facilita a identificação de padrões e tendências, além de oferecer uma maneira objetiva de quantificar esses eventos complexos (SVOBODA e FUCHS, 2016).

A escolha do índice e sua implementação são de suma importância, pois podem levar a conclusões divergentes, sobretudo quando consideradas as tendências e as mudanças globais (VAN LOON, 2015). A autora supracitada também descreve que não existe um “melhor” modelo de índice referente a caracterização das secas e que sua escolha deve ocorrer avaliando o cenário e sua finalidade.

É relevante destacar que os índices desempenham normalmente a função de quantificar a variação em relação a uma condição normal das variáveis examinadas, utilizando como base as condições históricas da região em análise. Nesse cenário, a avaliação específica de variáveis é realizada para cada tipo de seca. Nas secas meteorológicas, por exemplo, são considerados os quantis de precipitação para o cálculo do índice, podendo-se também abordar aspectos como temperatura ou evaporação. No contexto da seca agrícola, a ênfase recai sobre a avaliação das condições de umidade do solo. Já para a seca hidrológica, as vazões do curso de água são adotadas como variáveis cruciais (DAI, 2011).

3.3.1 Índice de Precipitação Padronizado – SPI

Dentre os vários índices padronizados existentes para o cálculo das secas meteorológicas, destaca-se, o Índice de Precipitação Padronizado (SPI), proposto por MCKEE *et al.* (1993), que é amplamente reconhecido e recomendado pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO). Este índice possibilita a avaliação dos eventos quanto à sua duração e severidade, oferecendo uma abordagem robusta para a análise de déficits de precipitação em diferentes escalas de tempo e espaço (PELINSON *et al.*, 2021).

Quando acumulado em intervalos referente a três e quatro meses, o SPI pode ser utilizado para identificar possíveis secas de curto prazo, e para identificação de secas de longo prazo adotam-se os intervalos de doze, dezoito e vinte e quatro meses (GONÇALVES *et al.*, 2021).

Santos (2020) menciona a necessidade de séries que tenham no mínimo 30 anos de dados contínuos de precipitação para a aplicação do método SPI e descreve que, no Brasil, isso é um problema existente, devido as falhas nos dados nos dados de monitoramento, podendo causar prejuízos à veracidade do índice. O índice de precipitação padronizado (SPI) foi desenvolvido para a aplicação em diferentes climas, possibilitando a comparação das secas entre eles.

O SPI é determinado a partir do ajuste de uma função teórica de distribuição de probabilidades (FDP) aos dados históricos de precipitação acumulados para o período de interesse (e.g., 1, 3, 6, 9, 12 e 24 meses). Algumas das distribuições mais utilizadas para a simulação das precipitações para a definição do SPI, são elas: gama, pearson tipo III, LogNormal, GVE (Generalizada de Valores Extremos) e exponencial (MISHRA e SINGH, 2010). Assim sendo, pode-se determinar o SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12 e SPI-24, respectivamente.

As escalas de tempo, segundo Pereira (2017) e apresentas pela a WMO (2012), refletem os diversos usos da água, e conseqüentemente, influenciam as categorias. Algumas dessas categorias são descritas a seguir:

- SPI - 1 mês: Baseado no índice meteorológico, reflete circunstâncias de curto prazo, fornecendo resultados semelhantes à percentagem da precipitação normal mensal.
- SPI - 3 meses: Bastante útil para analisar as condições de curto a médio prazo de umidade do solo, compara a precipitação ao longo de três meses consecutivos de um ano específico.
- SPI - 6 meses: Capaz de detectar tanto períodos de seca quanto excessos de precipitação ao longo das diferentes estações do ano, impactando diretamente

nas vazões e nos níveis de lagos e reservatórios, ao comparar a precipitação em um período de seis meses com o mesmo período na série histórica em análise.

- SPI - 9 meses: Representando os padrões inter sazonais, esta escala de tempo de nove meses considera que as secas levam uma estação ou mais para se desenvolver. Por meio dessa escala, é possível observar a transição das secas sazonais de curto prazo para aquelas de longo prazo, que podem resultar em secas hidrológicas.
- SPI - 12 meses a 24 meses: É considerado um índice hidrológico, reflete padrões de precipitação a longo prazo, com consequências diretas na vazão, nos volumes de reservatórios e nas fontes de águas subterrâneas.

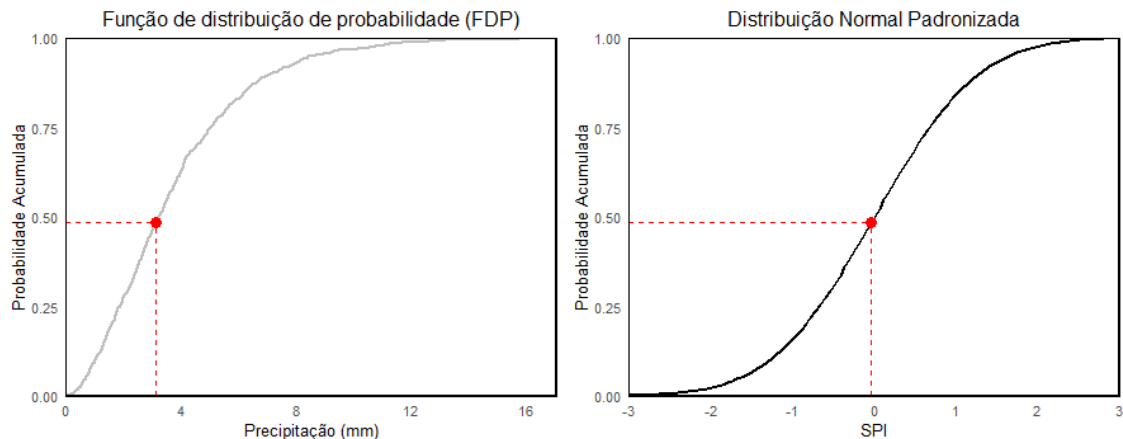
Os quantis derivados da FDP, associados a cada volume precipitado e período de acumulação, são aplicados à inversa da distribuição de probabilidades normal padronizada. Ressalta-se que a distribuição Normal é um modelo a dois parâmetros, conforme a Equação ((1) (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

onde:

- Z é a variável padronizada;
- X é o valor da variável original;
- μ é a média da variável X; e
- σ é o desvio padrão da variável X.

A Figura 3 exemplifica a transformação entre uma distribuição ajustada à precipitação e os índices padronizados (SPI).

Figura 3 - Transformação de uma distribuição para índices padronizados.

Fonte: Autora (2025).

A partir dessa padronização, o SPI pode ser classificado e aplicado para a análise de seca em diferentes climas, uma vez que indicam a amplitude do desvio com relação às peculiaridades de cada região. O Quadro 1 apresenta a classificação das secas proposto por Mckee *et al.* (1993) através do valor do SPI.

Quadro 1 – Classificação das secas conforme o valor do SPI.

Valor do SPI	Classificação
Entre 0,00 e -0,99	Pouco Seco
Entre -0,99 e -1,49	Moderadamente Seco
Entre -1,50 e -1,99	Severamente Seco
Abaixo de -2,00	Extremamente Seco

Fonte: Adaptado Mckee *et al.* (1993).

A utilização do método SPI apresenta vantagens como ser calculado para diversas escalas de tempo e necessitar de apenas informações de precipitação. Isso permite versatilidade para monitorizar o abastecimento de água a curto e longo prazo (MISHRA e SINGH, 2010). Além disso, o método tem a possibilidade de determinação do tempo de retorno da seca, ser um método bastante simples e de ser adaptável às às diversas situações climáticas (GONÇALVES *et al.*, 2021).

Já como desvantagem da utilização deste índice, está na adoção de considerar apenas dados de precipitação, deixando de lado outras variáveis que podem influenciar na gravidade da seca. No entanto, sua adoção é justificada pela suposição de que a variabilidade da precipitação é mais significativa do que a de outros fatores (CANAMARY, 2015). O método apresenta algumas limitações, como a duração do registro de precipitação e a natureza da distribuição de probabilidade escolhida,

diferentes durações e distribuições podem levar a interpretações distintas das condições reais de seca. (MISHRA e SINGH, 2010).

Assim, podemos resumir a aplicação para o cálculo do SPI em quatro passos:

- i) Definição de uma série temporal de dados de precipitações mensais a ser adotada. Ressalta-se que os dados devem ser consistentes e cobrirem um período suficientemente longo para obter uma distribuição representativa;
- ii) Definição do período avaliado (1 mês, 3 meses, 6 meses etc.), que representa a escala temporal dos quais os dados serão agrupados;
- iii) Ajuste de uma função densidade de probabilidade aos dados, para definir a probabilidade de ocorrência da precipitação usando métodos estatísticos, como o método dos momentos (MOM) ou a máxima verossimilhança (MVS), para estimar os parâmetros da distribuição; e
- iv) Cálculo do SPI a partir do quantil utilizando à transformação inversa da distribuição normal padronizada.

3.3.2 Índice Padrão de Precipitação Regional (RSPI)

Introduzido por Hannaford *et al.* (2010) em várias regiões da Europa, como França e Alemanha, o índice padrão de precipitação regional (RSPI, do inglês Regional Standardized Precipitation Index) é um aprimoramento do SPI. Dado que a mesma quantidade de precipitação pode ter efeitos distintos em regiões e períodos diferentes, dependendo das características climáticas de cada local, um valor comum do SPI pode ter interpretações variadas. A metodologia do RSPI propõe agrupar os valores do SPI de acordo com a área de influência das estações de medição de dados de precipitação. Essa delimitação é realizada utilizando o método dos Polígonos de Thiessen, e os valores do RSPI são definidos como a proporção das células, pertencentes a cada região delimitada, que apresentaram SPI menor que -1 (CANAMARY, 2015).

3.3.3 Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI)

Proposto por Vicente-Serrano *et al.* (2010), o índice padronizado de precipitação-evapotranspiração (SPEI, inglês Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) é uma extensão do SPI que incorpora dados de temperatura. Assim, além de ser

simples e aplicável a várias escalas de tempo, o SPEI leva em conta as variações na evapotranspiração (ETP).

O SPEI utiliza a diferença mensal (ou semanal) entre a precipitação e a evapotranspiração potencial como base para seu cálculo. O método de cálculo do índice segue uma estrutura semelhante à do SPI, com a diferença de que, no primeiro passo, a precipitação é substituída pelo balanço hídrico vertical ($P - ETP$) (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2010). O índice, permite calcular em uma vasta gama de climas, possibilitando assim a comparação da severidade da seca ao longo do tempo e do espaço (LIMA *et al.*, 2019).

3.3.4 Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)

O índice de severidade de seca Palmer (PDSI, do inglês Palmer Drought Severity Index) foi desenvolvido por Palmer em 1945 e utiliza dados prontamente disponíveis de temperatura e precipitação para estimar a seca relativa (YANG *et al.*, 2020). Este índice padronizado geralmente varia de -10 (seco) a +10 (úmido). O PDSI tem sido relativamente bem-sucedido na quantificação da seca de longo prazo. Ao empregar dados de temperatura e um modelo de balanço hídrico, o PDSI pode capturar o efeito básico do aquecimento global sobre a seca por meio de alterações na evapotranspiração potencial. É importante observar que os valores mensais do PDSI não conseguem identificar secas em escalas de tempo inferiores a cerca de 12 meses (NCAR, 2024).

Deste modo, o PDSI apresenta como vantagem a identificação eficaz de períodos de seca de longa duração, especialmente em regiões com latitudes baixas e médias. Ao incorporar a temperatura do ar à superfície e empregar um modelo de balanço hídrico, o PDSI considera o efeito primordial do aquecimento global por meio da evapotranspiração potencial. Além de levar em consideração as condições do mês anterior como parte de sua análise (NCAR, 2024).

Como desvantagem, apresenta uma comparabilidade regional menos robusta em comparação com o SPI, embora isso possa ser mitigado através do uso do PDSI autocalibrável, e não dispõe de recursos para avaliar múltiplas escalas temporais, o

que dificulta a correlação com parâmetros específicos de recursos hídricos, como escoamento, acúmulo de neve e armazenamento em reservatórios (NCAR, 2024).

3.4 Vulnerabilidade à Seca

Apesar das diversas abordagens nos estudos de vulnerabilidade e a relevância do tema em diferentes áreas do conhecimento, a vulnerabilidade é amplamente reconhecida como um fenômeno de natureza social. Seja nas análises de vulnerabilidade ambiental, social ou socioambiental, a influência significativa da sociedade sobre esses processos é evidente (LINHARES *et al.*, 2021). A vulnerabilidade é definida como a predisposição de um sistema ou comunidade para ser negativamente afetado por eventos climáticos adversos, como a seca, sendo um resultado da interação entre a sensibilidade e a capacidade de adaptação a esses eventos (IPCC, 2022).

Dessa forma, Deschamps (2009), descreve que áreas e populações consideradas vulneráveis são aquelas mais suscetíveis a um fenômeno geográfico, como terremotos, enchentes, enxurradas e secas. A vulnerabilidade de certas áreas é influenciada pela estrutura geomorfológica e pela localização geográfica, o que as torna mais propensas a esses eventos.

A seca na região do semiárido brasileiro é um fenômeno natural comum no e que se repete anualmente, cujos impactos nas condições de vida e saúde das pessoas são influenciados por políticas públicas e decisões econômicas e sociais. Estas políticas e decisões podem tanto mitigar quanto intensificar a vulnerabilidade das populações e do território (SENA *et al.*, 2014). Nesta região, a vulnerabilidade não se restringe apenas aos aspectos ambientais. Conforme destacado por Sena (2017), a sobreposição de vulnerabilidades social e econômica, caracterizada por altos índices de pobreza, agrava os impactos das secas, intensificando as perdas econômicas e os problemas de saúde.

A sensibilidade, por sua vez, se refere ao grau em que uma sociedade ou região é afetada pela diminuição na disponibilidade hídrica, enquanto a capacidade de adaptação envolve a implementação de medidas para mitigar ou minimizar os impactos (UNISDR, 2004). No caso da seca, as populações mais vulneráveis não

apenas enfrentam dificuldades maiores para acessar recursos essenciais, como água e alimentos, mas também possuem menos capacidade para adotar medidas de mitigação e recuperação, o que torna essas comunidades ainda mais expostas aos eventos.

A análise do impacto potencial da seca demanda a elaboração de estimativas precisas da exposição e sensibilidade, e a integração desses dois elementos é fundamental. Uma compreensão aprimorada do impacto da seca é relevante para as fases de resposta e recuperação; entretanto, a avaliação rigorosa da capacidade adaptativa é igualmente essencial para o desenvolvimento de estratégias preventivas eficazes para futuros eventos. Assim, uma análise confiável da vulnerabilidade exige atenção integral a todos os seus componentes (BROWN *et al.*, 2016).

Os processos de elaboração de índices de vulnerabilidade, baseados em ferramentas estatísticas e geotecnológicas, representam uma abordagem eficaz para entender, prevenir e lidar com desastres. Ao analisar dados e informações relevantes com técnicas estatísticas e geotecnológicas, podemos identificar com mais precisão as áreas e populações mais vulneráveis a eventos como secas (JUNIOR e NETO, 2020).

O WWF-Brasil, em parceria com o Ministério do Meio Ambiente e o Ministério da Integração, lançou o estudo índice de vulnerabilidade aos desastres naturais relacionados às secas no contexto das mudanças do clima (IVDNS). Este índice visa avaliar a vulnerabilidade dos municípios brasileiros em relação às secas, considerando fatores como mudanças climáticas.

Rosendo (2020), desenvolveu indicadores específicos para avaliar a vulnerabilidade à seca no estado da Paraíba, com enfoque abordando aspectos como infraestrutura hídrica, socioeconômicos e ambientais. O estudo foi baseado na metodologia desenvolvida por Bhattacharya e Dass (2007) empregado para 16 estados da Índia.

Neste contexto, o Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) emerge como uma ferramenta capaz de avaliar o grau de vulnerabilidade de uma população frente aos riscos relacionados a desastres climáticos, como as secas.

Existem vários estudos no mundo que desenvolvem o IVS para o cálculo de risco de eventos. No Brasil, por exemplo, Junior e Neto (2020), descreveram uma aplicação do Índice de Vulnerabilidade Social - SoVI® desenvolvido por Cutter *et al.* (2003), com o interesse de contribuir para a vulnerabilidade a desastres naturais em áreas urbanas em estudos geográficos da cidade de Santos - Zona Costeira de São Paulo. Batista e Passini (2023), também desenvolveram o SoVI para a análise de risco de deslizamento de terra no vale do Média Ribeira.

Além do IVS desenvolvido por Cutter, outro meio de obter o IVS no território brasileiro, é através do IVS desenvolvido pelo IPEA. O índice tem o propósito de identificar, em diferentes escalas territoriais – desde o nível nacional até as unidades de desenvolvimento humano (UDHs) – as áreas que concentram situações de vulnerabilidade social, o baseando na premissa de que a ausência ou a insuficiência de ativos essenciais comprometem o bem-estar da população. A identificação precisa dessas carências configura-se, portanto, como um passo para a formulação e o acompanhamento de políticas públicas eficazes, capazes de mitigar as vulnerabilidades e promover a inclusão social (CURI *et al.*, 2018).

3.5 Risco à seca

Atualmente é amplamente reconhecido que o risco, definido como a possibilidade de causar impactos ou consequências adversas, não é gerado apenas por eventos naturais, como secas e inundações, mas surge da interação entre perigos, exposição e vulnerabilidade (IPCC, 2014). De acordo com Wilhite *et al.* (2007), o risco à seca resulta da interação entre a variabilidade climática (frequência e intensidade de eventos secos) e a vulnerabilidade das populações ou sistemas afetados. O conceito de "risco" inclui tanto a exposição a eventos de seca quanto a capacidade de adaptação e resposta aos mesmos.

Van Loon (2015) define o risco à seca como a probabilidade de ocorrer uma seca severa em uma região específica e a intensidade dos danos que ela pode causar, com base em variáveis como precipitação, temperatura e a disponibilidade de recursos hídricos.

Portanto, deste modo, entende-se que a representação adequada do risco à seca não pode se limitar a apenas um fator ou variável, como a escassez de precipitação ou a pobreza. Bates *et al.* (2008), destacam que a avaliação do risco deve integrar a exposição (a magnitude da seca) e a vulnerabilidade (a capacidade dos sistemas sociais e ecológicos de lidar com a seca).

Outros autores como Birkmann *et al.* (2013), também afirmam que para uma abordagem eficaz para a avaliação do risco à seca deve integrar múltiplas dimensões de vulnerabilidade e exposição. Isso inclui a análise de sistemas socioecológicos e a capacidade adaptativa das comunidades. Eles argumentam que a resiliência das comunidades é um fator chave na mitigação dos impactos das secas.

Hagenlocher e Castro (2015), exploram o uso de metodologias de mapeamento de vulnerabilidade que combinam dados ambientais e socioeconômicos para identificar áreas de alto risco. Eles enfatizam a importância de incorporar indicadores de resiliência, como acesso a tecnologias de irrigação e políticas de gestão de recursos hídricos, para uma avaliação mais precisa do risco à seca.

Existem diversas metodologias para o cálculo do índice de risco à seca. Algumas baseadas nas definições de Blaikie *et al.* (1994), Downing e Bakker (2000), Wilhite (2000) e Shahid e Behrawan (2019) como os estudos de Nasrollahi *et al.* (2018) e Avia *et al.* (2023) que descreve o índice de risco à seca (DRI) como o produto entre o índice de perigo de seca (DHI) e o índice de vulnerabilidade a seca (DVI), descrito pela equação (2).

$$DRI = DHI \times DVI \tag{2}$$

O estudo de Avia *et al.* (2023), investiga o risco à seca (DRI) na ilha de Java, Indonésia. O cálculo do risco integra a análise da vulnerabilidade (DVI) e do perigo de seca (DHI), conforme a Equação (2) utilizando o SPI para medir a ocorrência, baseado em longas séries de dados de precipitação.

Para avaliar a vulnerabilidade, foram usados dados de satélite Landsat 8, calculando índices como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e a Temperatura da Superfície Terrestre (LST, do inglês Land Surface Temperature). A metodologia

emprega técnicas como o Processo Analítico Hierárquico (AHP, do inglês Analytic Hierarchy Process) e lógica *fuzzy*. O estudo revela variações significativas na distribuição do risco à seca, influenciadas pela topografia e pelo clima da região, concluindo que regiões com maior elevação e melhor cobertura vegetal são menos vulneráveis à seca, além disso, os autores o destacam que a metodologia pode ser replicada em outras regiões, proporcionando uma ferramenta eficaz para o planejamento e gestão de recursos hídricos, bem como para a implementação de estratégias de mitigação dos impactos das secas.

Utilizando a mesma equação de risco (2), Nasrollahi *et al.* (2018), estudaram a província de Semnan no Irã, com o objetivo de criar um índice de risco à seca (DRI) que proporcione uma ferramenta eficaz na gestão de riscos. Para isso, o estudo utiliza uma abordagem metodológica que envolve a coleta de dados históricos de precipitação e temperatura, além de informações socioeconômicas e ambientais. Com esses dados, são calculado o DHI, utilizando indicadores como o SPI e PDSI, analisando a frequência, duração e intensidade das secas.

Simultaneamente, o estudo avalia a vulnerabilidade da região, considerando fatores como densidade populacional, acesso a recursos hídricos, práticas agrícolas, infraestrutura e indicadores socioeconômicos. A análise estatística e espacial desses fatores permite determinar a capacidade das populações e ecossistemas de suportar e recuperar-se das secas.

Outros estudos, conforme abordado por Khoshnazar *et al.* (2023) integram uma nova componente na equação de risco, denominado índice de resiliência à seca (DRel, do inglês Drought Resilience Index) realizando a média geométrica dos índices como apresentado na equação (3). Embora o DRel não ser usualmente aplicado na avaliação de risco à seca, a inclusão da resiliência, prevê-se que a avaliação de riscos possa ser melhorada, proporcionando resultados mais completos (KHOSHNAZAR *et al.*, 2021).

$$DRI = (DHI \times DVI \times (1 - DRel))^{1/3} \quad (3)$$

Os autores calcularam os índices para a região do Paquistão considerando o DHI no qual mede a magnitude e a frequência dos eventos de seca, utilizando dados de

precipitação e temperatura; o DVI, levando em consideração fatores socioeconômicos como densidade populacional e dependência da agricultura; e o DRel que descreve a capacidade de recuperação de uma determinada região após um evento de seca, considerando a disponibilidade de recursos hídricos e políticas de gestão. A integração desses índices permitiu identificar as regiões como Balochistão e Sindh como áreas de alto risco.

A média geométrica foi adotada para integrar os diferentes componentes do DRI, sendo reconhecida por sua praticidade no cálculo e facilidade de aplicação em comparação a métodos como a Análise de Componentes Principais (PCA, do inglês Principal Component Analysis) (KHOSHNAZAR *et al.*, 2019). Essa abordagem também é amplamente utilizada devido à sua alta precisão (OECD, 2008). Por exemplo, suponha $DHI=0,6$ e $DVI=0,6$, representando níveis médios tanto de perigo de seca quanto de vulnerabilidade. Ao calcular o DRI considerando apenas o produto (Equação (2)), obtém-se um valor que indica baixo risco (0,36). No entanto, esse resultado não parece coerente, pois não reflete adequadamente a gravidade dos índices individuais envolvidos.

3.6 Base de Dados

Algumas das lacunas na gestão da seca são atribuídas à escassez de dados *in situ* e à falta de ferramentas eficazes para previsão e monitoramento. É válido destacar que os registros de precipitação são cruciais para o cálculo de índices de seca, sendo necessário que sejam confiáveis para a realização dos estudos (SANTOS *et al.*, 2010). No entanto, observações de precipitação de longo prazo baseadas em medidores *in situ* geralmente não estão plenamente disponíveis em países em desenvolvimento, como o Brasil, ou em áreas remotas, limitando a aplicação de índices de seca (GUO *et al.*, 2022; MISHRA e SINGH, 2010; JUNIOR *et al.*, 2022).

Portanto, torna-se imperativo aprimorar o monitoramento regional, principalmente em relação às bases de dados empregadas (HAYES *et al.*, 2010). A incorporação de fontes adicionais de informação, como os dados de reanálise, é especialmente relevante em regiões onde as informações disponíveis são limitadas (VEGA-VIVIESCAS, 2019). Essas alternativas podem fornecer dados de precipitação contínua espaço-temporal de longo período para o cálculo de índices de seca,

suprindo a deficiência de observações insuficientes de precipitação em áreas sem monitoramento ou com monitoramento escasso (LI *et al.*, 2023).

Nos centros meteorológicos operacionais, as reanálises encontraram uma ampla aplicação nas ciências atmosféricas. Por exemplo, são utilizadas para avaliar o impacto das mudanças observadas no sistema, monitorar o progresso nas capacidades de modelagem e assimilação de dados, e obter uma compreensão atualizada do estado climático. Além disso, as reanálises são empregadas para avaliar anomalias e erros de previsão, fornecendo assim uma base sólida para avaliações climatológicas precisas (HERSBACH, 2020).

Um banco de dados que tem ganhado bastante notoriedade é a *5th Generation of European ReAnalysis* (ERA5), como descrito por Junior *et al.* (2022). Com mais de 40 anos de dados e uma resolução espacial de 0,25°, esse conjunto de dados tem sido amplamente utilizado em pesquisas científicas em todo o mundo, inclusive em estudos de seca (JUNIOR *et al.*, 2022). O ERA5 também inclui dados sobre as incertezas de suas variáveis, com resoluções espaciais e temporais reduzidas (ECMWF, 2020).

Através da reanálise, pode-se obter séries temporais de precipitação, fundamentais para o cálculo do SPI e avaliação da severidade e duração da seca. Estudos, como o realizado por Kourtis *et al.* (2023), na região da Grécia demonstram como os dados do ERA5 podem ser eficazes na análise de tendências de precipitação e na avaliação da seca utilizando o SPI em diferentes escalas de tempo. Para estimar o Índice de Déficit de Água no Solo (SWDI), em quatro províncias da China, Zhang *et al.* (2021) também usaram o conjunto de dados ERA5. Torres-Vázquez *et al.* (2023) relataram boa concordância entre o conjunto de dados do ERA5 e os dados observacionais fornecidos pela Agência Meteorológica Espanhola. Eles também utilizaram os dados do ERA5 para prever secas sazonais na Espanha. Vicente-Serrano *et al.* (2022) utilizaram o conjunto de dados de reanálise ERA5 para desenvolver um sistema global de monitoramento de seca baseado no SPEI. Por fim, Tladi *et al.* (2022) avaliaram dois produtos de reanálise, a precipitação do Sistema de Reanálise do Centro Nacional de Previsão Ambiental–Sistema de Previsão Climática (NCEP-CFSR) e o conjunto de dados ERA5, para uma bacia na África do Sul em termos de

monitoramento de seca meteorológica, concluindo que o conjunto de dados ERA5 teve um desempenho superior ao NCEP-CFSR para a área de estudo.

No contexto brasileiro, o ERA5 tem sido amplamente empregado em aplicações hidrológicas e no monitoramento de secas, em razão de seu bom desempenho na representação de variáveis climáticas como precipitação e evapotranspiração em diferentes regiões do mundo. Por exemplo, Junior *et al.* (2022) analisaram a eficácia do ERA5 no monitoramento da seca no estado de São Paulo, utilizando os índices SPI e SPEI. Já Cardoso *et al.* (2024) investigaram a capacidade do ERA5 em representar a precipitação na porção brasileira da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo, demonstrando sua boa performance em comparação com dados observacionais locais. Da mesma forma, Pereira *et al.* (2024) realizaram uma avaliação comparativa entre os conjuntos de dados ERA5, MERRA-2 e dados de estações do INMET e ANA na bacia Tocantins-Araguaia, evidenciando que o ERA5 apresentou boa concordância na representação dos padrões de precipitação.

Outro conjunto de dados relevante é o MSWEP (*Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation*), um produto de precipitação global com uma resolução de 0,1° em intervalos de 3 horas, oferecendo dados desde 1979, conforme descrito por Beck *et al.* (2017). Este produto é notável por mesclar informações de conjuntos de dados baseados em observações *in situ*, satélite e reanálise, proporcionando estimativas de precipitação de alta qualidade em cada local. Incorporando observações diárias de medidores e considerando os horários de relatório dos medidores, o MSWEP minimiza inconsistências temporais entre as estimativas de reanálise via satélite e as observações dos medidores (BECK *et al.*, 2019b). Além disso, o MSWEP também considera a subcaptura de precipitação induzida pelo vento, o que é crítico para melhorar a precisão das estimativas de precipitação sólida (LI *et al.*, 2023).

Estudos, como o de LI *et al.* (2023), realizado na China, mostram que o MSWEP tem bom desempenho na captura das variações da seca e nas características dos eventos de seca, como duração, intensidade e severidade, especialmente em comparação com outros produtos de precipitação provenientes de sensores remotos, como o PERSIANN e o CHIRPS. Em áreas de difícil acesso, o MSWEP fornece estimativas

mais confiáveis e precisas para análise de risco à seca, superando a dependência de dados locais limitados.

No Brasil, o conjunto de dados MSWEP tem sido utilizado como alternativa ou complemento aos registros observacionais de precipitação, especialmente em regiões caracterizadas pela escassez de medições *in situ*. Andres (2022), por exemplo, avaliou o desempenho do MSWEP no estado do Rio Grande do Sul e observou que, embora o produto apresente tendência à subestimação dos volumes de chuva, mostrou-se útil para preencher lacunas em séries temporais observadas. De forma semelhante, Celante (2020) empregou o MSWEP na modelagem hidrológica por meio do modelo SWAT, em bacias com baixa densidade de pluviômetros, destacando a contribuição positiva do dado para a melhoria das simulações.

Estudos mais recentes reforçam a confiabilidade do MSWEP. Scariot *et al.* (2024), ao analisarem sua performance na representação de eventos extremos em Santa Maria (RS), relataram boa correspondência com os dados do INMET. De maneira semelhante, Bock *et al.* (2023) compararam estimativas do MSWEP com registros de pluviômetros em diversas capitais brasileiras e verificaram um desempenho satisfatório em múltiplas escalas temporais.

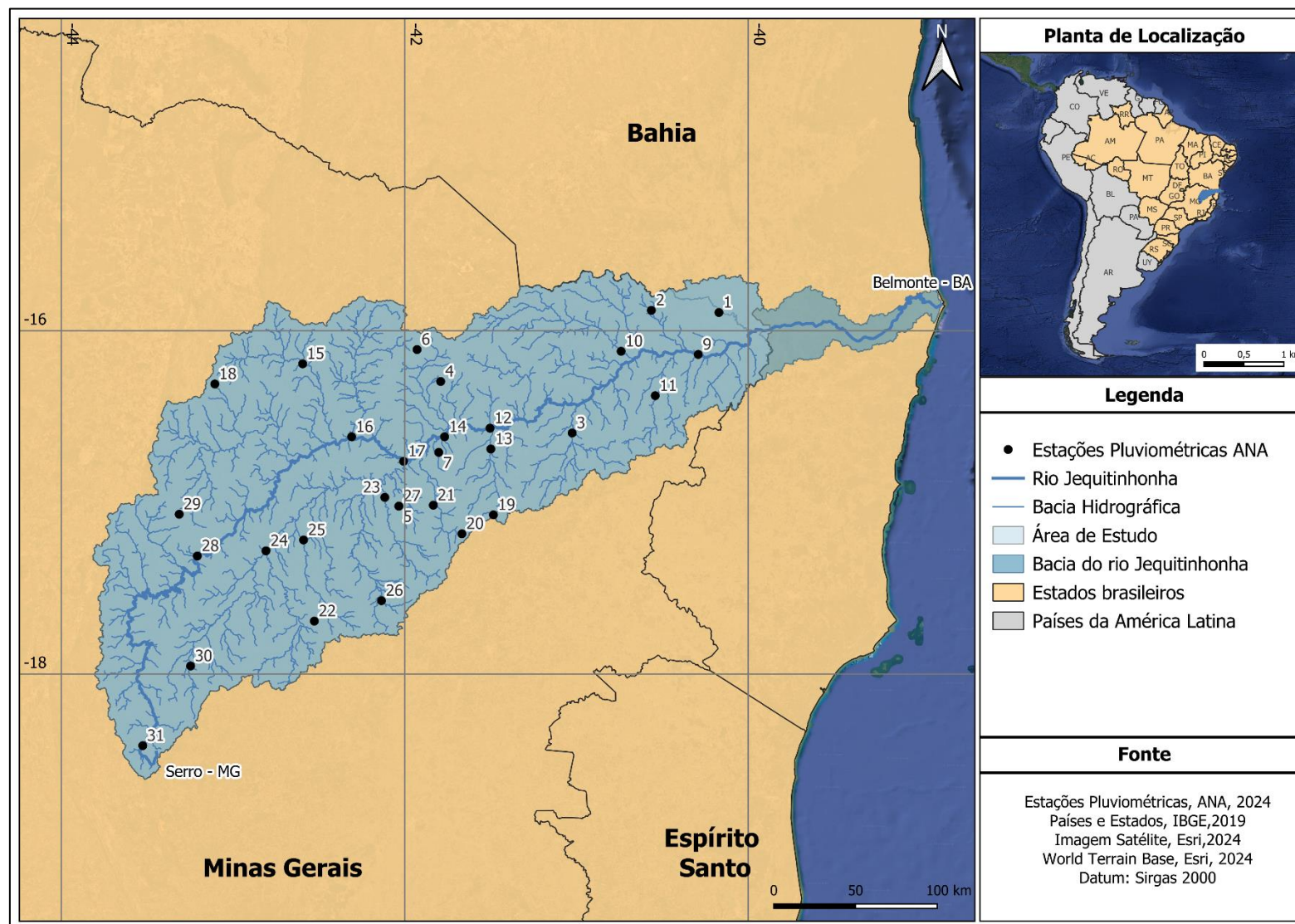
4 METODOLOGIA / MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

A área de estudo é a bacia do rio Jequitinhonha, que abrange uma área total de 69.690 km². A bacia está localizada entre os estados de Minas Gerais e a Bahia, dos quais aproximadamente 65.647 km² (94,20 %) correspondem à porção mineira e 4.043 km² (5,80 %) distribuem-se no território baiano.

A nascente do rio Jequitinhonha está situada na Serra do Espinhaço, no município de Serro-MG, a uma altitude de aproximadamente 1.260 metros. O rio percorre uma extensão de 920 km até desaguar no Oceano Atlântico, na costa litorânea do município de Belmonte-BA (IGAM, 2009). Para este estudo, será considerado como foco apenas a área referente à porção mineira da bacia do rio Jequitinhonha (Figura 4) com intuito de fomentar o Gestor de Águas Mineiro, IGAM, proporcionando-lhe informações precisas e ferramentas adequadas que auxiliem na tomada de decisões eficazes.

Figura 4 – Área referente a bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha.



Fonte: Autora (2025).

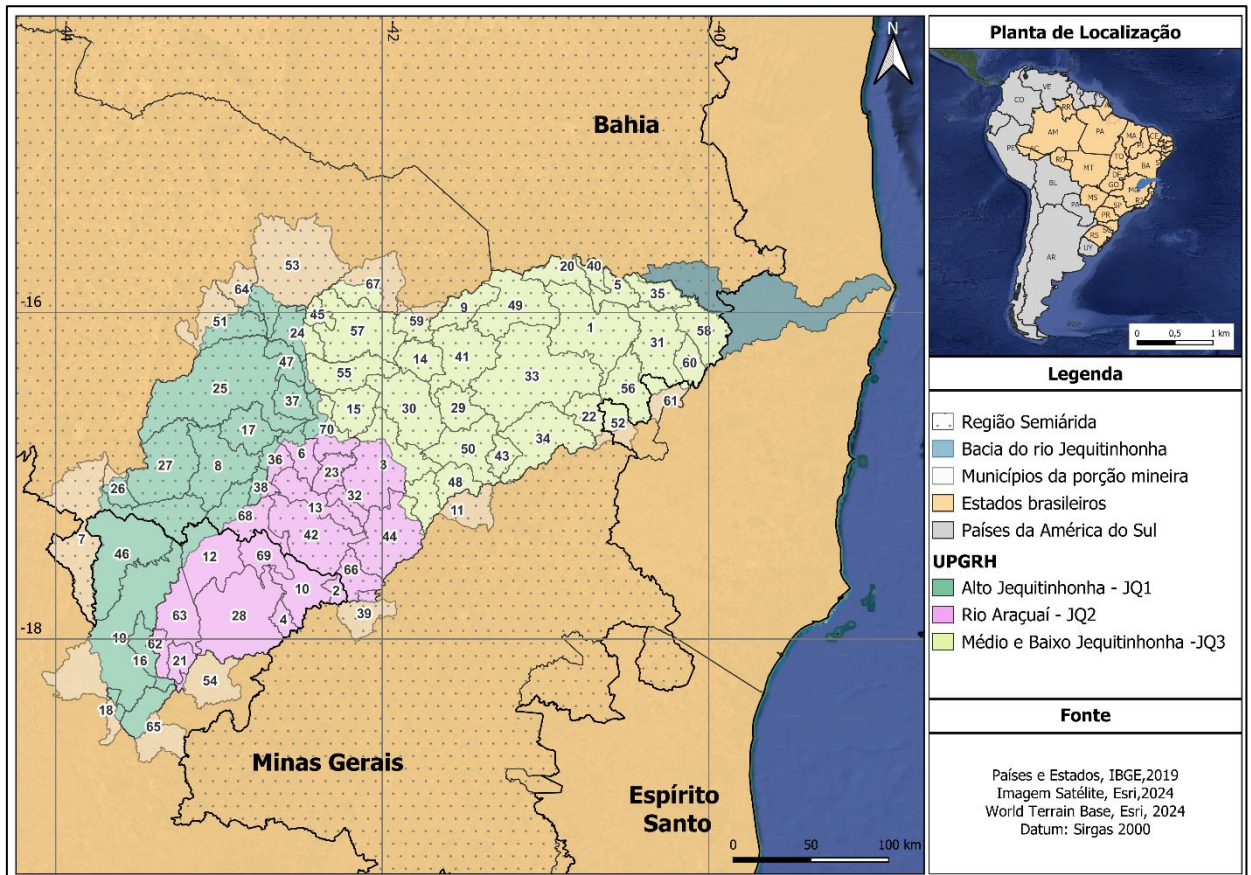
4.1.1 Caracterização geodemográfica da bacia do rio Jequitinhonha

A extensão geográfica da bacia abrange na porção mineira um total de 70 municípios, dos quais 58 estão completamente contidos em sua área e 12 parcialmente inseridos. O censo demográfico de 2022 estimou uma população de 939.293 mil habitantes (IBGE, 2022). Essa configuração geográfica ressalta a abrangência e a distribuição espacial dos centros urbanos ao longo dessa bacia.

Dos quais o município de Diamantina é caracterizado com a maior extensão territorial, ~ 3.891,66 km², seguido pelos municípios de Grão Mogol e Jequitinhonha com 3.885,29 km² e 3.514,22 km², respectivamente. Em relação a população existente em cada município, a maior parte dos municípios é composto por até 10mil habitantes. O município mais populoso é o município de Bocaiúva com a presença de 48.032 habitantes e o menos populoso é o município de São Gonçalo do Rio Preto com 3.032 habitantes.

Além da caracterização territorial e populacional de cada município presente na área de estudo, na Figura 5 e na tabela do APÊNDICE A, é apresentado a distribuição por UPGR. É válido destacar que, na região mineira, a Deliberação Normativa CERH-MG Nº. 71, datada de 22 de dezembro de 2021 (MINAS GERAIS, 2021), instituiu as Circunscrições Hidrográficas (CHs) de Minas Gerais (Figura 5). Essas unidades são identificadas como Alto Jequitinhonha (JQ1), Rio Araçuaí (JQ2) e Médio e Baixo Jequitinhonha (JQ3). Alguns municípios apresentam mais de uma UPGRH dentro da sua delimitação de áreas, como Araçuaí (JQ2/JQ3), Carbonita (JQ1/JQ2), Rubelita (JQ1/JQ3) e Virgem da Lapa (JQ1/JQ2/JQ3).

Figura 5 - Municípios inseridos totalmente e parcialmente na porção mineira da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha.



1-Almenara 2-Angelândia 3-Aracuai 4-Aricanduva 5-Bandeira 6-Berilo 7-Bocaiuva 8-Botumirim 9-Cachoeira de Pajeú 10-Capelinha 11-Caraí 12- Carbonita 13- Chapada do Norte 14- Comercinho 15- Coronel Murta 16- Couto de Magalhaes de Minas 17-Cristalia 18-Datas 19-Diamantina 20-Divisópolis 21- Felício dos Santos 22- Felisburgo 23-Francisco Badaró 24-Fruta de Leite 25-Grão Mogol 26-Guaraciama 27-Itacambira 28-Itamarandiba 29-Itaobim 30-Itinga 31-Jacinto 32-Jenipapo de Minas 33-Jequitinhonha 34-Joáima 35-Jordânia 36-José Gonçalves de Minas 37-Josenópolis 38-Leme do Prado 39-Malacacheta 40-Mata Verde 41-Medina 42-Minas Novas 43-Monte Formoso 44-Novo Cruzeiro 45-Novorizonte 46-Olhos d'água 47-Padre Carvalho 48-Padre Paraíso 49-Pedra Azul 50-Ponto dos Volantes 51-Riacho dos Machados 52-Rio do Prado 53-Rio Pardo de Minas 54-Rio Vermelho 55-Rubelita 56-Rubim 57-Salinas 58-Salto da Divisa 59-Santa Cruz de Salinas 60-Santa Maria do Salto 61-Santo Antônio do Jacinto 62-São Gonçalo do Rio Preto 63-Senador Modestino 64-Serranópolis de Minas 65-Serro 66-Setubinha 67-Taiboeiras 68-Turmalina 69-Veredinha 70-Virgem da Lapa.

Fonte: Autora (2025).

O Alto Jequitinhonha engloba 17 municípios e é caracterizado por extensas chapadas e suas vertentes, com predominância de vegetação de cerrado, campo-cerrado e campo rupestre de altitude. Nessa área, pequenos estabelecimentos são predominantes, e a agricultura familiar exerce grande importância, enquanto há uma crescente tendência de expansão das monoculturas florestais de eucalipto e café (EMBRAPA, 2024).

O Médio Jequitinhonha, composto por 18 municípios, apresenta predominância de terras baixas e vegetação de Caatinga na região norte, com altitudes mais elevadas no sul, onde se encontram remanescentes de Mata Atlântica, além de áreas de cerrado e campo-cerrado (EMBRAPA, 2024).

Por fim, o Baixo Jequitinhonha inclui 16 municípios mineiros, além dos municípios baianos. Essa área é marcada pela presença de grandes estabelecimentos rurais, com ênfase na criação extensiva de gado. A vegetação original da Mata Atlântica foi amplamente substituída por capim-colonião, com algumas faixas de Caatinga remanescentes (CARNEIRO *et al.*, 2006 apud EMBRAPA, 2024).

No âmbito da caracterização dos solos na porção mineira da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, merece destaque a prevalência significativa de Argissolos, Latossolos, Cambissolos e Neossolos. De acordo com Ferreira, (2007), verifica-se também a presença de Litossolos e afloramentos rochosos, notadamente nas áreas expostas do Supergrupo Espinhaço, acrescentando diversidade ao panorama edafoclimático da região. De acordo com a Embrapa (2024), cerca dos 75% dos solos ocorrentes na região são considerados aptos para o cultivo agrícola (Argissolos, Latossolos, Luvisolos e Chernossolos) e 21,7% são de usos mais restritos (Cambissolos e Neossolos).

Maciel (2021) descreve que solos do tipo Argissolos predominam na porção setentrional da bacia do rio Araçuaí, no trecho médio rio Jequitinhonha e extensivamente na região baixo rio Jequitinhonha. No que concerne aos Latossolos, observa-se uma distribuição mais abrangente ao longo de toda a bacia, com uma notável concentração no trecho baixo rio Jequitinhonha, seguido pelo alto rio Jequitinhonha. Em relação aos Cambissolos, sua maior incidência ocorre no centro e norte da porção alto rio Jequitinhonha. Por maior expressividade nas proximidades da nascente do rio Jequitinhonha e em áreas mais amplas na porção alto rio Jequitinhonha.

A bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha apresenta uma variação climática, conforme classificada pelo sistema de Köppen. Predominam os climas Sub-tropical úmido com inverno seco e verão quente/temperado (Cwb e Cwa) e o clima semiárido, caracterizado pela escassez de chuvas, elevadas temperaturas e altas taxas de evaporação (ALVARES *et al.*, 2013, IEPHA-MG, 2017). A região sofre intensamente com as secas, resultando em muitos cursos d'água intermitentes (Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2020). A precipitação anual varia de 600 a 1600 mm, concentrando-se entre outubro e março, enquanto as temperaturas médias anuais oscilam entre 21°C e 24°C (FRANÇA, 2022). A área das nascentes é influenciada pelo clima tropical continental, com precipitação média de 1.600 mm, devido à topografia elevada que favorece chuvas

orográficas e convectivas. Já a região entre a confluência dos rios Jequitinhonha e Araçuaí até a foz é influenciada pelo clima tropical marítimo, com precipitação anual entre 1.000 e 1.600 mm, aumentando em direção ao litoral (ARSAE, 2023).

4.2 Seleção dos Dados de Monitoramento Pluviométricos

As estações de monitoramento pluviométrico diário da bacia do rio Jequitinhonha foram levantadas da Rede Hidrometeorológica Nacional, gerida pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), com o intuito de validar os produtos ERA5 e MSWEP para a região de estudo.

Na porção mineira da bacia do Jequitinhonha, foram identificadas 149 estações pluviométricas, das quais apenas 90 apresentavam algum dado de monitoramento. Para assegurar a representatividade do comportamento temporal e espacial das chuvas, adotou-se um critério de tolerância de 5% de falhas anuais de observação, descartando as estações que não atendiam a essa condição. Além disso, foram excluídas as estações que possuíam menos de 15 anos de dados de monitoramento. Deste modo, foram obtidas 31 estações que atenderam aos critérios estabelecidos (Figura 4) que abrangem os seguintes períodos: 01 estação validada de 01/12/1999 a 30/11/2021 (21 anos), 24 estações de 01/01/2000 a 31/12/2021 (21 anos) e 06 estações de 01/01/2005 a 31/01/2022 (18 anos).

O APÊNDICE B apresenta as principais informações das estações pluviométricas selecionadas para a elaboração dos estudos.

4.2.1 Validação dos conjuntos de dados de Reanálise

A série histórica das estações pluviométricas da ANA selecionadas não possui, em sua maioria, registros contínuos e sem falhas superiores a 30 anos, além de não cobrir integralmente toda a área de estudo. Diante dessas limitações, optou-se pela utilização de dados de precipitação provenientes de produtos de reanálise (ERA5 e MSWEP) como subsídio para o cálculo do SPI.

Para validar os conjuntos de dados ERA5 e MSWEP, foi realizada uma análise comparativa com os dados observados das estações pluviométricas da ANA, conforme descritos no item 4.2, considerando o mesmo período da série histórica dos dados observados.

Deste modo, os dados dos pixels (ERA5 e MSWEP) foram selecionados de acordo com a posição geográfica (latitude e longitude) das estações pluviométricas. Para uma melhor compreensão, cada localização foi denominada de “ponto”, deste modo foram obtidos 31 pontos de estudos. É importante ressaltar que os dados do ERA5 utilizados neste estudo abrangem o período de janeiro de 1959 a dezembro de 2021, totalizando 62 anos. E do MSWEP abrange uma série histórica de janeiro de 1972 até janeiro de 2023, correspondendo 51 anos. A validação foi realizada considerando a precipitação mensal acumulada.

Para as análises, foram realizadas estatísticas métricas descritas no quadro 1, considerando que os dados estimados são identificados como $Y_{Conj.Dados}$ e os dados observados como Y_{ANA} . Todas as análises foram realizadas em linguagem R.

Quadro 2 – Análises e equações estatísticas utilizadas na validação dos dados.

Análises Estatísticas	Equações Utilizadas
Coefficiente determinação (R^2): é utilizado para avaliar a qualidade de um modelo de regressão. Ele indica a proporção da variabilidade na variável dependente que é explicada pelo modelo. O valor de R^2 varia entre 0 e 1, onde 0 indica que o modelo não explica nenhuma variabilidade dos dados e 1 indica que o modelo explica toda a variabilidade.	$R^2 = 1 - \frac{\sum_1^n (Y_{ANA} - \bar{Y}_{Conj.Dados})^2}{\sum_1^n (Y_{ANA} - \bar{Y}_{ANA})^2}$
Raiz do Erro Médio Quadrático (REM_Q): é a média do quadrado das diferenças entre os valores observados com os valores estimados (BENNET <i>et al.</i> , 2013).	$REM_Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{Conj.Dados} - Y_{ANA} ^2$
Viés médio: Indica a tendência média do modelo de superestimar ou subestimar os valores observados sendo obtido pelas diferenças dos valores observados com os valores estimados (BENNET <i>et al.</i> , 2013).	$Viés = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{ANA} - Y_{Conj.Dados}$
Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE): É uma métrica frequentemente empregada para analisar quão bem os valores simulados por um modelo se aproximam dos valores observados. (NASH e SUTCLIFFE, 1970). Sendo que:	$NSE = 1 - \frac{\sum_1^n (Y_{ANA} - Y_{Conj.Dados})^2}{\sum_1^n (Y_{ANA} - \bar{Y}_{ANA})^2}$

Análises Estatísticas	Equações Utilizadas
<ul style="list-style-type: none"> • NSE = 1 - Ajuste perfeito; e • NSE ≤ 0 - O uso da média dos dados observados é melhor que os dados estimados. 	
<p>Log de Nash-Sutcliffe (Log-NSE): é uma variação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), uma métrica comumente utilizada para avaliar a precisão de modelos de simulação hidrológica (NASH e SUTCLIFFE, 1970).</p>	$LogNash = 1 - \frac{\sum_1^n (\log Y_{ANA} - \log Y_{Conj.Dados})^2}{\sum_1^n (\log Y_{ANA} - \log \bar{Y}_{ANA})^2}$

Fonte: Autora (2025).

4.3 Cálculo do SPI

Após a validação das precipitações obtidas pelos conjuntos de dados ERA5 e MSWEP, foi realizado o cálculo do índice de precipitação padronizado (SPI), para o período de interesse de 3, 6, 9 e 12 meses referente ao conjunto de dados que melhor representou a área de estudo.

Os diferentes tipos de secas estão diretamente associados às escalas temporais do índice SPI, com secas de maior duração resultando em déficits hídricos mais acentuados e, por conseguinte, gerando maiores impactos econômicos e sociais. O SPI-3 reflete as condições de umidade do solo em curto e médio prazo, sendo influenciado por variações significativas na precipitação. O SPI-6 está vinculado às anomalias nas reservas de água e nas vazões dos rios, enquanto o SPI-9 ajuda a identificar padrões de precipitação, pois as secas podem levar mais de uma estação para se manifestar. Já o SPI-12 está relacionado à escassez hídrica, tanto em termos de vazão quanto nos níveis dos lençóis freáticos (MULER *et al.*, 2018; DOMINGOS, 2006).

Para o cálculo do SPI, os dados de precipitação acumulada foram ajustados a Distribuição Gama 2P e posteriormente transformados a uma distribuição normal conforme proposto por Mckee *et al.* (1993). A distribuição gama foi escolhida devido à sua flexibilidade e capacidade de modelar eventos extremos de precipitação, além dos bons resultados obtidos em estudos anteriores por diversas partes do mundo, como por exemplo, o estudo de Stagge *et al.* (2015), que recomenda a distribuição Gama para a região europeia para o cálculo do SPI, e o estudo de Maciel, (2021) que realizou o cálculo do SPI na porção mineira da bacia do rio Jequitinhonha. O ajuste da Gama 2P

foi realizado a partir do método dos momentos ordinários (MOM) (NAGHETTINI & PINTO, 2007).

Os cálculos dos SPI's foram conduzidos utilizando o pacote 'SCI' no *software R*, (Gudmundsson e Stagge, 2022). Com o intuito de abranger todos os períodos secos, para o presente estudo, definiu-se o SPI igual ou abaixo de zero como limiar para o início/término de um evento de seca.

Ressalta-se que com os valores calculados do SPI-n, é possível determinar as características dos eventos de seca a partir da *run theory* (YEVJEVICH, 1967), como: (i) o número de eventos de secas, (ii) a duração de cada evento de seca, (iii) a magnitude, que é a soma dos valores de SPI-n de cada evento, e (iv) a intensidade medida pela relação entre a magnitude de um evento e sua duração.

4.4 Índice de Perigo de Seca (DHI)

O índice de perigo de seca (DHI) é um indicador composto de duas variáveis, ambas calculadas com base nas informações do índice de seca (DI) que neste estudo será fornecido pelo SPI. Essas duas variáveis estão associadas às categorias de seca e à probabilidade de ocorrência de cada categoria. Para o cálculo dessas variáveis, o presente estudo baseou-se na metodologia empregada por Khoshnazar *et al.*, (2023) em que os autores calcularam o DHI para o Paquistão. O primeiro passo do cálculo é classificar as características de seca (i.e., duração, magnitude e intensidade) obtidas através dos valores do SPI para as diferentes escalas temporais adotadas.

Destaca-se que, neste estudo, além da intensidade, que é a característica da seca mais frequentemente abordada em estudos de referência, também serão analisadas as características de duração e magnitude. Essas análises serão fundamentais para o cálculo de perigo de seca e, conseqüentemente, para a avaliação do risco à seca em diversas escalas temporais. A Tabela 1 apresenta os intervalos, classificações e os pesos adotados no estudo para determinar o DHI para o SPI-3, uma vez que diferentes características geram diferentes valores de DHI e, conseqüentemente, diferentes índices de risco à seca. Para as demais escalas temporais, as tabelas correspondentes estão disponíveis nos APÊNDICE C ao APÊNDICE E.

Tabela 1 - Classificações (Dr) e pesos (Dw) para categorias de seca, juntamente com as probabilidades de ocorrência para o SPI-3.

Intervalos			Categoria	Peso (Dw)	Probabilidade de ocorrência	Classificação (Dr)
Duração	Magnitude	Intensidade				
SPI > 10,5	SPI ≤ -11,4	SPI ≤ -1,4	Extrema (E)	4	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1
5,5 < SPI ≤ 10,5	-11,4 < SPI ≤ -5,6	-1,4 < SPI ≤ -0,9	Severa (S)	3	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1
2,5 < SPI ≤ 5,5	-5,6 < SPI ≤ -2,3	-0,9 < SPI ≤ -0,4	Moderada (M)	2	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1
1 ≤ SPI ≤ 2,5	-2,3 ≤ SPI ≤ 0	-0,4 ≤ SPI ≤ 0	Baixa (B)	1	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1

Fonte: Autora (2025).

As categorias são formadas a partir da definição dos intervalos para cada característica de seca (obtidas para cada município durante o período amostral) e foi realizada pelo método de quebra natural de Jenks. Esse método minimiza as variâncias dentro das classes (tornando-as o mais semelhantes possível) e maximiza a variância entre grupos (tornando as classes de dados o mais diferentes possível), deste modo, o método identifica as classes reais dentro dos dados e determina o melhor arranjo de valores em diferentes classes (JENKS, 1967).

Após a classificação dos intervalos, foi realizada a classificação das categorias como Baixa (L), Moderada (M), Severa (S) e Extrema (E). Para cada uma dessas quatro categorias, foi destinado um peso (D_W) e posteriormente foi calculado a probabilidade de ocorrência utilizando a equação (4):

$$\text{Probabilidade de Ocorrência} = \frac{N_L}{T_E} \quad (4)$$

Onde N_L é o número de eventos referente a categoria correspondente e T_E é o total de eventos considerados. A partir da probabilidade de ocorrência determinado para cada classe e município, quatro classificações associadas à essas probabilidades foram definidas utilizando novamente o método de quebra natural de Jenks.

As categorias de seca obtidas e suas classificações nos fornecem dois valores usados para calcular o DHI: os pesos (D_W) (com base nas categorias de seca B, M, S e E) e as classificações (D_r) (com base na probabilidade de ocorrência muito baixa, baixa, alta e muito alta).

A alocação de valores (1, 2, 3 e 4) aos pesos (D_W) é realizada com base na abordagem proposta por Becker *et al.*, (2017). Nesta análise, o DHI é tratado como um indicador composto, calculado através da média aritmética ponderada de D_W e D_r . O peso D_W desempenha um papel fundamental, pois reflete a influência de D_r sobre o DHI.

Os valores de 1 a 4 representam diferentes níveis de impacto das categorias de seca no DHI, organizados do menor para o maior impacto. Considerando que valores mais altos de DHI estão associados a condições mais severas, a categoria da característica da seca baixa (B) terá o menor impacto no DHI, atribuindo-se a ela $D_W=1$, enquanto a

categoria da característica de seca extrema (E) terá o maior impacto, correspondente a $D_W=4$. Assim, os pesos D_W serão 1, 2, 3 e 4 para as categorias B, M, S e E, respectivamente. Vale destacar que a mesma lógica se aplica à alocação de valores para as classificações (D_r).

Após isso, o DHI é calculado pela equação (5):

$$DHI = BD_r \times BD_W + MD_r \times MD_W + SD_r \times SD_W + ED_r \times ED_W \quad (5)$$

Os termos BD_r e BD_W referem-se à classificação e ao peso atribuídos à categoria de seca baixa, respectivamente. De maneira similar, MD_r e MD_W correspondem à seca moderada, enquanto SD_r e SD_W se aplicam à seca severa. Por fim, ED_r e ED_W representam as classificações e pesos para a categoria de seca extrema. Os valores de DHI variam de 10 a 40 e foram normalizados entre 0 e 1 utilizando a abordagem de normalização min-max. A fórmula utilizada para essa normalização é apresentada da equação (6) (LIU e MOTODA, 2018):

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (6)$$

Onde:

- X' é o conjunto normalizado;
- X é o valor original;
- X_{min} é o valor mínimo do conjunto de dados; e
- $X_{máx}$ é o valor máximo do conjunto de dados.

Deste modo, foram calculados três conjuntos de dados de DHI, referentes a cada uma das características de seca (i.e., duração, magnitude e intensidade) para as faixas temporais SPI-3, SPI-6, SPI-9 e SPI-12.

4.5 Índice de Vulnerabilidade a Seca (DVI)

O índice de vulnerabilidade social (IVS), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), foi utilizado como indicador da vulnerabilidade nos municípios da bacia do Jequitinhonha, em Minas Gerais.

O IVS é calculado a partir da média aritmética dos subíndices Infraestrutura Urbana, Capital Humano e Renda e Trabalho, com pesos iguais entre eles (IPEA, 2024). Cada subíndice é composto por uma série de indicadores obtidos a partir de variáveis das pesquisas do IBGE (Censos Demográficos e PNADs), podendo também ser calculados com base em registros administrativos. Para calcular cada dimensão do IVS, os indicadores são padronizados com base na normalização min-max, variando entre 0 a 1, em que 0 representa a situação ideal (ausência de vulnerabilidade) e 1 a pior situação (máxima vulnerabilidade).

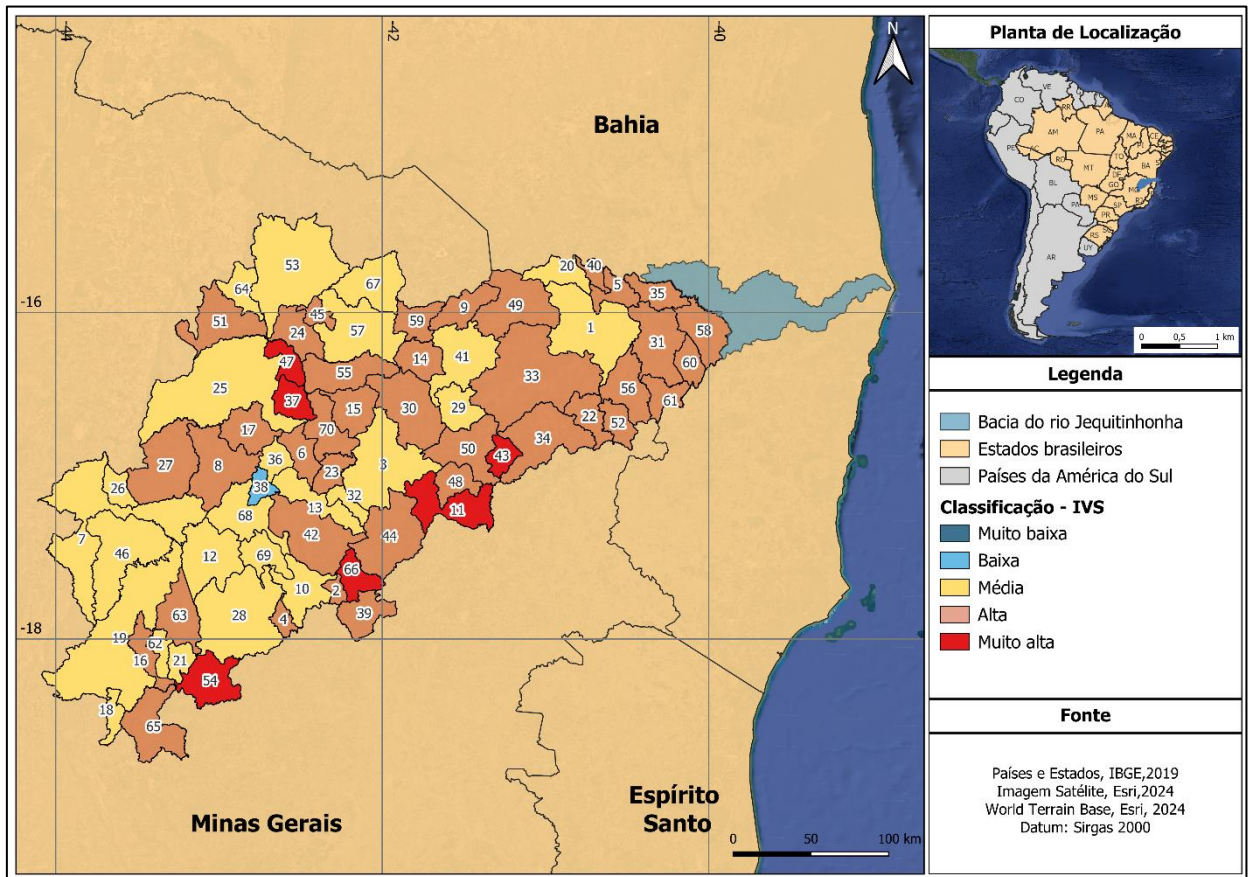
É um índice amplamente adotado por pesquisadores, gestores públicos e governos estaduais para orientar políticas sociais. Embora não tenha um propósito específico inicial, o IVS tem se mostrado valioso no planejamento e avaliação de políticas públicas. O Ministério da Saúde, por exemplo, utiliza o IVS no programa Mais Médicos e para simulações de alocação de orçamento (COSTA, 2023).

Para facilitar a interpretação, os valores são classificados em cinco intervalos qualitativos de vulnerabilidade:

- 0 a 0,200: Muito baixa
- 0,201 a 0,300: Baixa
- 0,301 a 0,400: Média
- 0,401 a 0,500: Alta
- Acima de 0,50: Muito alta

A Figura 6 destaca a distribuição espacial do IVS para a região de estudo considerando os dados do Censo de 2010. Para os municípios da bacia do rio Jequitinhonha, esse índice varia de 0,267 a 0,653 caracterizando a área com a maioria dos municípios com média a alta vulnerabilidade socioeconômica. Ressalta-se que, o município Leme do Prado apresenta o menor índice (0,267), sendo classificado com o IVS baixo. Já os municípios com os índices maiores, denominados de vulnerabilidade muito alta são Carai (0,519), Monte Formoso (0,591), Rio Vermelho (0,528), Padre Carvalho (0,561), Josenópolis (0,631) e Setubinha (0,653).

Figura 6 – IVS na porção mineira da Bacia Hidrográfica do rio Jequitinhonha.



1-Almenara 2-Angelandia 3-Aracui 4-Aricanduva 5-Bandeira 6-Berilo 7-Bocaiuva 8-Butumirim 9-Cachoeira de Pajeú 10-Capelinha 11-Caraí 12- Carbonita 13- Chapada do Norte 14- Comercinho 15- Coronel Murta 16- Couto de Magalhaes de Minas 17-Cristalia 18-Datas 19-Diamantina 20-Divisópolis 21- Felício dos Santos 22- Felisburgo 23-Francisco Badaró 24-Fruta de Leite 25-Grão Mogol 26-Guaraciama 27-Itacambira 28-Itamarandiba 29-Itaobim 30-Itinga 31-Jacinto 32-Jenipapo de Minas 33-Jequitinhonha 34-Joáima 35-Jordânia 36-José Gonçalves de Minas 37-Josenópolis 38-Leme do Prado 39-Malacacheta 40-Mata Verde 41-Medina 42-Minas Novas 43-Monte Formoso 44-Novo Cruzeiro 45-Novorizonte 46-Olhos d'água 47-Padre Carvalho 48-Padre Paraíso 49-Pedra Azul 50-Ponto dos Volantes 51-Riacho dos Machados 52-Rio do Prado 53-Rio Pardo de Minas 54-Rio Vermelho 55-Rubelita 56-Rubim 57-Salinas 58-Salto da Divisa 59-Santa Cruz de Salinas 60-Santa Maria do Salto 61-Santo Antônio do Jacinto 62-São Gonçalo do Rio Preto 63-Senador Modestino 64-Serranópolis de Minas 65-Serro 66-Setubinha 67-Taiobeiras 68-Turmalina 69-Veredinha 70-Virgem da Lapa.

Fonte: Autora (2025).

4.6 Índice de Risco à seca (DRI)

Para esse estudo, o índice de risco à seca (DRI) será determinado pela média geométrica entre o índice de perigo de seca (DHI) e o índice de vulnerabilidade social (IVS), conforme apresentado pela equação (7).

$$DRI = (DHI \times IVS)^{1/2} \quad (7)$$

A metodologia será aplicada para todos os municípios presente na porção mineira da bacia do rio Jequitinhonha, fornecendo um conjunto de dados distribuído espacialmente do DRI, que varia entre 0 (o menor risco) e 1 (o maior risco), conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Categorização do DRI.

Faixa de Índice	Categoria do DRI
0 a 0,15	Muito Baixa
0,16 a 0,29	Baixa
0,30 a 0,43	Relativamente Baixa
0,44 a 0,57	Moderada
0,58 a 0,71	Relativamente Alta
0,72 a 0,85	Alta
0,86 a 1	Muito alta

Fonte: Adaptado de Khoshnazar *et al.*, 2023.

4.7 Impactos Relacionados às Secas

A maioria dos trabalhos que avaliam risco à seca não levam em conta os impactos associados aos diferentes eventos, o que gera desconfiança devido à não validação deles. Nesse sentido, os estudos de eventos extremos baseados em impactos têm crescido nos últimos anos (AGHAKOUCHAK *et al.*, 2023; VEETTIL e MISHRA, 2023). Porém, base de dados sobre impactos associados à eventos extremos (e.g. secas) ainda são pouco disponíveis ou, muita das vezes, como no caso do Brasil, publicamente inexistentes. Nesse sentido, foram levantados decretos municipais referentes aos municípios que abrange a porção mineira da bacia do rio Jequitinhonha, sendo relacionados aos impactos provocados por períodos de seca como Agricultura, Saúde, Economia, Biodiversidade, Qualidade da água, Infraestrutura e Social. Ao todo foram levantados 239 decretos no período de 1999 a 2023.

Para correlacionar o risco à seca, como o DRI-d, DRI-m, e o DRI-i (risco à seca associado à duração, magnitude e intensidade, respectivamente) com os impactos de maiores relevâncias em relação ao quantitativo dos decretos (Agricultura, Saúde, Economia e Social) observados na bacia, foram realizadas Análises de Componentes Principais (PCA). Esta análise permite descrever a correlação linear existente em um conjunto de variáveis multidimensional, proporcionando uma visão geral das relações entre impactos e eventos de seca, permitindo entender melhor como diferentes características de secas influenciam os diversos setores da sociedade e, dessa forma, validar a aplicabilidade dos índices de risco a secas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Validação dos Produtos ERA5 e MSWEP

De um modo geral, para os 31 pontos estudados, verificam-se que, as componentes dos gráficos boxplots referente aos dados de precipitações mensais observados das estações pluviométricas e os estimados pelos conjuntos de dados (ERA5 e MSWEP) possuem padrões semelhantes (Figura 8).

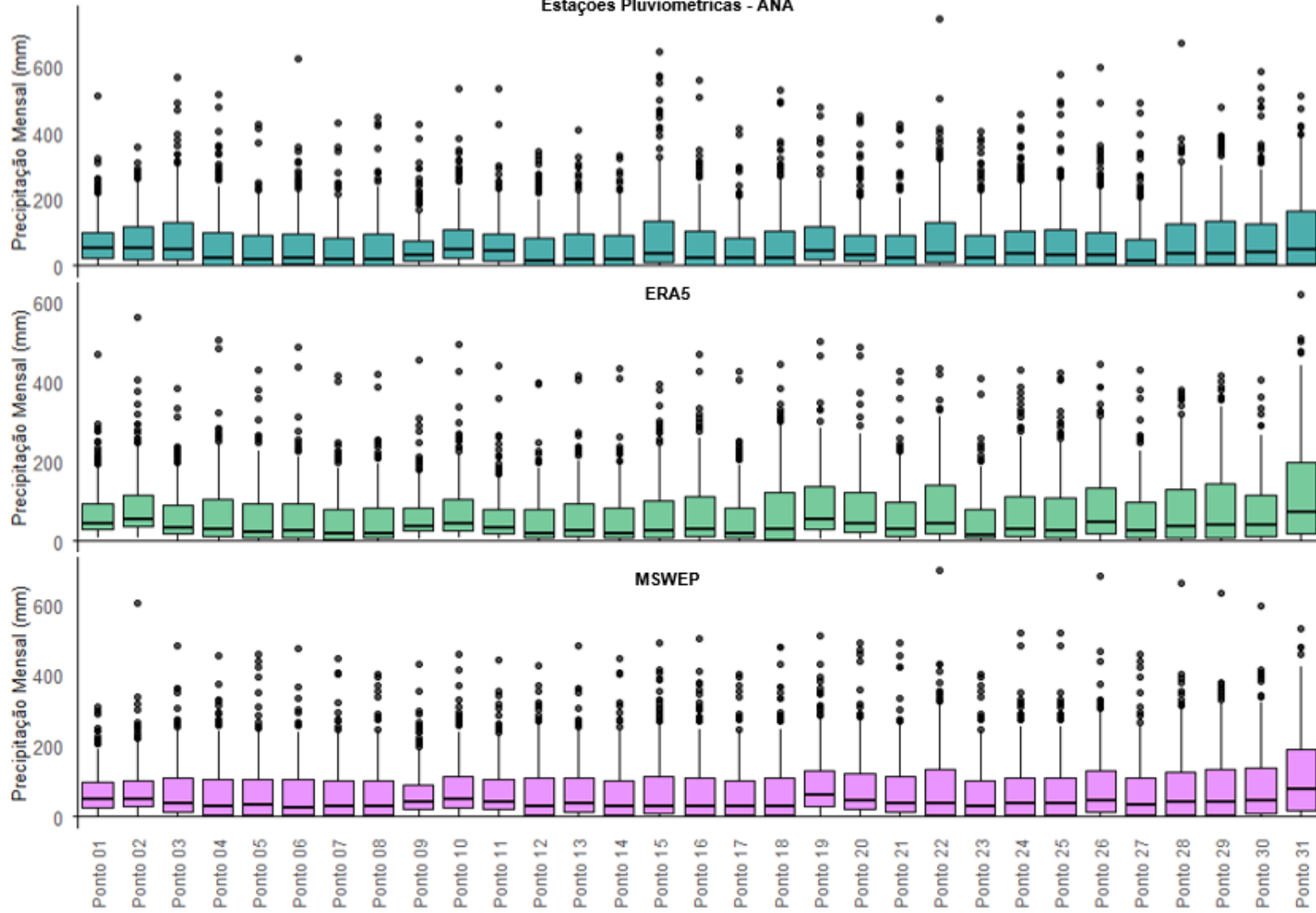
Entre as estações analisadas, serão apresentados os resultados de dois pontos selecionados aleatoriamente. No Ponto 19, os dados da ANA revelaram uma mediana de precipitação de 44,6 mm, com valores mínimos e máximos de 0,00 mm e 479,9 mm, respectivamente. A análise da distribuição das precipitações indicou uma variabilidade significativa, com um Q1 de 20,0 mm e um Q3 de 117,0 mm.

Ao se comparar com os produtos de reanálise no ponto 19, observa-se que o ERA5 apresentou uma mediana de 55,3 mm, com uma amplitude que variou de 5,0 mm a 500,9 mm. Os valores de Q1 e Q3 para o ERA5 foram de 30,3 mm e 136,5 mm, respectivamente. Esses dados sugerem uma leve superestimação das precipitações em relação às medições da ANA, especialmente em algumas estações. Essa tendência de superestimação do ERA5 também foi destacada por Hassler e Lauer (2021), que argumentam que tal comportamento pode ser resultado de limitações na resolução espacial e nos métodos de interpolação usados nos produtos de reanálise.

Por sua vez, o produto MSWEP no Ponto 19, demonstrou uma mediana de 60,8 mm, com um mínimo de 0,77 mm e um máximo de 512,4 mm. Os quartis Q1 e Q3 do MSWEP foram de 29,09 mm e 130,10 mm, respectivamente. Embora a mediana do MSWEP neste ponto seja também superior à da ANA, ela se alinha de forma mais próxima aos dados observados, refletindo melhor a variabilidade dos eventos de precipitação e capturando de forma mais precisa aos extremos observados.

Em relação ao Ponto 05, os dados da ANA indicaram uma mediana de 20,5 mm, com valores que variaram de 0,00 mm a 425,4 mm. Para o produto ERA5, a mediana foi de 24,2 mm, com um intervalo entre 1,0 mm e 430,4 mm, enquanto o MSWEP apresentou uma mediana de 32,2 mm, variando de 0,0 mm a 460,1 mm.

Figura 7 – Gráficos boxplots da precipitação mensal referente aos 31 pontos de estudos.
Estações Pluviométricas - ANA



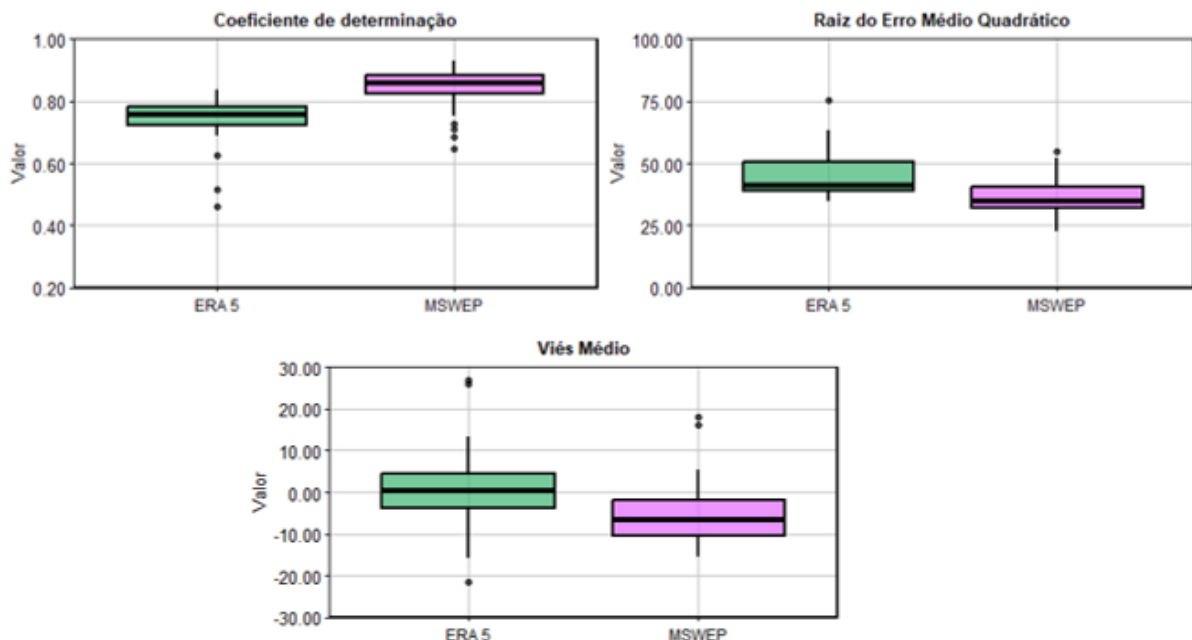
Fonte: Autora (2025).

Neste contexto, o MSWEP mais uma vez demonstra uma capacidade superior de refletir as condições observadas, especialmente em estações com precipitação mais baixa.

Essa constatação também é observada por Sun *et al.* (2018), que sugerem que o MSWEP tem melhor desempenho em regiões áridas devido à sua metodologia multi-fonte que combina dados de satélite, reanálise e estações terrestres. A análise dos resultados obtidos através das diferentes métricas de desempenho dos produtos ERA5 e MSWEP revela observações relevantes sobre a capacidade de cada um em representar a precipitação.

Conforme apresentado na Figura 8, o Coeficiente de Determinação (R^2) indica que o MSWEP apresenta um desempenho superior ao ERA5. Com valores de R^2 variando de 0,6 a 0,9, o MSWEP demonstra uma maior capacidade de explicar a variabilidade das precipitações observadas. Em comparação, o ERA5, com valores que vão de 0,5 a 0,8, mostra-se menos eficaz, especialmente em eventos de maior magnitude.

Figura 8 – Gráficos do tipo boxplot do Coeficiente de Determinação (R^2), Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) e Viés Médio.



Fonte: Autora (2025).

A análise dos quartis Q1 e Q3 fornece uma visão mais detalhada da dispersão dos dados. No caso do R^2 , o Q1 do ERA5 é de 0,7 e o Q3 é de 0,8, enquanto o MSWEP

apresenta um Q1 de 0,8 e um Q3 de 0,9. Isso sugere que a maior parte dos dados do MSWEP permanece acima da mediana do ERA5, evidenciando uma maior consistência nas previsões do MSWEP.

Em relação à Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) (Figura 8), o MSWEP novamente se destaca, apresentando valores que variam de 22,5 a 54,8 mm, em contraste com o ERA5, que possui um intervalo de 34,8 a 75,5 mm. O Q1 do ERA5 é de 39,0 mm, enquanto o Q1 do MSWEP é de 32,2 mm. Além disso, o Q3 do ERA5 é de 50,6 mm e do MSWEP é de 40,7 mm. Esses resultados indicam que, em geral, os erros do MSWEP são menores do que os do ERA5, tanto nos valores mais baixos (Q1) quanto nos mais altos (Q3), reforçando que o MSWEP descreve melhor a distribuição espacial e temporal da precipitação na bacia do rio Jequitinhonha.

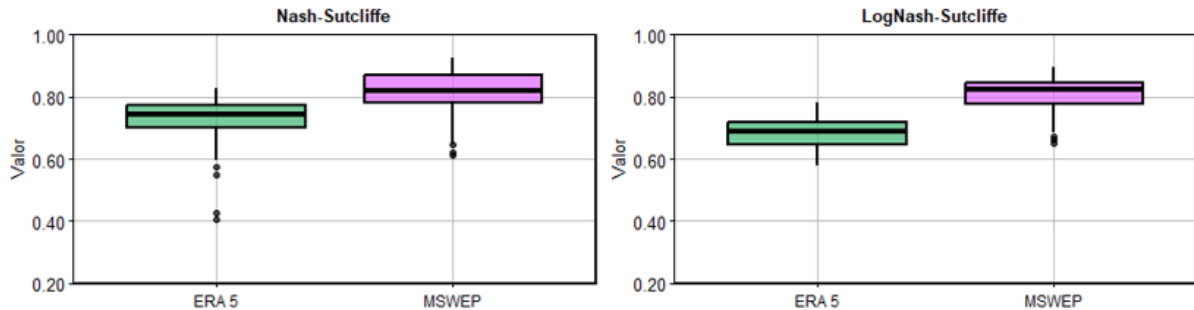
A análise do viés médio (Figura 8) revela que o ERA5 apresenta um viés mais amplo, variando de -21,7 a 26,8 mm, enquanto o MSWEP apresenta valores entre -15,4 e 18,0 mm. Embora a mediana do viés do ERA5 esteja próxima de zero, isso não indica necessariamente maior precisão, já que o modelo pode estar superestimando e subestimando os valores. Essa hipótese é reforçada pelos valores mais baixos de R^2 e mais altos de RMSE observados para o ERA5, sugerindo maior dispersão dos erros. Por outro lado, o MSWEP, mesmo com viés mediano negativo, tende a apresentar erros sistemáticos de subestimação, mas com menor variabilidade e maior aderência aos dados observados.

Embora o ERA5 ofereça uma base sólida para análise climática, estudos como o de Tarek *et al.* (2020) indicam que pode haver viés nas estimativas de precipitação, especialmente em regiões montanhosas e áreas com baixa densidade de observações terrestres. Esses erros sistemáticos podem afetar a precisão das estimativas de precipitação do ERA5.

A avaliação do índice de Nash-Sutcliffe, conforme apresentado na Figura 9, que mede a eficiência de modelos hidrológicos, mostra que o MSWEP também se destaca nesse aspecto. O índice varia de 0,6 a 0,9 para o MSWEP, enquanto o ERA5 apresenta valores que vão de 0,4 a 0,8. Valores mais altos do índice de Nash indicam um melhor

desempenho na previsão, sugerindo que o MSWEP é mais eficiente na captura da dinâmica das precipitações.

Figura 9 – Gráficos do tipo boxplot do Nash-Sutcliffe (NSE) e do Log Nash-Sutcliffe (Log-NSE).



Fonte: Autora (2025).

Por fim, o Log-Nash (Figura 9), que avalia a eficiência do produto em capturar pequenos valores observados de precipitação (fundamentais em estudos de seca), apresenta resultados semelhantes. O MSWEP alcança valores entre 0,7 e 0,9, enquanto o ERA5 varia de 0,6 a 0,8. Essa consistência nos resultados de Nash e Log-Nash reforça a conclusão de que o MSWEP não só é mais preciso, mas também mais robusto em relação ao ERA5.

Estudos regionais, como o de Beck et al. (2017), demonstraram que o MSWEP apresenta desempenho superior em diversas partes do mundo. Na África Subsaariana e na América do Sul, por exemplo, o produto mostrou correlação mais elevada com dados de estações terrestres, evidenciando maior acurácia nas estimativas de precipitação. No contexto brasileiro, Scariot *et al.* (2024) e Bock *et al.* (2023) destacam que, entre os produtos avaliados, o MSWEP foi um dos que apresentaram melhor precisão na estimativa da precipitação em diferentes zonas climáticas do país.

Em contrapartida, o ERA5 se destaca pelo desempenho robusto na representação de padrões de precipitação em larga escala. No entanto, sua resolução espacial mais baixa pode limitar a capacidade de capturar eventos extremos localizados (Hersbach *et al.*, 2020). Muñoz-Sabater *et al.* (2021) discutem a aplicação do ERA5 em modelos hidrológicos, ressaltando a necessidade de calibração adicional em algumas regiões para melhorar a acurácia das simulações. De forma semelhante, Junior (2022) demonstrou que os dados de precipitação do ERA5 apresentaram correlação muito

baixa com os dados observacionais de superfície no estado de São Paulo (Brasil), inviabilizando seu uso direto para o monitoramento de secas nessa área.

Diante desses resultados, para a continuidade dos estudos, decidiu-se utilizar o conjunto de dados do MSWEP, pois ele oferece informações mais robustas e abrangentes para a análise proposta. No entanto, é válido ressaltar que, ambos os conjuntos de dados apresentaram, de um modo geral, uma boa correlação com os dados dos pluviômetros observados, validando, dessa forma, a confiabilidade dos dados estimados. Essa consistência sugere que tanto o MSWEP quanto o ERA5 podem ser utilizados como fontes para análises hidrológicas na região em questão.

5.2 Características das Secas - SPI calculado

A obtenção do SPI em cada município, procedeu-se com a média dos valores dos pixels do conjunto de dados MSWEP abrangidos em suas respectivas áreas. Com os valores dos SPI determinados (SPI-3, SPI-6, SPI-9 e SPI-12) para cada um dos 70 municípios, obteve-se as características das secas como, duração, magnitude e intensidade de cada evento.

5.2.1 Análise em relação a duração

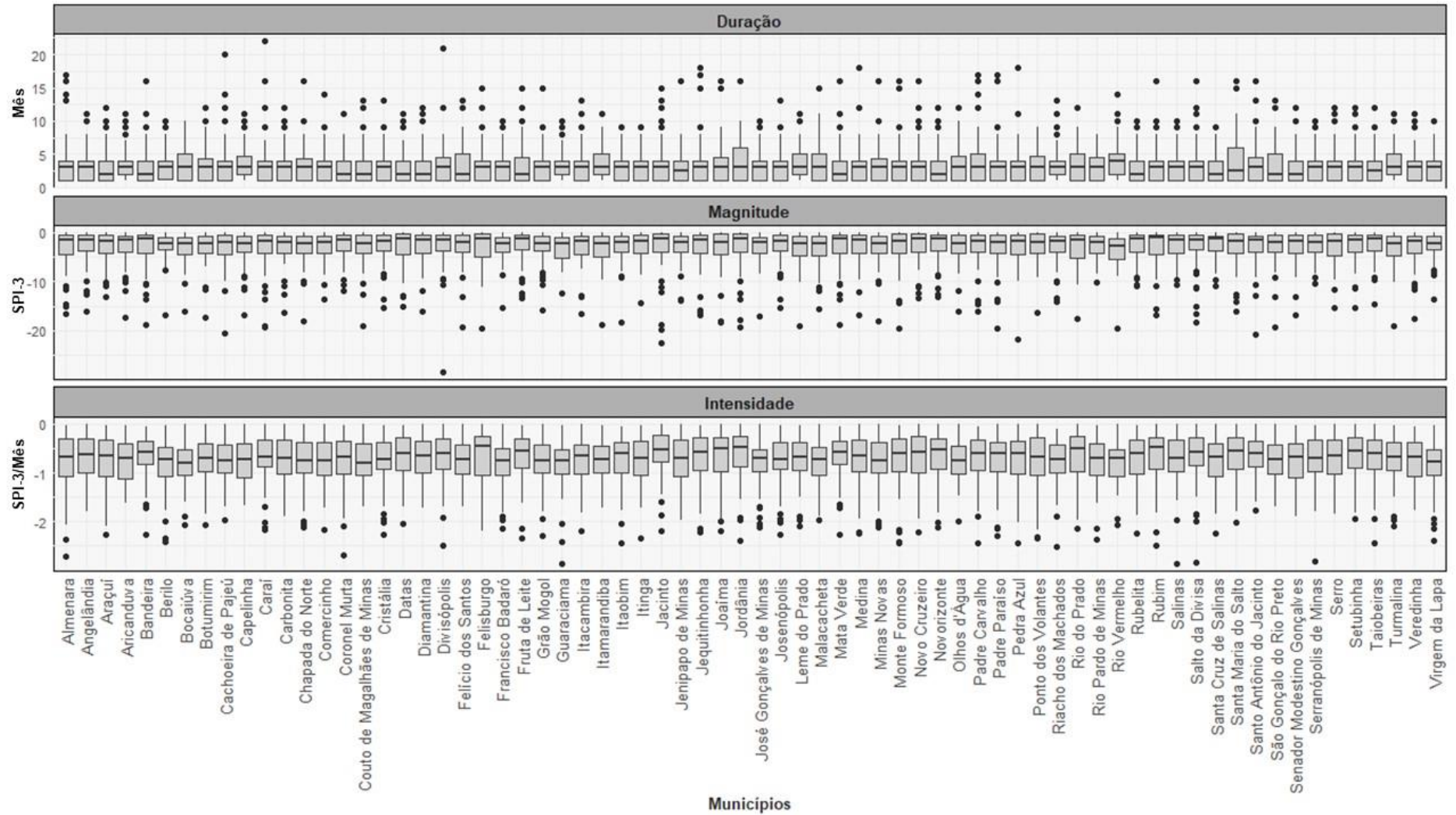
A análise das durações das secas, considerando os índices SPI-3, SPI-6, SPI-9 e SPI-12, revela uma grande variação entre os municípios. De forma geral, observa-se que a duração das secas tende a ser mais longa à medida que o período do índice aumenta, evidenciando a persistência dos déficits de precipitação ao longo do tempo.

Para o SPI-3 (Figura 10), que avalia o déficit de precipitação no período de 3 meses, as secas foram, em média, mais curtas, com a mediana em torno de 3 meses. Isso sugere que, na maioria das localidades, as secas são mais pontuais e de curta duração, variando entre 2 e 4 meses. No entanto, houve exceções notáveis, como o município de Carai, com uma seca de 22 meses.

Para o SPI-6 (Figura 11), as durações das secas apresentaram uma maior dispersão, mas a mediana manteve-se em torno de 3 meses, indicando que, embora a maioria dos municípios tenha enfrentado secas de duração moderada, alguns ainda lidaram

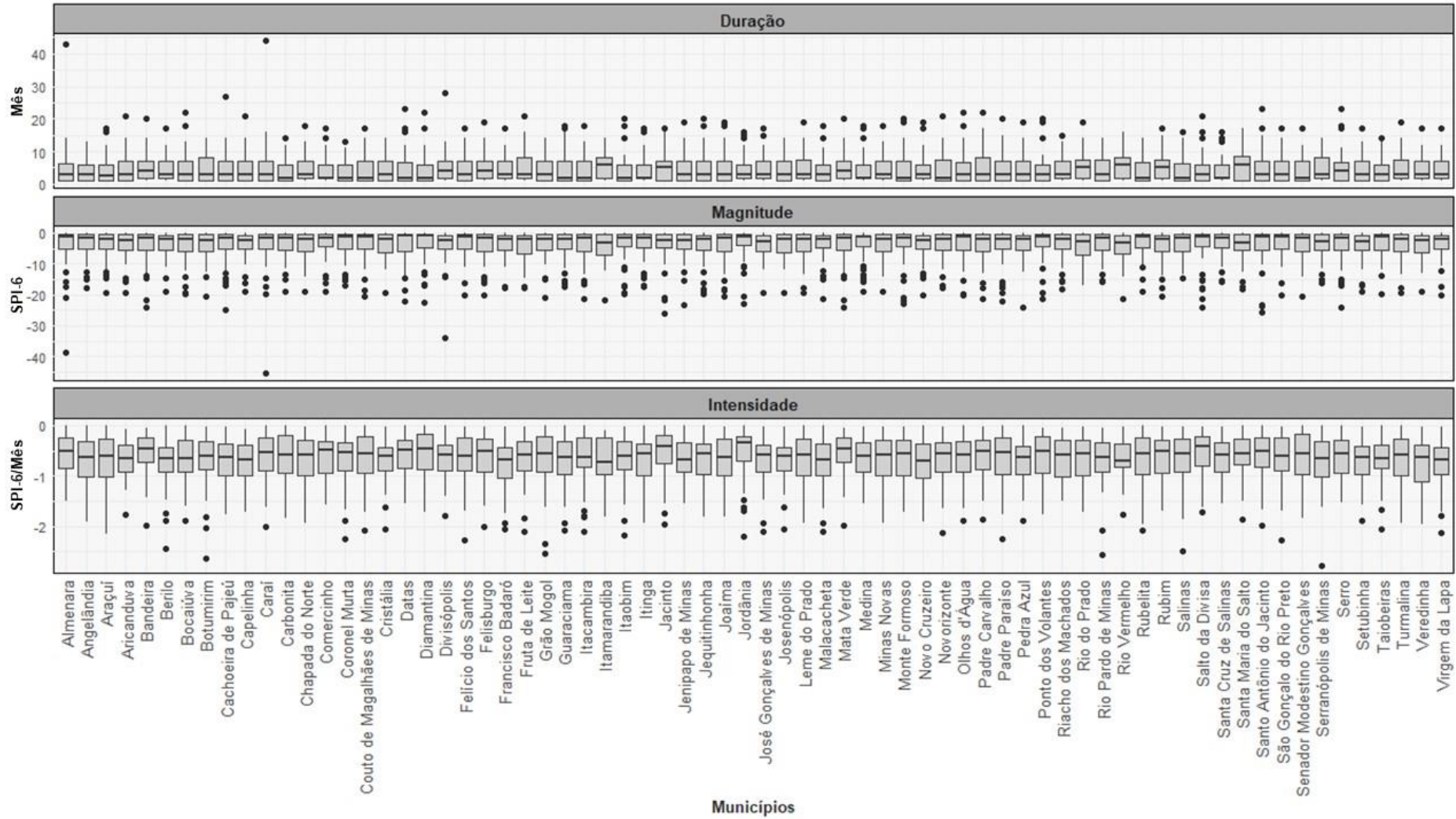
com secas mais longas. Municípios como Carai, com uma seca de até 44 meses, e Cachoeira de Pajeú, com 27 meses, destacaram-se como outliers, sugerindo a necessidade de abordagens diferenciadas, especialmente em áreas mais afetadas por secas prolongadas.

Para o SPI-9 (Figura 12) e o SPI-12 (Figura 13), as secas mostraram uma tendência a se estender por durações mais longas, com a maior parte das durações variando entre 1 e 11 meses.

Figura 10 – Gráficos *boxplots* das características das secas – SPI-3.

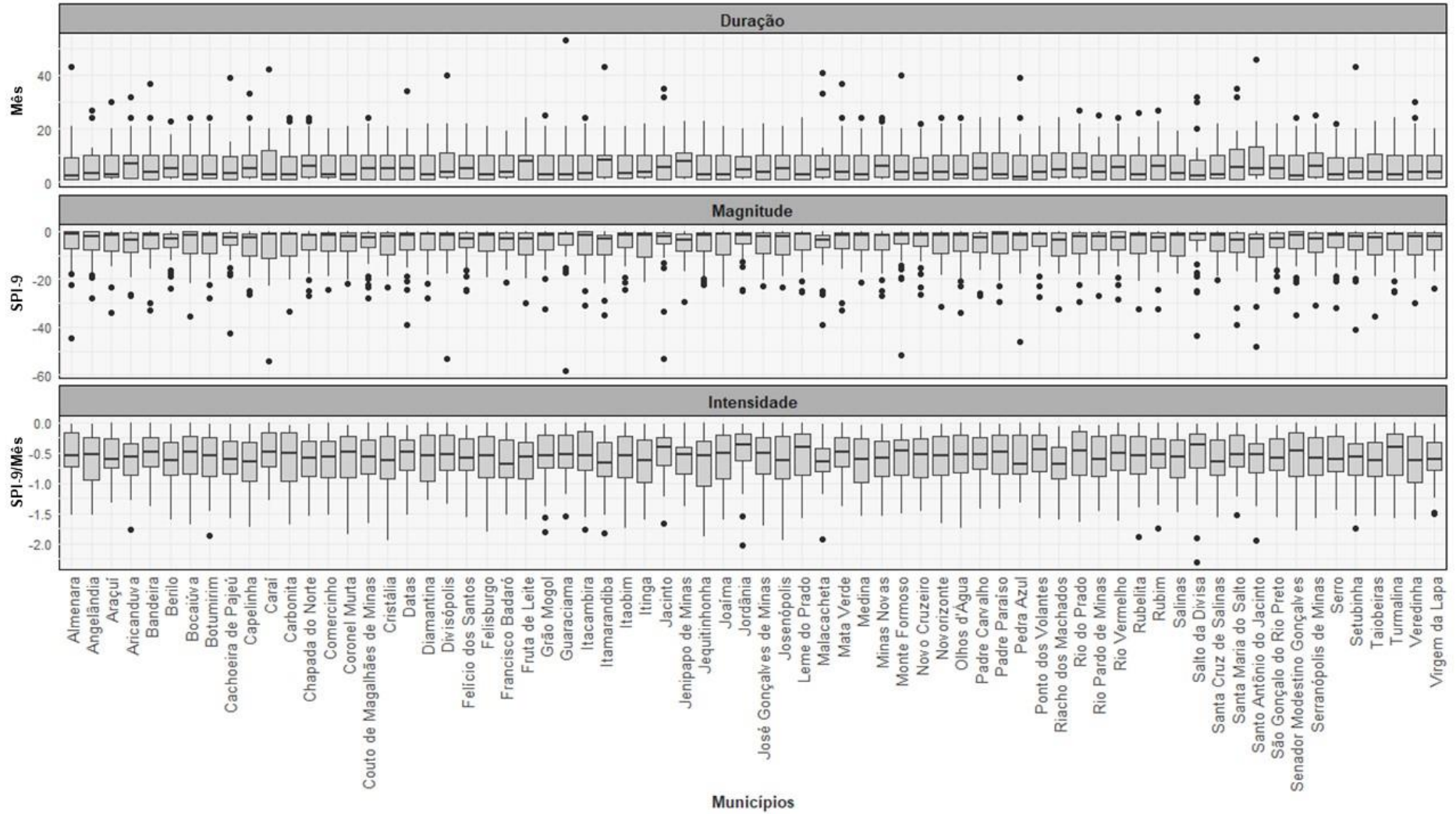
Fonte: Autora (2025).

Figura 11 – Gráficos *boxplots* das características das secas – SPI-6.



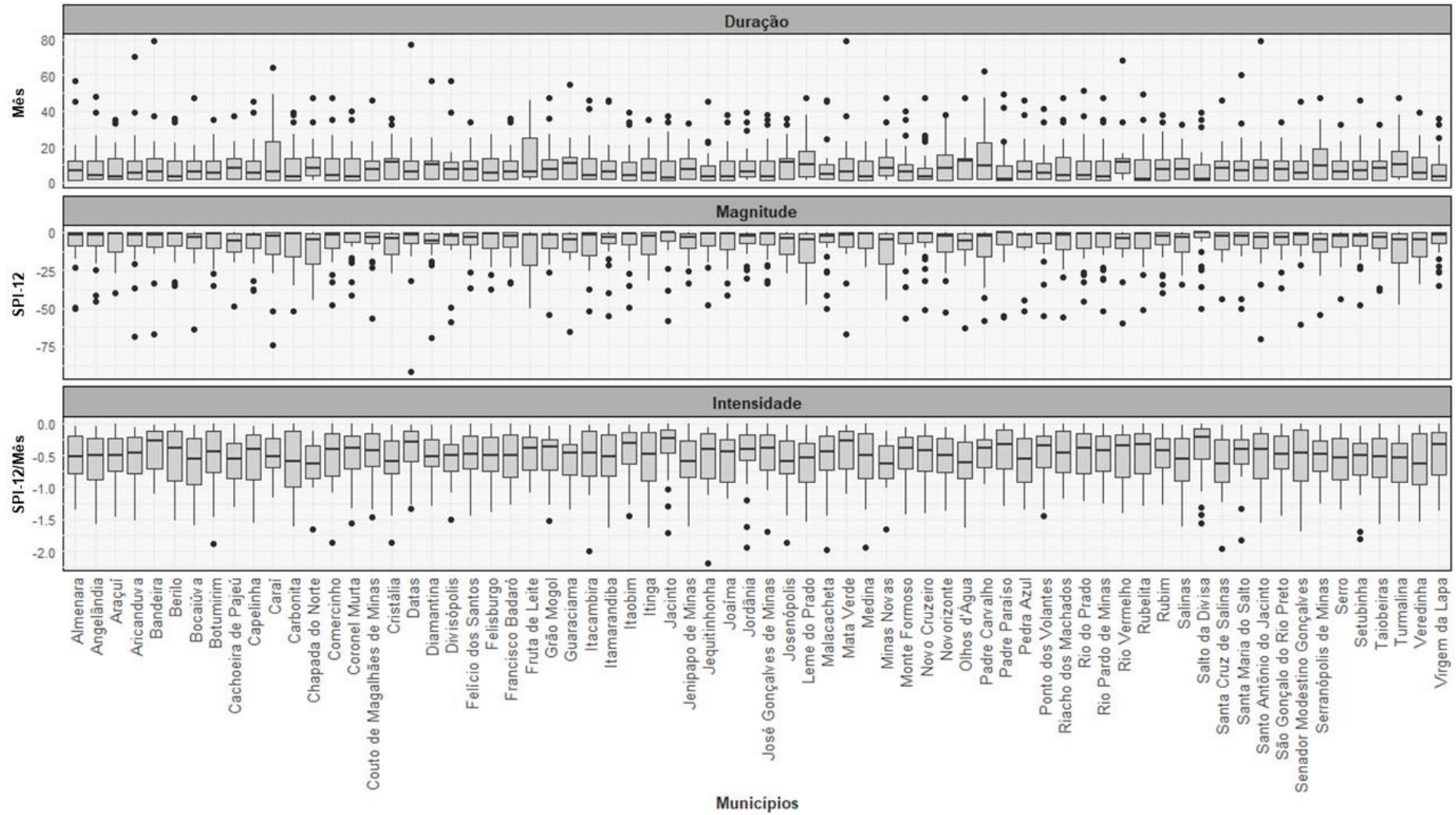
Fonte: Autora (2025).

Figura 12 – Gráficos *boxplots* das características das secas – SPI-9.



Fonte: Autora (2025).

Figura 13 – Gráficos *boxplots* das características das secas – SPI-12.



Fonte: Autora (2025).

O intervalo interquartil (IQR), que mede a dispersão dos dados, variou entre 7,25 e 11,25 meses para o SPI-9 e entre 6 e 22 meses para o SPI-12 nos municípios analisados, indicando que, na maioria dos casos, as secas têm durações mais prolongadas. Destaque para os municípios Santo Antônio do Jacinto e Carai, que chegaram a 46 e 42 meses (~4 anos), respectivamente, considerando o SPI-9 e durações de até 79 meses (~6,5 anos) para o SPI-12. Por outro lado, alguns municípios, como Salto da Divisa e Padre Paraíso, apresentaram durações máximas menores, variando de 30 a 39 meses, e valores de IQR mais baixos, indicando uma menor variabilidade na duração das secas.

Foi perceptível que ao aumentar a faixa temporal, a duração de evento de secas aumenta. Estudos realizados em diferentes regiões do Brasil e do mundo confirmam essa tendência, observando que a ampliação da escala temporal do SPI está associada a uma maior identificação de secas prolongadas (NETO, 2020; AZAM *et al.*, 2018; NYATUAME E AGODZO, 2017).

Em estudo sobre o estado da Paraíba, Brasil, Neto (2020) descreve que essa diferença se deve ao período de acumulação dos dados e à metodologia do índice SPI, que torna o SPI de menor faixa temporal mais sensível às flutuações mensais da precipitação, o que possibilita a detecção mais rápida de variações climáticas e, conseqüentemente, um maior número de eventos secos ($SPI \leq 0$) ao longo do tempo. Por essa razão, é esperado que as secas de curto prazo apresentem maior frequência e variabilidade em comparação com as secas de longo prazo.

Além disso, em estudo no Estado do Rio Grande do Norte, Brasil, apresentado por Lima *et al.*, (2019), também identificaram que as secas moderadas e extremas apresentaram maior duração em comparação às secas de curto prazo. O estudo utilizou o índice SPEI para caracterizar as condições secas e demonstrou que eventos prolongados são mais críticos em termos de impacto.

5.2.2 Análise em relação à magnitude

Em relação aos valores de magnitude, assim como na duração, observou-se uma grande diversidade entre os municípios e nas escalas temporais. Para o SPI-3 (Figura

10), destacam-se os municípios com maiores magnitudes, como Divisópolis (-28,4), Cachoeira de Pajeú (-20,4) e Pedra Azul (-21,8), enquanto os de menores magnitudes apresentaram valores mais moderados. A mediana, na maioria dos municípios, variou entre -1,2 e -2,5, com destaque para Rio Vermelho, que apresentou a maior mediana, com -2,74.

O primeiro quartil (Q1), variou entre -0,47 e -1,73, indicando magnitudes mais brandas na maioria dos municípios. Já terceiro quartil (Q3), que reflete o valor abaixo do qual 75% dos dados se concentram, variou entre -3,45 e -4,91, sugerindo que, na maior parte do tempo, os valores da magnitude foram consideravelmente altos. Municípios como Cachoeira de Pajeú (-4,38), Felisburgo (-4,90) e Serro (-4,77) se destacaram nesse aspecto.

No SPI-6 (Figura 11), observou uma ampla variabilidade nas magnitudes das secas, com alguns municípios apresentando valores extremamente altos, como Carai (-45,39), Almenara (-38,74) e Divisópolis (-33,85). Por outro lado, municípios como Angelândia (-0,00335), Araçuaí (-0,01209) e Coronel Murta (-0,00027) mostram magnitudes menores e próximas de zero, indicando que a magnitude possa ter sido num evento de curta duração.

A mediana das magnitudes variou de forma considerável, situando-se entre -1,1 e -2,3 na maioria dos municípios. No entanto, destaca-se Santa Maria do Salto com uma mediana de -3,31. Os quartis Q1 variou entre -0,0007 e -0,079, enquanto Q3 variou de -0,54 a -3,1. Em termos de dispersão, o intervalo interquartil (IQR), Municípios como Fruta de Leite têm um IQR de 6,08, refletindo uma grande dispersão nas magnitudes de seca, enquanto outros como Comercinho e Medina têm IQRs mais baixos, com valores de 3,94 e 3,73, respectivamente, sugerindo uma distribuição mais concentrada dos valores de magnitude em torno da mediana.

No SPI-9 (Figura 12), o município com a maior magnitude foi Guaraciama, com -58,32, indicando um evento de seca extremamente severo ou com uma duração prolongada. O menor valor registrado foi em Rio Vermelho, com -0,002, que representa um evento de seca muito leve, com magnitude quase desprezível. A mediana para a maioria dos municípios se mantém em torno de -2, com exemplos como Angelândia (-2,01) e

Cristália (-1,97), o que indica que a maioria dos municípios tem secas de magnitude moderada.

O Q1, variou entre -0,5 e -1,0, indicando que uma boa parte dos municípios tem secas de magnitude relativamente baixa. Já o Q3 variou entre -7,0 e -8,0, o que sugere uma concentração de secas de magnitude mais alta, mas sem atingir os valores extremamente severos de magnitude como o registrado em Guaraciama. Municípios como Couto de Magalhães de Minas (-2,41), Serranópolis de Minas (-2,87) e Rubelita (-1,31) se encontram dentro dessa faixa intermediária de severidade, com secas de magnitude significativa, mas não tão extremas quanto as de Guaraciama.

No SPI-12 (Figura 13), de maneira geral, a maioria dos municípios apresentaram magnitudes com variações, mas sem grandes extremos. Embora a magnitude máxima varie consideravelmente entre os municípios, as magnitudes mais extremas, como -91,85 em Datas e -74,45 em Carai, são exceções e não refletem a realidade da maioria dos municípios, que apresentam magnitudes moderadas, geralmente entre -30 e -50. A mediana das magnitudes sugere que a maioria dos municípios está concentrada em torno de valores negativos moderados, entre -2 e -5. As menores magnitudes variam entre -0,245 (Minas Nova) e -0,0008 (Novo Cruzeiro). Quanto aos quartis Q1 e Q3, a dispersão das magnitudes também mostra variação, com a maioria dos municípios apresentando Q1 entre -0,10 e -1,13, e Q3 entre -5 e -13. A maioria dos intervalos interquartis (IQR) está entre 6 e 12, com algumas exceções mais altas, como em Fruta de Leite (21,23), indicando maior variação nas magnitudes nesse município.

Alguns municípios se destacaram em mais de um índice SPI, refletindo padrões consistentes de secas intensas e prolongadas ao longo do tempo. Dentre eles, destaca-se Carai, que apresentou elevados índices de magnitude nos SPI-6, SPI-9 e SPI-12. Divisópolis e Jacinto também se sobressaíram, com altas magnitudes nos SPI-3, SPI-6 e no SPI-9. O município de Santo Antônio do Jacinto merece atenção, pois apresentou altos valores de magnitude em todas as faixas temporais analisadas.

Além disso, é perceptível que os valores da magnitude aumentam à medida que a faixa temporal também aumenta. Nesse contexto, conforme também observado por

Neto (2020), enquanto as secas de curto prazo apresentam um número elevado de eventos, os índices SPI que caracterizam as secas de médio e longo prazo revelaram maiores valores de duração e magnitude média.

Estudos complementares corroboram com essa observação. Por exemplo, o estudo sobre secas meteorológicas, agrícolas e hidrológicas no município de Serrinha-BA, apresentado por Santos *et al.*, (2021) e o estudo de Almedeij (2014) na região de Kuwait, analisaram dados de SPI em diversos períodos. Os resultados mostraram que as secas de maior magnitude ocorreram em escalas temporais mais longas.

5.2.3 Análise em relação à intensidade

De forma geral, os valores das intensidades observadas apresentam variações discretas entre as diferentes faixas temporais, com a tendência de diminuição à medida que a duração das secas aumenta. Esse comportamento é esperado, uma vez que, por definição, a intensidade está inversamente relacionada à duração do evento. Como já mencionado, a duração das secas tende a ser mais prolongada conforme o período do índice é ampliado.

Pesquisas, como a de Ribeiro *et al.* (2024b), reforçam essa constatação ao analisar a bacia do rio Mucuri por meio de modelagem hidrológica, visando compreender o comportamento dos recursos hídricos em escalas temporais mensais e diárias. O estudo evidenciou que secas prolongadas estão associadas a intensidades menores ao longo do tempo, corroborando a ideia de que a intensidade das secas diminui à medida que sua duração se estende.

Essa relação também foi discutida por Neto (2020), que destacou que os valores obtidos da intensidade média, considerando os diferentes tipos de escala temporal, não são tão diferentes uns dos outros assim como ocorreu ao avaliar a quantidade, a duração e a magnitude média.

No caso do SPI-3 (Figura 10), as cidades com as maiores intensidades de seca incluem Guaraciama (-2,85), Salinas (-2,86), Salto da Divisa (-2,83) e Serranópolis de Minas (-2,82), enquanto os valores de menor intensidade são inferiores a -0,10. A mediana da intensidade da seca na maioria dos municípios variou entre -0,44 e -0,79,

com Couto de Magalhães de Minas apresentando a maior mediana. O primeiro quartil (Q1) variou entre -0,24 e -0,54, sugerindo que a maior parte dos municípios apresentou intensidades mais brandas. O terceiro quartil (Q3) variou entre -0,77 e -1,13.

Para o SPI-6 (Figura 11), as cidades com as intensidades mais elevadas de seca incluem Serranópolis de Minas (-2,77), Rio Pardo de Minas (-2,56), Grão Mogol (-2,54) e Botumirim (-2,64), enquanto os valores de menor intensidade estão abaixo de -0,10, com alguns municípios, como Serranópolis de Minas, apresentando valores mínimos mais expressivos. A mediana da intensidade da seca variou entre -0,35 e -0,74 na maioria dos municípios, com Itamarandiba exibindo a maior mediana. O primeiro quartil (Q1) variou entre -0,17 e -0,44, e o terceiro quartil (Q3) variou entre -0,73 e -1,11, com um intervalo interquartil (IQR) médio de 0,61, variando entre 0,45 e 0,78.

No caso do SPI-9 (Figura 12), destacam-se as cidades de Jordânia (-2,02), Salto da Divisa (-2,30), Santo Antônio do Jacinto (-1,95) e Josenópolis (-1,95), com as maiores intensidades de seca. Os valores de menor intensidade, por sua vez, estão abaixo de -0,10. A mediana da intensidade da seca variou entre -0,36 e -0,69 na maioria dos municípios, com Francisco Badarão apresentando a maior mediana. O primeiro quartil (Q1) variou entre -0,14 e -0,36, enquanto o terceiro quartil (Q3) variou entre -0,62 e -1,04. O intervalo interquartil (IQR) médio foi de 0,60, com variação entre 0,38 e 0,79.

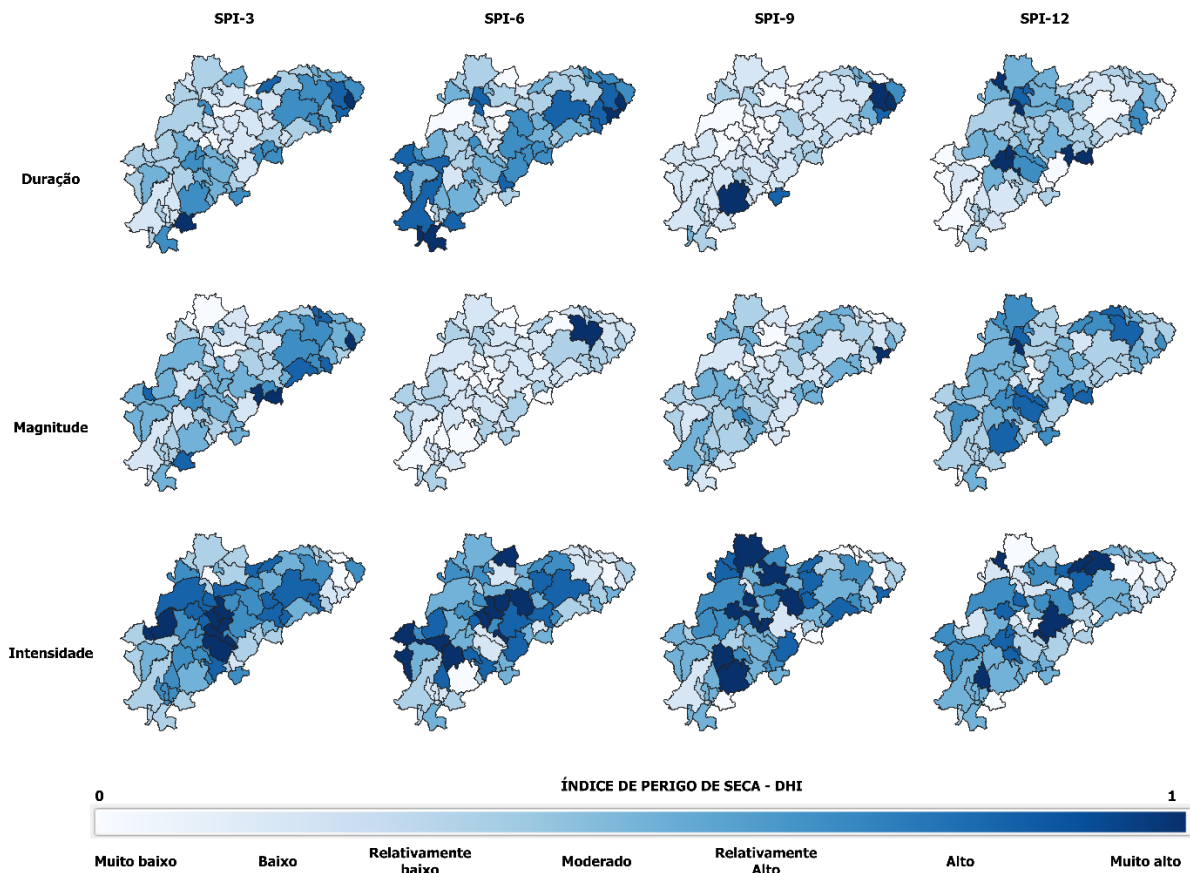
Por fim, para o SPI-12 (Figura 13), as cidades que se destacaram com as maiores intensidades de seca incluem Jequitinhonha (-2,18), Itacambira (-2,00), Malacacheta (-1,99) e Santa Cruz de Salinas (-1,95). Os valores de menor intensidade, novamente, estão abaixo de -0,10. A mediana variou entre -0,22 e -0,63 na maioria dos municípios, com Veredinha apresentando a maior mediana. O primeiro quartil (Q1) variou entre -0,20 e -0,34, e o terceiro quartil (Q3) variou entre -0,46 e -0,99. O intervalo interquartil (IQR) médio foi de 0,58, com variação entre 0,37 e 0,87.

5.3 Índice de Perigo de Seca (DHI) e Índice de Risco à Seca (DRI)

A partir da determinação dos eventos de seca e suas características (duração, magnitude e intensidade), os valores de DHI foram calculados (Figura 14). Observa-se diferentes padrões espaciais do DHI quando considerada as diferentes janelas

temporais do SPI (horizontal) e as características dos eventos de seca (vertical). Para o SPI-6, por exemplo, as características duração e intensidade sobrepõe a magnitude na descrição da distribuição espacial da seca, indicando o seu potencial em estabelecer os índices de risco para os municípios da bacia. O DHI advindo da intensidade apresenta os maiores valores, com municípios sendo classificados como alta ou muito alta propensão a eventos de seca. Porém, esses municípios não são destacados quando, por exemplo, a duração ou magnitude é considerada no computo do DHI. Para a duração e magnitude, diferentes propensões a secas e padrões espaciais são observados, com destaque para os municípios nas margens da bacia. Tais observações destacam que os trabalhos que consideram apenas a intensidade para o computo do DHI podem enviesar o estudo de risco às secas (e.g., ALAMDARLOO *et al.*, 2020; KHOSHNAZAR *et al.*, 2023), bem como a identificação de impactos associados, uma vez que o padrão espacial e de riscos dos municípios muda de acordo com a característica de seca considerada. Dessa forma, os índices propostos que consideram as diferentes características de seca devem ser levados em conta em estudos de risco à seca, uma vez que secas que apresentam diferentes características podem causar diferentes impactos (SASS, 2021; UNODRR, 2021).

Figura 14 – Gráficos do índice de perigo de seca (DHI) para diferentes escalas temporais.

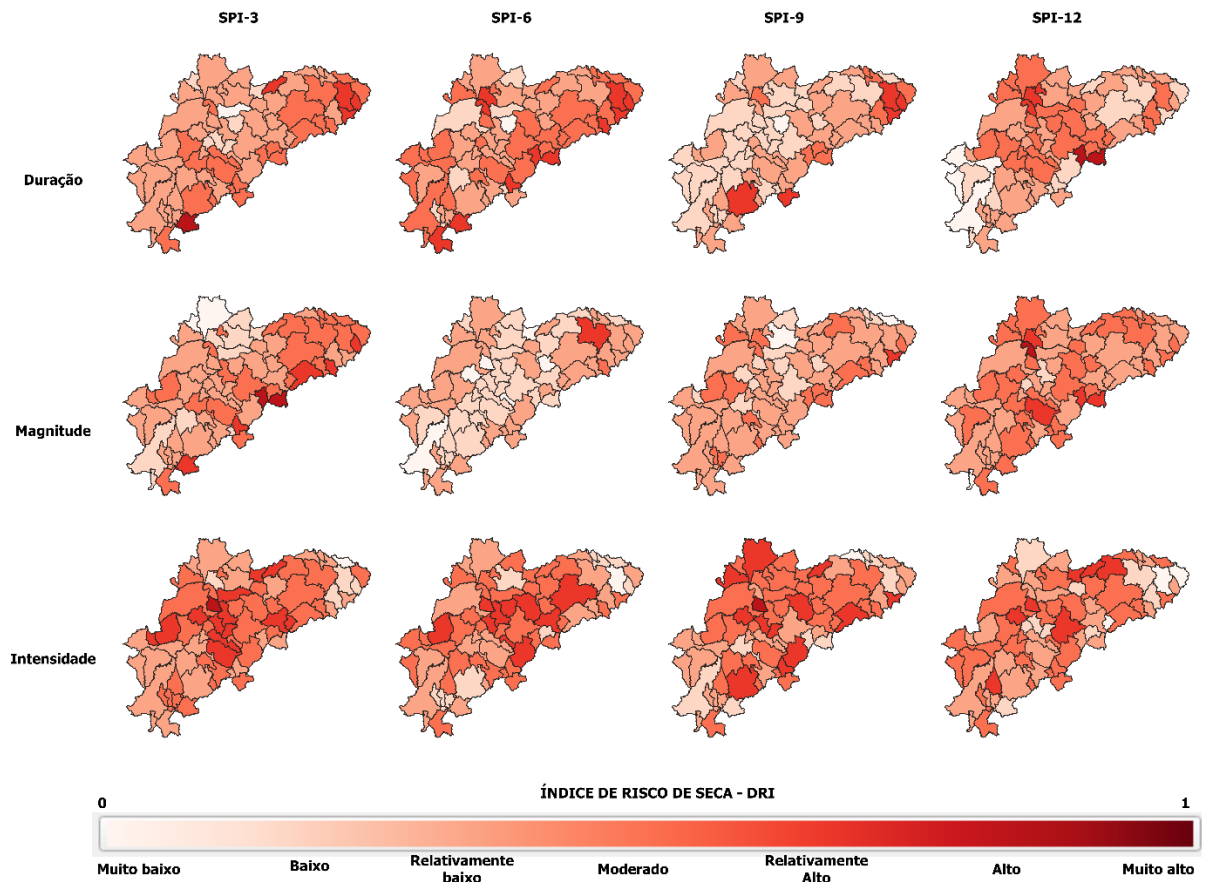


Fonte: Autora (2025).

5.3.1 Análise do risco à seca quanto a duração (DRI-d)

De uma forma geral, os resultados evidenciam padrões distintos de risco à seca entre os municípios, quando analisados nas diferentes escalas do SPI para a característica da seca de duração (Figura 15). No SPI-3, os maiores índices de risco foram observados em Rio Vermelho (0,73) sendo o único como alta e localizado próximo a cabeceira do rio Jequitinhonha, Santa Maria do Salto (0,65), Santo Antônio do Jacinto (0,63), Jacinto (0,63) e Cachoeira de Pajeú (0,60), todos classificados como relativamente alta, abrangendo a região mais baixa da bacia. Em contrapartida, Rubelita (0,00) apresentara o menor índice, classificado como muito baixa, com a maioria dos municípios se concentrando nas classificações de risco relativamente baixa (32 municípios) e moderada (26 municípios), bem distribuídos por toda a bacia.

Figura 15 – Gráfico do risco à seca (DRI) para diferentes escalas temporais.



Fonte: Autora (2025).

Na escala do SPI-6, os maiores índices de risco à seca foram encontrados em Santo Antônio do Jacinto (0,70), Setubinha (0,69), Santa Maria do Salto (0,65), Padre Carvalho (0,67) Carai e Rio Vermelho (0,62), todos classificados como relativamente alta, localizados na faixa da borda direita da bacia, mas com uma leve concentração na região baixa da bacia. Por outro lado, Rubelita (0,18) e Coronel Murta (0,00) mantiveram com baixos índices, seguidos pelos municípios de Taiobeiras (0,15), Grão Mogol (0,23), Couto de Magalhães de Minas (0,24) e Carbonita (0,25). A maioria dos municípios se classificou como relativamente baixa (26 municípios) e de risco moderada (21 municípios), reforçando uma distribuição mais equilibrada nas categorias intermediárias, como é perceptível através da distribuição territorial destes municípios que se encontram bem distribuídos por toda a bacia.

Ao analisar os dados dos municípios quanto ao risco à seca na escala do SPI-9, observa-se que a grande maioria está em situação de risco baixo (25 municípios) ou relativamente baixo (30 municípios). No qual é visível uma faixa central do alto ao

ponto baixa da bacia com predominância dos municípios com o risco baixo. A menor parcela de municípios apresentam risco a seca classificadas como relativamente alta, como Jacinto (0,68), Santa Maria do Salto (0,63), Santo Antônio do Jacinto (0,62), Malacacheta (0,61) e Itamarandiba (0,59). O município de Coronel Murta, localizado na região central da bacia manteve-se com o risco nulo, sendo classificado como muito baixa.

No SPI-12, a maior parte dos municípios se encontram numa situação de risco à seca entre moderado (22 municípios) e relativamente baixo (34 municípios), destaque para o risco moderado que se concentra entre os municípios da região central da bacia. Já a classificação relativamente baixa, apresenta predominância nos municípios próximos a cabeceira e na região baixa da bacia. No extremo oposto, apenas Carai (0,72) se destaca na classificação alta, havendo um aumento na classificação em relação ao SPI-6, Padre Carvalho (0,70) e Fruta de Leite (0,62) apresentaram risco relativamente alta. Diamantina (0,00) e Bocaiúva (0,14) localizados mais para a cabeceira da bacia destacaram-se com os menores valores, classificados como muito baixo.

A consistência observada em municípios como Santo Antônio do Jacinto e Santa Maria do Salto, os deixam em destaque principalmente por apresentarem valores elevados nas escalas dos SPI-3, SPI-6 e SPI-9. Por outro lado, municípios como Rubelita, Berilo e Coronel Murta tendem a apresentar baixos índices de risco à seca em várias escalas temporais.

5.3.2 Análise do risco à seca quanto a Magnitude (DRI-m)

Em relação ao SPI-3, os municípios com os maiores índices ao risco à seca, incluem Carai (0,72), classificado como risco alto, Rio do Prado (0,59), Rio Vermelho (0,66) e Santa Maria do Salto (0,65), Setubinha (0,60) e Joáima (0,60) com risco relativamente alto. Por outro lado, Rio Pardo de Minas e Serranópolis de Minas apresentaram índice nulo, sendo classificados como risco muito baixo. Vale ressaltar que a maior parte dos municípios referente ao SPI-3 caracterizados pela magnitude tendem a ter risco moderado, com valores de SPI entre 0,44 e 0,71 com grande concentração na parte mais baixa da bacia.

No SPI-6, Almenara (0,63) obteve o maior índice de risco de seca classificado como relativamente alto, enquanto Rio do Prado (0,46) apresentou risco moderado, ambos os municípios localizados na região baixa da bacia. Já Cristália, Santa Cruz de Salinas e Josenópolis, com índices 0,00, têm risco muito baixo. De maneira geral, para o SPI-6, 97% dos municípios têm risco classificado como igual ou abaixo de relativamente baixo. O risco baixo compreende os municípios localizados na faixa central da bacia, considerando a cabeceira e direcionando para a região baixa da bacia, sendo contornados lateralmente pelos municípios da faixa relativamente baixo.

Quanto ao SPI-9, Santo Antônio do Jacinto (0,70) é o município com maior índice com o risco relativamente alto à secas e localizaado na parte baixa da bacia, seguido por municípios classificados com risco moderado, como Aricanduva (0,51) e Padre Carvalho (0,51), concentrados na região central da bacia. Jordânia (0,00) e Salinas (0,15) apresentam os menores índices classificado com o risco muito baixo. O SPI-9, em geral, apresenta valores mais baixos e predominância de risco relativamente baixo (40 municípios) bem distribuídos por toda a bacia.

Por fim, no SPI-12, Padre Carvalho (0,75) se sobressaí, sendo classificado com um risco alto à seca, seguido por Caraí (0,66), Fruta de Leite (0,63) e Minas Nova (0,58) com risco relativamente alto, enquanto Datas (0,00) tem o menor índice, classificado como risco muito baixo e localizado próximo a foz da bacia. De um modo geral, a maioria dos municípios apresentam risco moderado (38 municípios) ou relativamente baixo (26 municípios) à seca, como é o caso dos municípios Virgem da Lapa (0,27), Francisco Badaró (0,31) e Medina (0,30) sendo bem distribuídos entre os municípios da bacia.

Comparando as faixas temporais em relação a magnitude, Caraí se destacou com valores elevados no SPI-3 (0,72) e no SPI-12 (0,66). Alguns municípios permaneceram na mesma classificação em relação às quatro faixas temporais analisadas, como é o caso de Capelinha, Coronel Murta e Ponto dos Volantes sendo classificados como relativamente baixa e Felisburgo com o risco à seca moderado.

5.3.3 Análise do risco à seca quanto a Intensidade (DRI-i)

Para o SPI-3, os municípios com os maiores valores, indicando maior risco de seca, incluem Josenópolis (0,72), classificado como risco alto no centro da bacia, Itacambira (0,70), Virgem da Lapa (0,64), Francisco Badaró (0,63) e Cristália (0,62) dentre outros, foram classificados como relativamente alta com grande concentração na região central da bacia. Em contraste, os municípios com os menores índices incluem Jordânia (0,00), com risco muito baixo, Santa Maria do Salto (0,16), Fruta de Leite (0,17), Jacinto (0,23) e Rubim (0,27) classificados como baixo e distribuídos na parte baixa da bacia. Grande parte dos municípios se classificam com o risco moderado (31 municípios) e relativamente baixo (17 municípios). Os de risco moderado estão bem distribuídos por toda parte da bacia, se intensificando mais na região baixa da bacia.

No SPI-6, não há evidências de risco alto entre os municípios. Os maiores índices se enquadram na classificação de risco relativamente alto, Virgem da Lapa (0,68), Itinga (0,65), Berilo (0,64) e Novo Cruzeiro (0,64), dentre outros todos localizados na região central da bacia (entre o alto e médio da bacia). Os municípios com os menores índices incluem Jacinto (0,00), com risco muito baixo, e os municípios de Itamarandiba (0,19), São Gonçalo do Rio Preto (0,26), Felício dos Santos (0,27), Couto de Magalhães de Minas (0,27), Bandeira (0,28), Jordânia (0,28), Mata Verde (0,28) e Santa Maria do Salto (0,28) se destacam entre outros com risco baixo, todos localizados na região próxima a cabeceira, mas também é perceptível municípios com risco baixo em regiões mais baixas da bacia. Ressalta-se que, o risco moderado predominou entre os municípios (29 municípios), seguido pelo risco relativamente baixo (18 municípios), sendo bem distribuídos na bacia.

Os municípios com os maiores índices no SPI-9 incluem Josenópolis (0,77), classificado como risco alto, Cristália, Setubinha (ambos com 0,66), Jequitinhonha, Santo Antônio do Jacinto e Itinga (todos com 0,63), classificados com risco relativamente alto. Em contraste, os menores índices são de Divisópolis (0,00), com risco muito baixo, e Jacinto (0,18), Carai (0,19), Mata Verde (0,24) e Bandeira (0,24), todos com risco baixo distribuídos entre a parte alta e baixa da bacia. Assim, como no SPI-6, o risco moderado predominou entre os municípios (32 municípios), seguido pelo risco relativamente baixo (18 municípios), sendo bem distribuídos na bacia.

Para o SPI-12, os maiores índices dentre outros foram observados em Cachoeira de Pajeú (0,69), Josenópolis (0,68) e Pedra Azul (0,65), classificados como risco relativamente alto. Os menores índices classificados como risco muito baixo foram observados em Jacinto, Salto da divisa e Monte Formoso (todos com risco 0,00) na região baixa da bacia, seguidos por Berilo (0,17), Rio Vermelho (0,19) e Rio Pardo de Minas (0,23), classificados como risco baixo. O risco moderado predominou entre os municípios (28 municípios), seguido pelo risco relativamente baixo (23 municípios), sendo bem distribuídos por toda a bacia.

É válido ressaltar que a o risco moderado à seca foi a classificação da maioria dos municípios em todas as faixas temporais. Municípios como Alto Jacinto, Rubim e Santa Maria do Salto sempre apresentaram índices menores em todas as faixas temporais estudadas ao contrário do município de Josenópolis que sempre obteve os maiores índices. Berilo manteve-se com risco relativamente alto nos SPI-3, SPI-6 e SPI-9, mas mudou para risco baixo no SPI-12. Do mesmo modo, os municípios de Itacambira, Monte Formoso e Virgem da Lapa apresentaram risco à seca relativamente alto no SPI-3 mas foram tendo os seus índices decaídos a medida que aumentava a faixa temporal. Destaca-se também os municípios de Botumirim, Malacacheta e Novorizonte que permaneceram com risco moderado em todas as escalas temporais.

A análise de risco realizada revelou padrões espaciais distintos para a duração (DRI-d), intensidade (DRI-i) e magnitude (DRI-m) ao longo das diferentes escalas temporais do Índice Padronizado de Precipitação (SPI-n).

Uma explicação para a mudança do padrão espacial está na interação entre o Índice de Perigo de Seca (DHI) e o Índice de Vulnerabilidade Social (IVS). Como o IVS foi mantido constante ao longo da análise para todas as características da seca e escalas temporais, a variação observada pode ser atribuída principalmente ao DHI, que responde diretamente às condições meteorológicas. De fato, os padrões espaciais de risco foram semelhantes aos do DHI, ou seja, os maiores riscos foram registrados nos municípios com maiores valores de DHI, enquanto os menores riscos ocorreram onde o DHI foi mais baixo, independentemente da característica da seca ou da escala temporal considerada.

No entanto, o mesmo não pode ser afirmado para o IVS. Um exemplo notável é o município de Leme do Prado, que apresentou o menor índice de vulnerabilidade (0,267), mas não teve necessariamente os menores valores de risco à seca. Isso ocorre devido à fórmula utilizada para calcular o DRI, baseada na média geométrica, cujo objetivo é equilibrar a influência do DHI e do IVS, garantindo que ambos tenham o mesmo peso na determinação do risco. Esse equilíbrio é fundamental, pois uma região pode apresentar alto perigo de secas (DHI elevado) e, ao mesmo tempo, baixa vulnerabilidade social (IVS baixo), ou o contrário (KHOSHNAZAR *et al.*, 2019). A média geométrica assegura que o DRI reflita essas dinâmicas, evitando que um único fator domine a avaliação do risco (OECD, 2008).

Outro fator crucial na caracterização do risco de seca é a influência do período de acumulação do SPI-n. Diferentes escalas temporais do SPI, como observado na Figura 15, refletem distintas respostas hidrológicas, impactando diretamente a forma de como os eventos de seca são registrados e interpretados (MCKEE *et al.*, 1993; VICENTE-SERRANO *et al.*, 2010).

Para períodos mais curtos, como o SPI-3, a variabilidade interanual da precipitação é mais evidente, resultando em uma maior oscilação dos valores do SPI e, conseqüentemente, em uma distribuição espacial mais heterogênea do risco. Isso é refletido na Figura 15, onde há uma maior variação espacial dos índices de duração (DRI-d), magnitude (DRI-m) e intensidade (DRI-i). Nessa escala, eventos de seca são capturados em curto prazo, podendo ser relevante para impactos imediatos na agricultura (GUTTMAN, 2007; VICENTE-SERRANO *et al.*, 2010).

No SPI-6, observa-se um padrão mais suavizado em relação ao SPI-3, indicando que essa escala captura melhor secas sazonais, que podem estar associadas a padrões climáticos regionais. A distribuição espacial do risco ainda apresenta variabilidade significativa, mas há uma transição para áreas mais homogêneas de seca moderada a alta, especialmente na intensidade e magnitude, sugerindo impactos mais prolongados na produtividade agrícola e no abastecimento de água (LLOYD-HUGHES e SAUNDERS, 2002).

À medida que o período de acumulação aumenta, como no SPI-9, os mapas da Figura 15 mostram um padrão espacial mais consolidado, refletindo secas mais prolongadas que afetam múltiplas estações. Essa escala é útil para avaliar impactos na recarga de aquíferos e na sustentabilidade dos mananciais superficiais (MCKEE *et al.*, 1993; SVOBODA *et al.*, 2012).

Por fim, o SPI-12 apresenta um padrão espacial ainda mais homogêneo, o que é coerente com sua função de identificar tendências de seca de prazos maiores. Os mapas (Figura 15) mostram uma suavização das variações interanuais, com áreas de risco mais amplas e bem definidas. Essa escala é particularmente relevante para a análise de secas hidrológicas, pois reflete impactos na disponibilidade de água subterrânea, nos cursos d'água e no armazenamento em reservatórios (HAYES *et al.*, 2010; DAI, 2011).

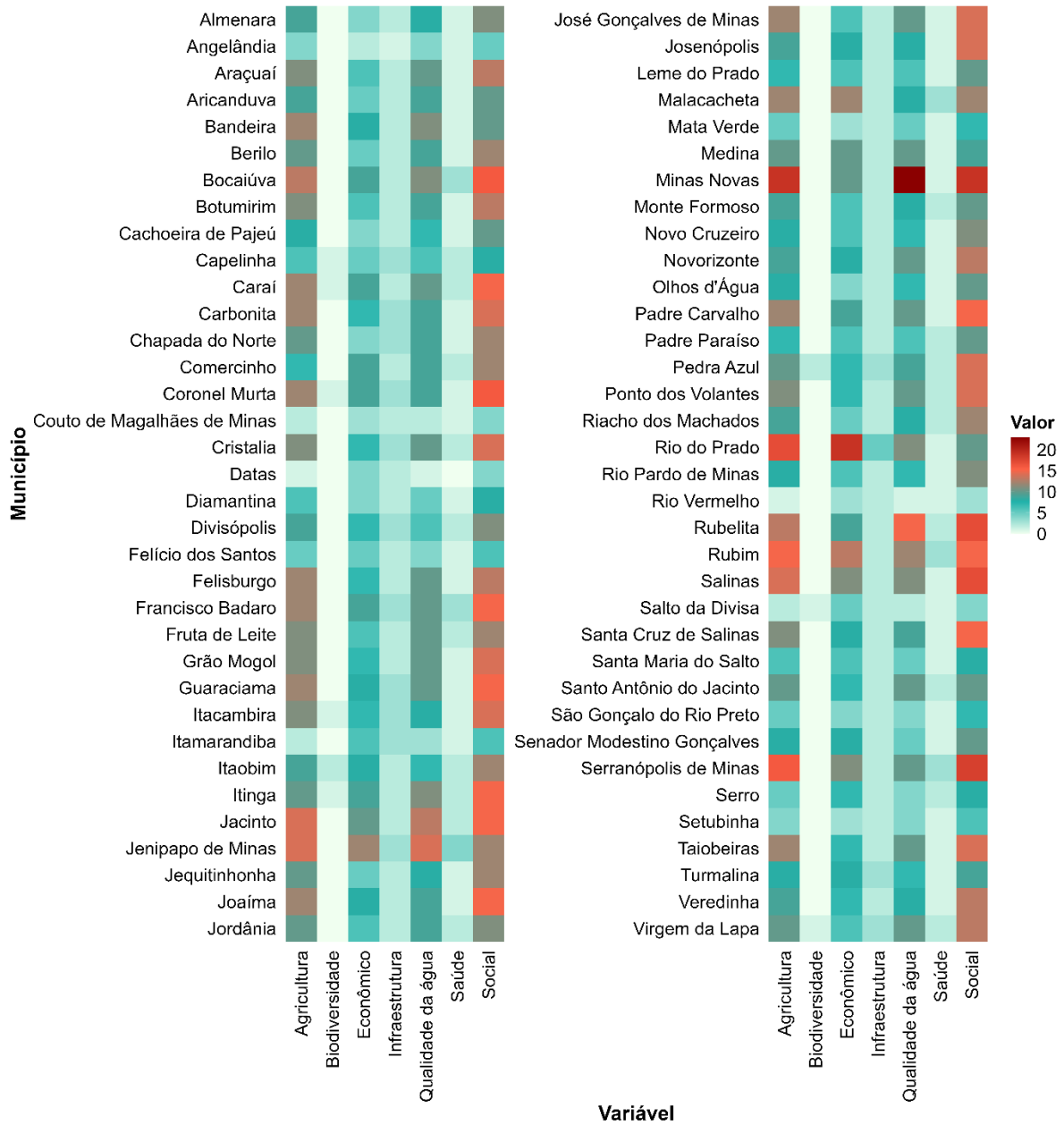
Dessa forma, a escolha do período de acumulação do SPI deve considerar o contexto da análise e os setores afetados. Enquanto escalas curtas são mais eficazes para monitoramento rápido e resposta a impactos imediatos, escalas mais longas são fundamentais para o planejamento e gestão hídrica de maiores prazos. A avaliação desses padrões em diferentes escalas temporais permite compreender melhor a dinâmica da seca na região e pode auxiliar na criação de políticas de mitigação voltadas para os setores mais vulneráveis a secas.

5.4 Impactos da Seca

A análise dos 239 decretos revela que os municípios de Minas Novas (74), Rio do Prado (63), Serranópolis de Minas (60), Rubim (60) e Jenipapo de Minas (59) são os municípios que mais foram impactados por eventos de seca na porção mineira da bacia do rio Jequitinhonha durante os anos de 1999 a 2023, conforme descrito pelo mapa de calor (Figura 16). Esses municípios apresentam uma alta frequência de decretos em diversas categorias, podendo ser evidenciado uma necessidade crítica de políticas públicas e ações de mitigação para reduzir sua vulnerabilidade e melhorar a resiliência frente aos desafios enfrentados na ocorrência das secas.

Em contrapartida, os municípios de Rio Vermelho (11), Datas (12), Couto de Magalhães de Minas (14), Salto da Divisa (17) e Angelândia (17), foram os que menos apresentaram decretos.

Figura 16 – Mapa de calor do quantitativo de decretos referente aos impactos das secas em cada municípios.

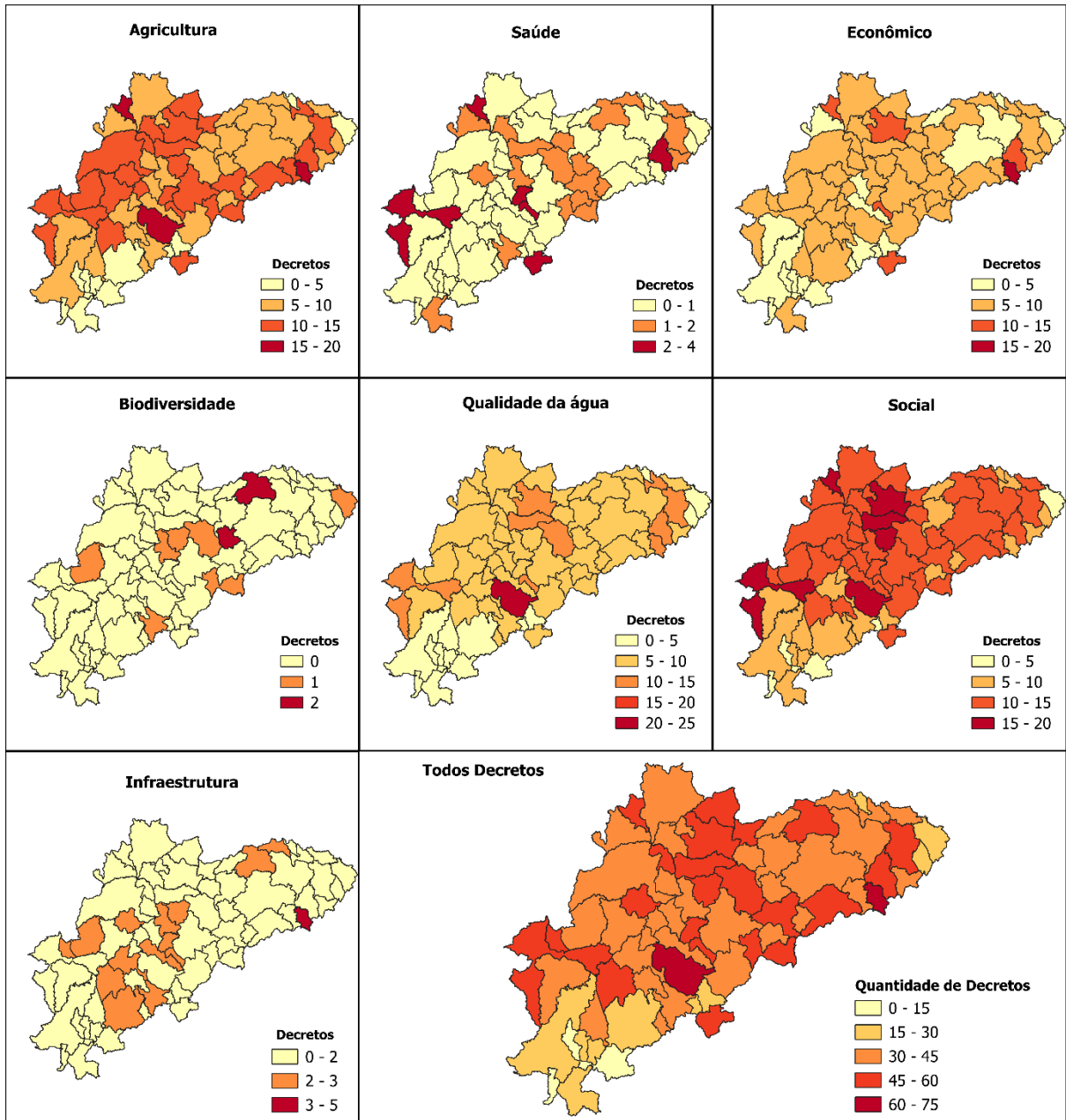


Fonte: Autora (2025).

A agricultura foi uma das categorias mais afetada pela seca, com um total de 176 decretos registrados. Os municípios que mais emitiram decretos foram Minas Novas

(19), Rio do Prado (17), Serranópolis de Minas (16) e Rubim (15), seguidos por Jacinto, Jenipapo de Minas e Salinas, com 14 decretos cada (Figura 17).

Figura 17 - Quantitativo de decretos por município.



Fonte: Autora (2025).

Dentre esses, destaca-se o município de Jacinto, que apresentou risco relativamente alto à seca, considerando o DRI-d para os índices SPI-3, SPI-6 e SPI-9. Jenipapo de Minas registrou um DRI-i relativamente alto para o SPI-9. Em Minas Novas, observou-se DRI-i relativamente alto para o SPI-3 e DRI-m relativamente alto no SPI-12. Rio do

Prado apresentou DRI-m relativamente alto no SPI-3 e DRI-d relativamente alto no SPI-6. Por fim, Rubim destacou-se com DRI-d relativamente alto para o SPI-6.

O setor agrícola, altamente dependente da água para irrigação e produção de alimentos, se mostra extremamente vulnerável durante períodos de seca. O pico de decretos nessa área ocorreu em 2010, com 31 decretos, indicando que a seca na área de estudo foi agravante, afetando diretamente a produtividade rural e a segurança alimentar. A persistência de decretos ao longo dos anos descreve que o impacto ao setor agrícola ainda é recorrente na porção mineira da bacia do Jequitinhonha sendo necessário a adoção de políticas públicas para a mitigação dos efeitos da seca. O estudo de Nobre *et al.* (2016) evidenciam essa vulnerabilidade, indicando que a agricultura é um dos setores mais sensíveis às variações climáticas.

Estudo desenvolvidos pelo mundo descrevem o impacto das secas na agricultura, como o estudo realizado na província do Estado Livre, África do Sul, por Orimoloye (2020), que identificou que a seca ocorrida entre os anos de 2015 e 2018 reduziu a produtividade agrícola em 8,4% e causou uma queda de 15% no rebanho nacional de gado.

A população rural da porção mineira da bacia do rio Jequitinhonha é formada majoritariamente por agricultores familiares produtores de alimentos, que enfrentam grandes desafios durante períodos de seca prolongada. Essa situação compromete significativamente o abastecimento urbano, o autoconsumo e a poupança das famílias rurais (GALIZONI *et al.*, 2024).

Deste modo, a demanda por água para a agricultura é uma questão crítica. A escassez de água na bacia do rio Jequitinhonha afeta mais intensamente as famílias de agricultores em áreas rurais devido às suas práticas produtivas específicas e estilos de vida, impactando na renda dessas famílias e no fornecimento de alimentos para feiras livres, programas institucionais como o Programa de Aquisição de Alimentos (PAA) e Programa Nacional de Alimentação Escolar (PNAE), além de outros mercados locais (NUNES *et al.*, 2024).

Em relação à economia, essa a categoria foi a mais afetada pelos períodos de seca na região de estudo, com um total de 201 decretos registrados. Os impactos econômicos das secas podem ser complexos e multifacetados, afetando desde a agricultura até a infraestrutura básica, como o abastecimento de água e energia (FREIRE-GONZÁLEZ *et al.*, 2017). O município de Rio do Prado liderou em decretos relacionados à economia, totalizando 19, seguido por Rubim, com 13 decretos, e pelos municípios de Jenipapo de Minas e Malacacheta, com 12 decretos cada (Figura 17).

Rio do Prado destacou-se por apresentar DRI-m relativamente alto para o SPI-3 e DRI-d relativamente alto para o SPI-6. Jenipapo de Minas registrou um DRI-i relativamente alto para o SPI-6, enquanto Rubim apresentou um DRI-d relativamente alto também para o SPI-6, reforçando a vulnerabilidade econômica desses municípios em períodos de seca.

Os anos de 2008 e 2010 foram particularmente os anos mais críticos, com 24 decretos cada. A escassez de água afeta negativamente as condições de vida das populações locais que conseqüentemente amplia a vulnerabilidade econômica, particularmente em municípios de economia essencialmente rural (ILO, 2018), caso da bacia do Jequitinhonha, que através de pesquisas indicam que as alterações climáticas têm intensificado as secas na região, afetando a disponibilidade de água e, conseqüentemente, a economia regional (RIBEIRO *et al.*, 2024a).

Além disso, Freire-González *et al.* (2017) destacam que os efeitos das secas podem ser subestimados, especialmente quando se consideram apenas os danos diretos à agricultura. No entanto, ele enfatiza a importância de uma abordagem holística que também leve em conta os custos indiretos, como o aumento do custo de vida e a interrupção de serviços essenciais. Este estudo sugere que uma avaliação mais abrangente dos impactos econômicos das secas deve considerar esses custos indiretos, que muitas vezes são negligenciados nas análises convencionais.

Em 2019, o município de Pedra Azul, presente na área do médio e baixo Jequitinhonha, enfrentou uma crise hídrica que resultou em perdas significativas na agricultura e pecuária, estimadas em quase R\$ 6 milhões (RUBIÃO *et al.*, 2020). Essa

situação evidenciou a vulnerabilidade econômica da região frente a secas e a necessidade de estratégias de gestão sustentável da água.

A área de saúde, embora com menos decretos (32 no total), também sofre com as consequências da seca. O ano de 2010, por exemplo, registrou 6 decretos relacionados à saúde. A relação entre a falta de água e o aumento de problemas de saúde reforça a necessidade de ações emergenciais de saneamento e tratamento de água. O município de Jenipapo de Minas registrou 4 decretos relacionados à saúde, enquanto os municípios de Bocaiúva, Francisco Badaró, Malacacheta, Rubim e Serranópolis de Minas emitiram 3 decretos cada (Figura 17).

Jenipapo de Minas destacou-se com um DRI-i relativamente alto para o SPI-6. Rubim apresentou um DRI-d relativamente alto para o SPI-6, enquanto Malacacheta registrou um DRI-d relativamente alto para o SPI-9. Já Francisco Badaró apresentou DRI-i relativamente alto tanto para o SPI-3 quanto para o SPI-9, indicando maior sensibilidade a diferentes escalas temporais.

A seca no semiárido brasileiro é um fenômeno recorrente e de longa duração. Os impactos nas condições de vida e saúde das pessoas são influenciados por políticas públicas e decisões econômicas e sociais, que podem tanto mitigar quanto agravar a vulnerabilidade das populações e do território. A seca gera efeitos adversos na saúde e no bem-estar humano, difíceis de medir com precisão (SENA, 2017). Ela pode intensificar fatores de risco já conhecidos para a saúde, como a disponibilidade inadequada ou insegura de água para consumo humano e higiene, o aumento no deslocamento de populações e a interrupção dos serviços de saúde locais. Ademais, a seca pode dificultar o acesso a água potável e alimentos, agravando vários indicadores de saúde, como mortalidade infantil pós-parto, peso ao nascer, tempo de gestação, infecções intestinais, desnutrição, infecções respiratórias e malformações congênitas (SENA, 2017; SILVA, 2022).

O impacto das secas na saúde humana ainda não é estudado e talvez não estejamos adequadamente preparados para lidar com suas consequências de curto e longo prazo, dado que a disponibilidade de água é atualmente tida como garantida em

países ocidentais e industrializados, sendo considerada um problema para os níveis de "Terceiro Mundo" (BIFULCO e RANIERI, 2017).

Em áreas onde a rede de abastecimento de água é ausente na bacia do rio Jequitinhonha, as pessoas recorrem a alternativas, como poços artesianos, bicas e minas (ARSAE, 2023), o que aumenta significativamente o risco de contaminação por doenças relacionadas à água. Embora não haja estudos específicos que estabeleçam uma relação direta entre secas e o aumento de doenças transmitidas pela água na bacia do rio Jequitinhonha, é plausível que a escassez hídrica contribua para práticas inadequadas de armazenamento e consumo de água, como relatado por Orrico (2003), em sua pesquisa sobre seis comunidades do semiárido baiano, a coleta, o transporte e o armazenamento de água eram frequentemente realizados em baldes, que, na maioria das vezes, ficavam localizados em frente às residências, em áreas externas e descobertas. Esse método inadequado de armazenamento aumentava o risco de doenças associadas à água.

Ressalta-se que, as consequências diretas e indiretas da seca na saúde humana dependem, obviamente, da duração e da gravidade das condições de seca, assim como do tecido econômico e social do país e sua disponibilidade de recursos (STANKE *et al.*, 2013).

A biodiversidade teve impactos mais moderados, com apenas 11 decretos registrados tendo o ano de 2008 como destaque com 4 decretos, mas não havendo mais emissão de decretos deste o ano de 2010. Os municípios de Itaobim e Pedra Azul foram os municípios com maiores decretos relacionados a biodiversidade, totalizando 2 para cada. Pedra Azul apresentou DRI-i relativamente alto para o SPI-12. Ressalta-se que 61 municípios não apresentaram nenhum decreto desta naturalidade (Figura 17).

É válido ressaltar que a redução da biodiversidade compromete a capacidade dos ecossistemas de fornecer serviços essenciais, como a regulação do clima e a purificação da água (FAO, 2020; CLIMATE ACTION NETWORK, 2021). Em regiões onde ocorrem secas extremas, foi verificada reduções na produtividade primária, podendo chegar a 35% em média, impactando tanto a flora quanto a fauna que dependem desses ecossistemas para sua sobrevivência (SMITH *et al.*, 2024).

A qualidade da água foi o quarto impacto mais afetado com 125 decretos registrados, caracterizando os anos de 2013 e 2017 com os maiores emissores de decretos, sendo 13 cada. Os municípios que mais emitiram decretos referente a qualidade de água conforme apresentado na Figura 17, foram Minas Novas (19), Rubelita (15), Jenipapo de Minas (14) e Jacinto (13).

Minas Novas apresentou DRI-i relativamente alto para o SPI-3 e DRI-m relativamente alto para o SPI-12. Rubelita registrou DRI-i relativamente alto para o SPI-3. Jacinto destacou-se com DRI-d relativamente alto para o SPI-3, SPI-6 e SPI-9. Por fim, Jenipapo de Minas apresentou DRI-i relativamente alto para o SPI-6.

A qualidade da água torna-se ainda mais crítica em períodos de seca prolongada, levando ao aumento das doenças associadas à água contaminada (SOUSA *et al.*, 2021). Brasil *et al.* (2015) estudaram características físicas, químicas e comunidades de plâncton em 40 lagos artificiais no semiárido brasileiro durante o final das estações de chuva e seca. Eles descobriram que a diminuição do nível da água aumenta o risco de salinização e piora a falta de oxigênio, o que agrava a eutrofização e aumenta as florações de cianobactérias, especialmente as que podem fixar N₂. A seca, devido à falta de chuva em períodos normalmente chuvosos, reduz o nível da água, concentra os nutrientes e aumenta os valores de condutividade elétrica (BRASIL *et al.*, 2015; FIGUEIREDO E BECKER, 2018).

Em estudo recente desenvolvido por Melo e Ferreira (2022), foram analisados os dados referentes aos parâmetros qualitativos das águas da porção mineira da bacia do rio Jequitinhonha, por meio dos dados oficiais de monitoramento do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) entre os anos de 2014 e 2021. De modo geral, a qualidade da água na bacia foi considerada boa. No entanto, houve algumas áreas onde a qualidade foi classificada como média devido a episódios de poluição e outras variações.

A infraestrutura também foi impactada pela seca, com 19 decretos registrados ao longo dos anos, ressalta-se que os decretos destes impactos são pontuais não sendo corriqueiros como é o caso da agricultura e da economia. Em 2010, o número de decretos nessa área atingiu o pico, com 7 decretos indicando uma fragilidade neste

setor. O município de Rio do Prado se destaca por ter registrado 5 decretos (Figura 17), apresentando risco relativamente alto para o DRI-m considerando o SPI-3 e risco relativamente alto para o DRI-d no SPI-6.

No Brasil, as secas representam uma ameaça crescente para as infraestruturas de saneamento, incluindo as Estações de Tratamento de Água (ETAs). Quando prolongadas, podem reduzir os volumes de captação e prejudicar a qualidade da água fornecida às estações, o que resulta em um aumento nos custos operacionais. As áreas com menor quantidade de ETAs ou com sistemas de tratamento já em capacidade máxima enfrentam riscos ainda mais elevados, devido à escassez de alternativas para redistribuir a carga ou garantir o fornecimento adequado de água (WAYCARBON, 2024).

Foram realizados entre as décadas de 1990 e 2000, conforme apresentado por De Nys *et al.* (2016), investimentos significativos em infraestrutura hídrica na região do Nordeste do Brasil, vistos como uma resposta aos impactos das secas recorrentes. Contudo, a seca prolongada entre os anos de 2012-2015, considerada a mais severa dos últimos 80 anos, revelou que, apesar de décadas de soluções estruturais, essas iniciativas, embora necessárias, se mostraram insuficientes para enfrentar uma sequência de anos com precipitações abaixo da média.

Esse cenário evidencia a urgência de promover uma reflexão mais abrangente sobre as políticas públicas no Brasil, pois a fragilidade do sistema não se limita a questões de infraestrutura, mas também à gestão das secas e seus impactos no curto, médio e longo prazo (DE NYS *et al.*, 2016).

Os aspectos sociais também foram bastante afetados pela seca, com 181 decretos registrados ao longo do período analisado. O ano de 2008, novamente, registrou o maior número de decretos sociais, com 24 decretos. O município de Minas Novas registrou o maior número de decretos, com 19, seguido por Serranópolis de Minas com 18 decretos. Rubelita e Salinas apresentaram 17 decretos cada, e Bocaiúva e Coronel Murta com 16 decretos cada (Figura 17). Minas Novas destacou-se com DRI-i relativamente alto para o SPI-3 e DRI-m relativamente alto para o SPI-12. Rubelita

apresentou DRI-m relativamente alto para o SPI-3, enquanto Coronel Murta registrou DRI-i relativamente alto para o SPI-6.

A falta de água potável, a perda de empregos no setor agrícola e a deterioração das condições de vida resultantes pelas secas geram uma série de desafios sociais aumentando a vulnerabilidades da região em eventos extremos como as secas.

No Brasil, a trajetória das secas é caracterizada por contínuas tragédias sociais e sanitárias (ALPINO *et al.*, 2016). Entre o início do século XIX e o final do século XX, estima-se que cerca de 3 milhões de pessoas perderam a vida devido a esses eventos. Entre 1991 e 2010, foram registrados quase 32 mil episódios de seca, afetando mais de 96 milhões de pessoas.

As populações consideradas de maior vulnerabilidade na região semiárida frente aos impactos associados à seca incluem pessoas de baixa renda, com menores níveis educacionais e socioeconômicos, pessoas que sobrevivem de agricultura de subsistência, crianças, gestantes e idosos (SENA, 2017).

De um modo geral, os anos de 2008 e 2010 foram os anos em que mais foram emitidos decretos relacionados aos impactos e o ano de 2000 foi o único a não ter decretos. No entanto, durante o período dos decretos analisados foi identificada uma condição de seca severa entre os anos de 2012 a 2016 na bacia do rio Jequitinhonha, em Minas Gerais. Silva *et al.* (2020b) demonstrou através de entrevistas com agências públicas e agricultores de quatro municípios, que esse período de seca mobilizou diversas agências públicas no fornecimento de água, empregando técnicas com custos e eficácia variados. No entanto, as maiores despesas continuaram a ser com o atendimento emergencial mediado pelo poder local. O estudo destaca que o custo médio de fornecimento de água para um habitante na zona rural do semiárido do Jequitinhonha durante os anos de seca era de R\$ 118,95 por pessoa/ano, superando o custo do abastecimento urbano em Minas Gerais.

A análise dos índices de SPI obtidos para este estudo (APÊNDICE F ao APÊNDICE I) nas diversas escalas temporais ao longo do período (1999 a 2023), onde foram levantados os decretos revela que alguns eventos se destacam por apresentarem

altas magnitudes. A maioria dos municípios ao considerar o SPI-3 (APÊNDICE F), apresentaram eventos de seca, embora de curta duração, mas com grandes magnitudes, especialmente nos períodos de 2005 a 2010 e de 2015 a 2020.

Ao ampliar a escala temporal para o SPI-6 (APÊNDICE G), em que os eventos de seca demonstram uma duração mais prolongada em comparação ao SPI-3, esses mesmos períodos (2005-2010 e 2015-2020) continuam a ser os de maior relevância. Essa tendência se mantém também para o SPI-9 (APÊNDICE H) e SPI-12 (APÊNDICE I), nos quais se destaca um evento de grande magnitude entre 2005 e 2010. No entanto, a predominância dos eventos de seca ocorre entre 2010 e 2020, com durações mais longas e magnitudes mais intensas.

É importante ressaltar que, entre 1999 e 2005, embora também tenham ocorrido eventos de secas, esses não alcançaram a mesma magnitude ou duração dos períodos de maior destaque (2005-2010 e 2015-2020). Essa avaliação corrobora a justificativa para o aumento dos decretos entre 2008 e 2010, período marcado por secas significativas. Além disso, os resultados confirmam estudos anteriores que apontaram a ocorrência de uma seca severa entre 2012 e 2016.

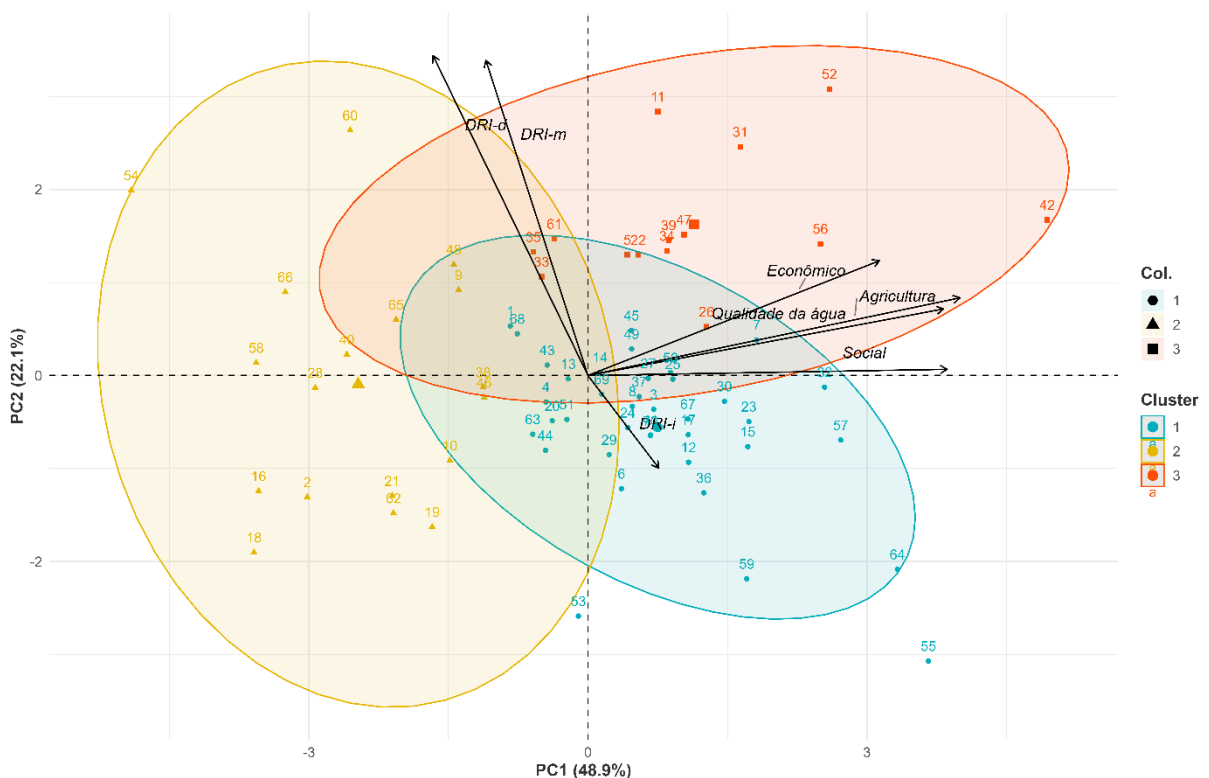
O presente levantamento contempla apenas os decretos levantados em sites oficiais das prefeituras dos municípios, portanto apenas àqueles disponíveis em veículo eletrônico foram acessados. Além disso, decretos anteriores à 1999 não foram encontrados. Por sua vez, não apenas decretos, mas outras fontes de informações são essenciais para a catalogação de impactos relacionados às secas (e.g., notícias veiculadas em jornais; SODOGE *et al.*, 2023), uma vez que muitos impactos ocorridos na bacia do rio Jequitinhonha podem não ter sido motivos de publicação de decretos, principalmente nos anos anteriores a 1999. Tais constatações indicam que a base de dados construída pode conter algum viés e, portanto, estudos futuros devem buscar outras fontes de informação para complementação (CARVALHO *et al.*, 2024; DE BRITO *et al.*, 2020). Todavia, os impactos levantados são ferramenta crucial para validação dos índices de secas propostos, bem como para subsidiar os tomadores de decisão com relação aos principais impactos observados na bacia.

5.5 Análises Multivariada

Para a análise de componentes principais, apenas os impactos relacionados à Agricultura, Econômico, Qualidade da Água e Social foram considerados, uma vez que os demais apresentaram baixa frequência de ocorrência, podendo impactar as análises de correlação.

Considerando o SPI-3 (Figura 18), duas componentes principais foram capazes de explicar 71% da variabilidade dos dados. Na PC1, as variáveis relacionadas aos impactos na Agricultura, Economia, Qualidade da água, e Social, indicam que essas variáveis têm uma elevada correlação positiva. Na PC2, o DRI-d e o DRI-m (risco à seca associado à duração e a magnitude, respectivamente) se destacam com valores positivos altos, enquanto o DRI-i (risco à seca associado à duração intensidade) apresenta um valor negativo, indicando uma correlação inversa com DRI-d e DRI-m.

Figura 18 - Gráfico do tipo PCA (Análise de Componentes Principais) – SPI-3.

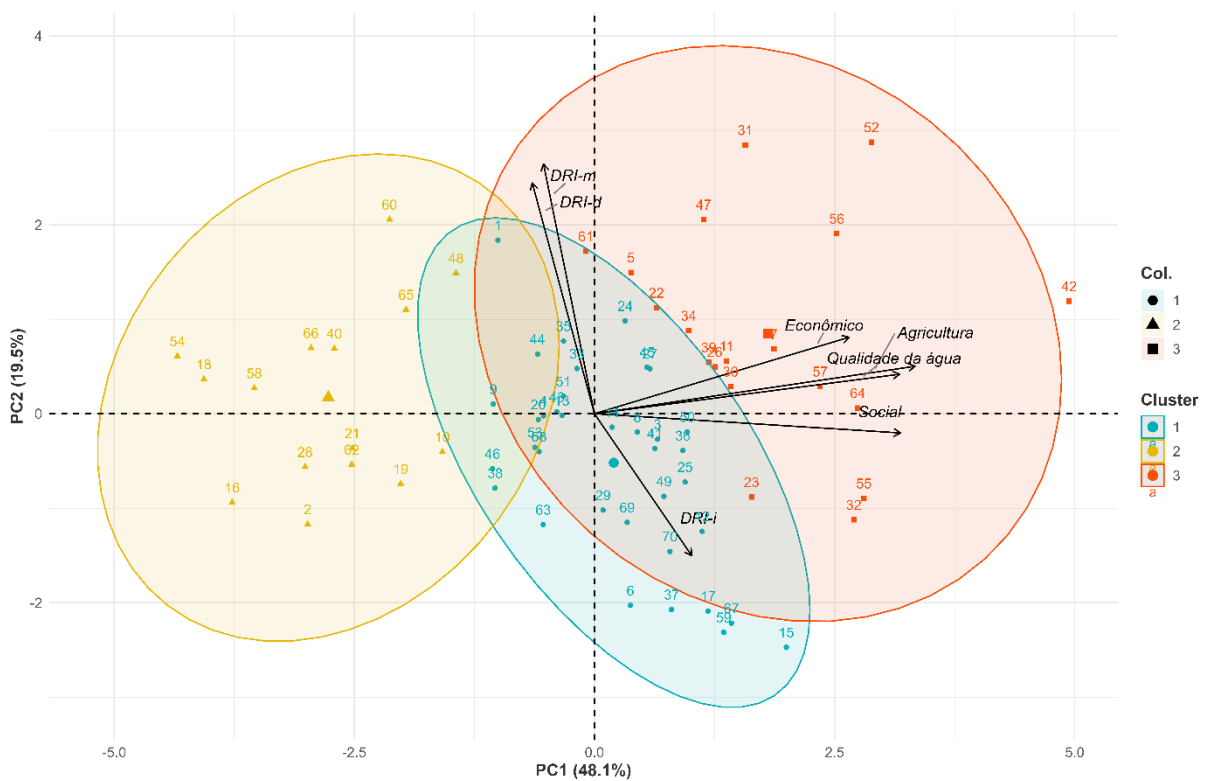


1-Almenara 2-Angelandia 3-Aracui 4-Aricanduva 5-Bandeira 6-Berilo 7-Bocaiuva 8-Botumirim 9-Cachoeira de Pajeú 10-Capelinha 11-Caraí 12- Carbonita 13- Chapada do Norte 14- Comercinho 15- Coronel Murta 16- Couto de Magalhães de Minas 17-Cristalia 18-Datas 19-Diamantina 20-Divisópolis 21- Felício dos Santos 22- Felisburgo 23- Francisco Badaró 24-Fruta de Leite 25-Grão Mogol 26-Guaraciama 27-Itacambira 28-Itamarandiba 29-Itaobim 30-Itinga 31-Jacinto 32-Jenipapo de Minas 33-Jequitinhonha 34-Joaíma 35-Jordânia 36-José Gonçalves de Minas 37-Josenópolis 38-Leme do Prado 39-Malacacheta 40-Mata Verde 41-Medina 42-Minas Novas 43-Monte Formoso 44-Novo Cruzeiro 45-Novorizonte 46-Olhos d'água 47-Padre Carvalho 48-Padre Paraíso 49-Pedra Azul 50-Ponto dos Volantes 51-Riacho dos Machados 52-Rio do Prado 53-Rio Pardo de Minas 54-Rio Vermelho 55-Rubelita 56-Rubim 57-Salinas 58-Salto da Divisa 59-Santa Cruz de Salinas 60-Santa Maria do Salto 61-Santo Antônio do Jacinto 62-São Gonçalo do Rio Preto 63-Senador Modestino 64-Serranópolis de Minas 65-Serro 66-Setubinha 67-Taiobeiras 68-Turmalina 69-Veredinha 70-Virgem da Lapa.

Fonte: Autora (2025).

No SPI-6 (Figura 19), as duas componentes principais foram capazes de explicar 67,60% da variabilidade dos dados, no qual, verifica-se que no PC1, os impactos Agricultura, Econômico, Qualidade da água e Social estão altamente correlacionadas entre si e são responsáveis por uma parte significativa da variação no conjunto de dados. Na PC2, o DRI-m e o DRI-d indicam uma correlação fortemente associada a essa dimensão. Já o DRI-i apresentam um valor negativo expressivo, indicando uma correlação oposta com os outros impactos nessa dimensão.

Figura 19 - Gráfico do tipo PCA (Análise de Componentes Principais) – SPI6.



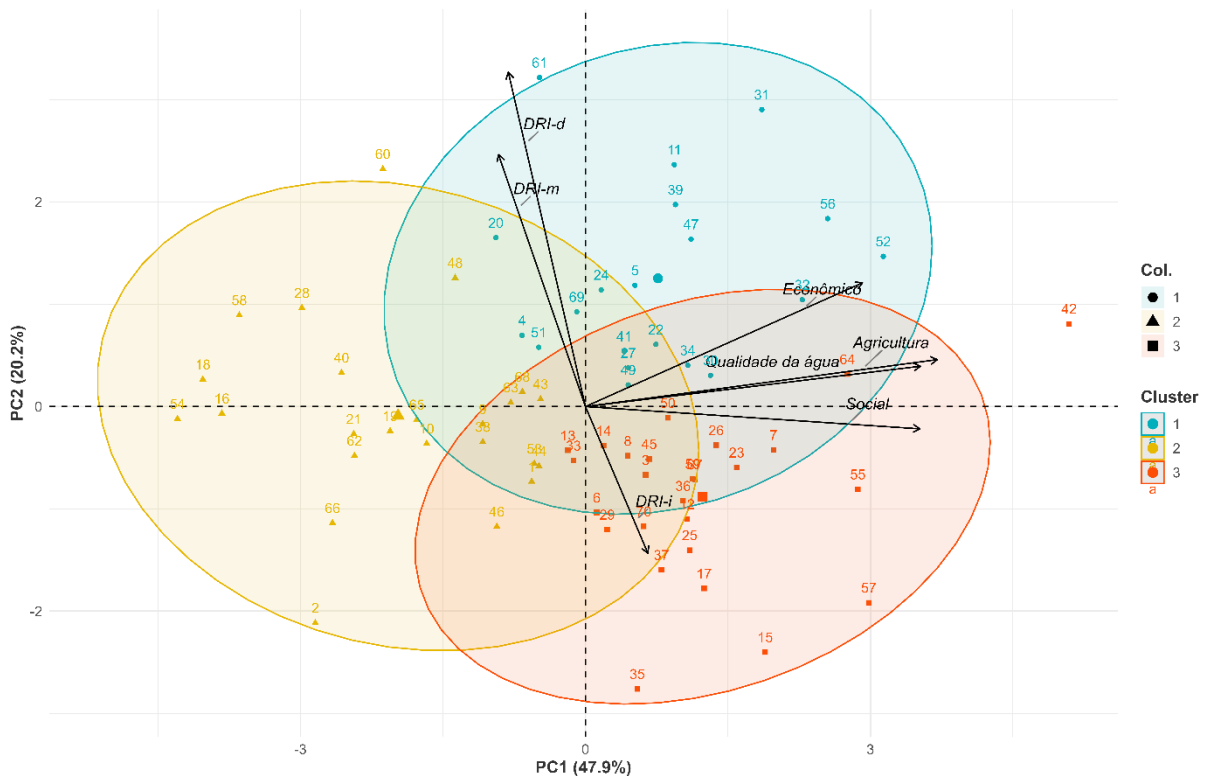
1-Almenara 2-Angelandia 3-Aracuai 4-Aricanduva 5-Bandeira 6-Berilo 7-Bocaiuva 8-Botumirim 9-Cachoeira de Pajeú 10-Capelinha 11-Caraí 12- Carbonita 13- Chapada do Norte 14- Comercinho 15- Coronel Murta 16- Couto de Magalhaes de Minas 17-Cristalia 18-Datas 19-Diamantina 20-Divisópolis 21- Felício dos Santos 22- Felisburgo 23-Francisco Badaró 24-Fruta de Leite 25-Grão Mogol 26-Guaraciama 27-Itacambira 28-Itamarandiba 29-Itaobim 30-Itinga 31-Jacinto 32-Jenipapo de Minas 33-Jequitinhonha 34-Joaima 35-Jordânia 36-José Gonçalves de Minas 37-Josenópolis 38-Leme do Prado 39-Malacacheta 40-Mata Verde 41-Medina 42-Minas Novas 43-Monte Formoso 44-Novo Cruzeiro 45-Novorizonte 46-Olhos d'água 47-Padre Carvalho 48-Padre Paraíso 49-Pedra Azul 50-Ponto dos Volantes 51-Riacho dos Machados 52-Rio do Prado 53-Rio Pardo de Minas 54-Rio Vermelho 55-Rubelita 56-Rubim 57-Salinas 58-Salto da Divisa 59-Santa Cruz de Salinas 60-Santa Maria do Salto 61-Santo Antônio do Jacinto 62-São Gonçalo do Rio Preto 63-Senador Modestino 64-Serranópolis de Minas 65-Serro 66-Setubinha 67-Taiobeiras 68-Turmalina 69-Veredinha 70-Virgem da Lapa.

Fonte: Autora (2025).

Assim como o SPI-6, as duas componentes principais do SPI-9 foram capazes de explicar 68,10% da variabilidade dos dados (Figura 20), a PC1 apresenta valores positivos para os impactos Agricultura, Econômico, Qualidade da água e Social, sugerindo que essas variáveis estão fortemente correlacionadas entre si e representam uma parte significativa da variação no conjunto de dados. Por outro lado,

a segunda componente principal (PC2) revela uma correlação forte e significativa dos DRI-d e DRI-m, enquanto a DRI-i tem uma correlação negativa, sem grandes associações com as outras variáveis.

Figura 20 - Gráfico do tipo PCA (Análise de Componentes Principais) – SPI-9.

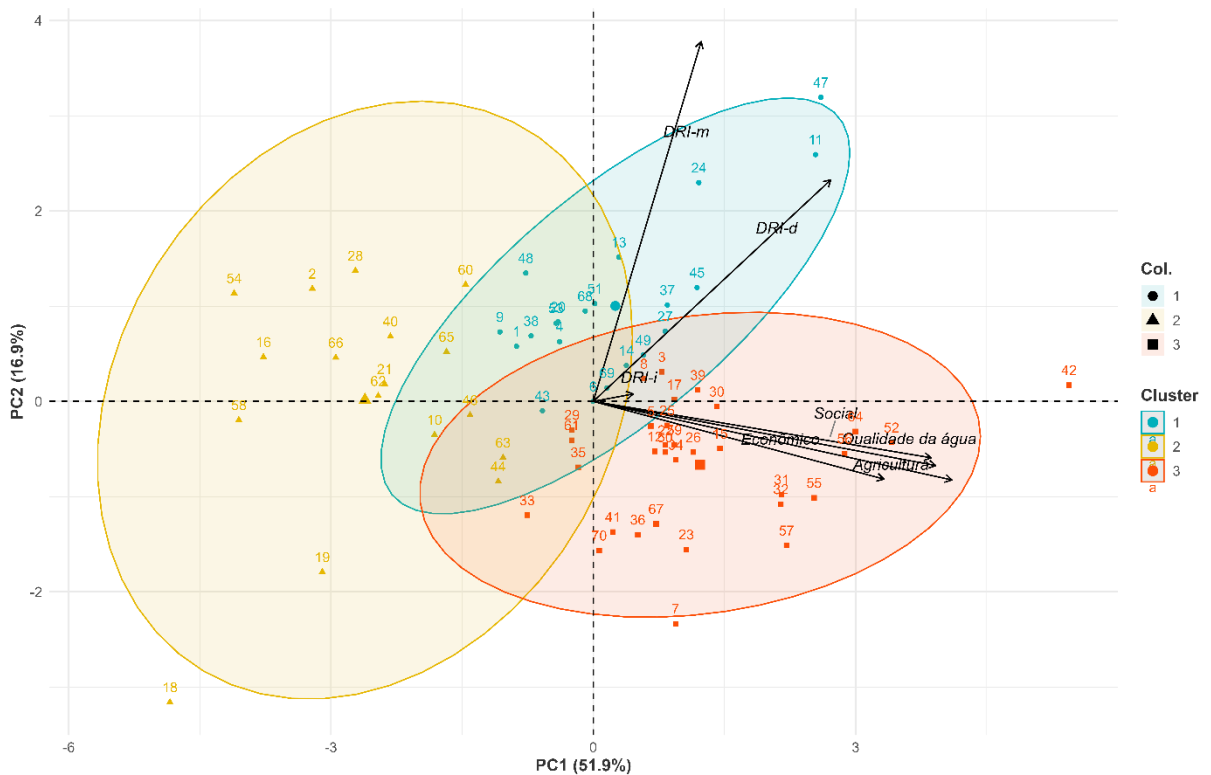


1-Almenara 2-Angelandia 3-Aracui 4-Aricanduva 5-Bandeira 6-Berilo 7-Bocaiuva 8-Botumirim 9-Cachoeira de Pajeú 10-Capelinha 11-Caraí 12- Carbonita 13- Chapada do Norte 14- Comercinho 15- Coronel Murta 16- Couto de Magalhaes de Minas 17-Cristalia 18-Datas 19-Diamantina 20-Divisópolis 21- Felício dos Santos 22- Felisburgo 23- Francisco Badaró 24-Fruta de Leite 25-Grão Mogol 26-Guaraciama 27-Itacambira 28-Itamarandiba 29-Itaobim 30-Itinga 31-Jacinto 32-Jenipapo de Minas 33-Jequitinhonha 34-Joaíma 35-Jordânia 36-José Gonçalves de Minas 37-Josenópolis 38-Leme do Prado 39-Malacacheta 40-Mata Verde 41-Medina 42-Minas Novas 43-Monte Formoso 44-Novo Cruzeiro 45-Novorizonte 46-Olhos d'água 47-Padre Carvalho 48-Padre Paraíso 49-Pedra Azul 50-Ponto dos Volantes 51-Riacho dos Machados 52-Rio do Prado 53-Rio Pardo de Minas 54-Rio Vermelho 55-Rubelita 56-Rubim 57-Salinas 58-Salto da Divisa 59-Santa Cruz de Salinas 60-Santa Maria do Salto 61-Santo Antônio do Jacinto 62-São Gonçalo do Rio Preto 63-Senador Modestino 64-Serranópolis de Minas 65-Serro 66-Setubinha 67-Taiobeiras 68-Turmalina 69-Veredinha 70-Virgem da Lapa.

Fonte: Autora (2025).

No SPI-12 (Figura 21), as duas componentes principais foram capazes de explicar 68,80% da variabilidade dos dados, a PC1 tem valores significativos para os impactos na Agricultura, Econômico, Qualidade da água e Social, indicando que estas variáveis estão fortemente correlacionadas e representam uma grande parte da variação observada nos dados. Na PC2, o DRI-m e o DRI-d possuem valores positivos significativos, refletindo uma correlação inversa com os outros impactos na segunda componente.

Figura 21 - Gráfico do tipo PCA (Análise de Componentes Principais) – SPI-12.



1-Almenara 2-Angelândia 3-Aracui 4-Aricanduva 5-Bandeira 6-Berilo 7-Bocaiuva 8-Botumirim 9-Cachoeira de Pajeú 10-Capelinha 11-Caraí 12- Carbonita 13- Chapada do Norte 14- Comercinho 15- Coronel Murta 16- Couto de Magalhães de Minas 17-Cristalia 18-Datas 19-Diamantina 20-Divisópolis 21- Felício dos Santos 22- Felisburgo 23- Francisco Badaró 24-Fruta de Leite 25-Grão Mogol 26-Guaraciama 27-Itacambira 28-Itamarandiba 29-Itaobim 30-Itinga 31-Jacinto 32-Jenipapo de Minas 33-Jequitinhonha 34-Joáima 35-Jordânia 36-José Gonçalves de Minas 37-Josenópolis 38-Leme do Prado 39-Malacacheta 40-Mata Verde 41-Medina 42-Minas Novas 43-Monte Formoso 44-Novo Cruzeiro 45-Novorizonte 46-Olhos d'água 47-Padre Carvalho 48-Padre Paraíso 49-Pedra Azul 50-Ponto dos Volantes 51-Riacho dos Machados 52-Rio do Prado 53-Rio Pardo de Minas 54-Rio Vermelho 55-Rubelita 56-Rubim 57-Salinas 58-Salto da Divisa 59-Santa Cruz de Salinas 60-Santa Maria do Salto 61-Santo Antônio do Jacinto 62-São Gonçalo do Rio Preto 63-Senador Modestino 64-Serranópolis de Minas 65-Serro 66-Setubinha 67-Taiobeiras 68-Turmalina 69-Veredinha 70-Virgem da Lapa.

Fonte: Autora (2025).

Em resumo, a análise das componentes principais ao longo de diferentes períodos do SPI demonstra a correlação positiva e alta entre os impactos na Agricultura, Economia, Qualidade da água e Social com a PC1 indicando que, na maioria das vezes, esses impactos ocorrem simultaneamente nos municípios, i.e., eventos de seca causam múltiplos impactos na bacia do rio Jequitinhonha.

A DRI-d e a DRI-m apresentam correlação inversa com a DRI-i, especialmente na PC2. Nos períodos de curta a média duração (SPI-3 a SPI-9), observa-se uma correlação positiva entre a DRI-d e a DRI-m, enquanto a DRI-i exibe correlação negativa. Esse fenômeno pode ser observado em estudos como de Abu Arra e Şişman (2023), que utilizam a análise de curvas de intensidade-duração-frequência (IDF) para entender as características das secas, mostrando que a intensidade das secas pode ser mais crítica em períodos curtos, enquanto a duração se torna um fator mais determinante em períodos mais longos.

Ao empregar a Análise de Componentes Principais (PCA), busca-se avaliar a proporção da variância explicada por cada componente principal (PC). Cada PC é construída como uma combinação linear das variáveis originais, com o objetivo de capturar o máximo possível da variabilidade presente nos dados. Nos gráficos de PCA apresentados, verifica-se que as duas primeiras componentes principais explicam conjuntamente cerca de 68% a 71% da variância total. Esse resultado indica que essas duas componentes concentram uma parcela significativa da informação contida no conjunto de dados original, sendo, portanto, essenciais para a identificação dos padrões mais relevantes.

Contudo, o fato de aproximadamente 30% da variância ainda estar distribuída entre as demais componentes revela que uma parte da estrutura dos dados não é plenamente representada apenas pelas duas primeiras PCs. Segundo Johnson e Wichern (1998), é comum considerar desejável que as primeiras componentes expliquem entre 70% e 80% da variância total para que a análise seja considerada satisfatória. Assim, pode ser necessário incorporar mais componentes à interpretação, com o intuito de capturar uma proporção mais abrangente da variabilidade dos dados.

Vale destacar que, inicialmente, foram incluídas na análise todas as sete categorias de impacto. No entanto, observou-se que, com a presença dos impactos Saúde, Infraestrutura e Biodiversidade, a soma das variâncias explicadas pelas duas primeiras componentes permanecia inferior a 52%. Após a exclusão dessas categorias, houve um aumento expressivo na variância explicada, indicando uma melhoria na capacidade da PCA em representar os padrões dos dados. Essa decisão foi motivada pelo fato de esses impactos estarem associados a um número muito reduzido de decretos, e, em muitos municípios, sequer apresentarem registros, o que gerava grande dispersão na matriz de dados.

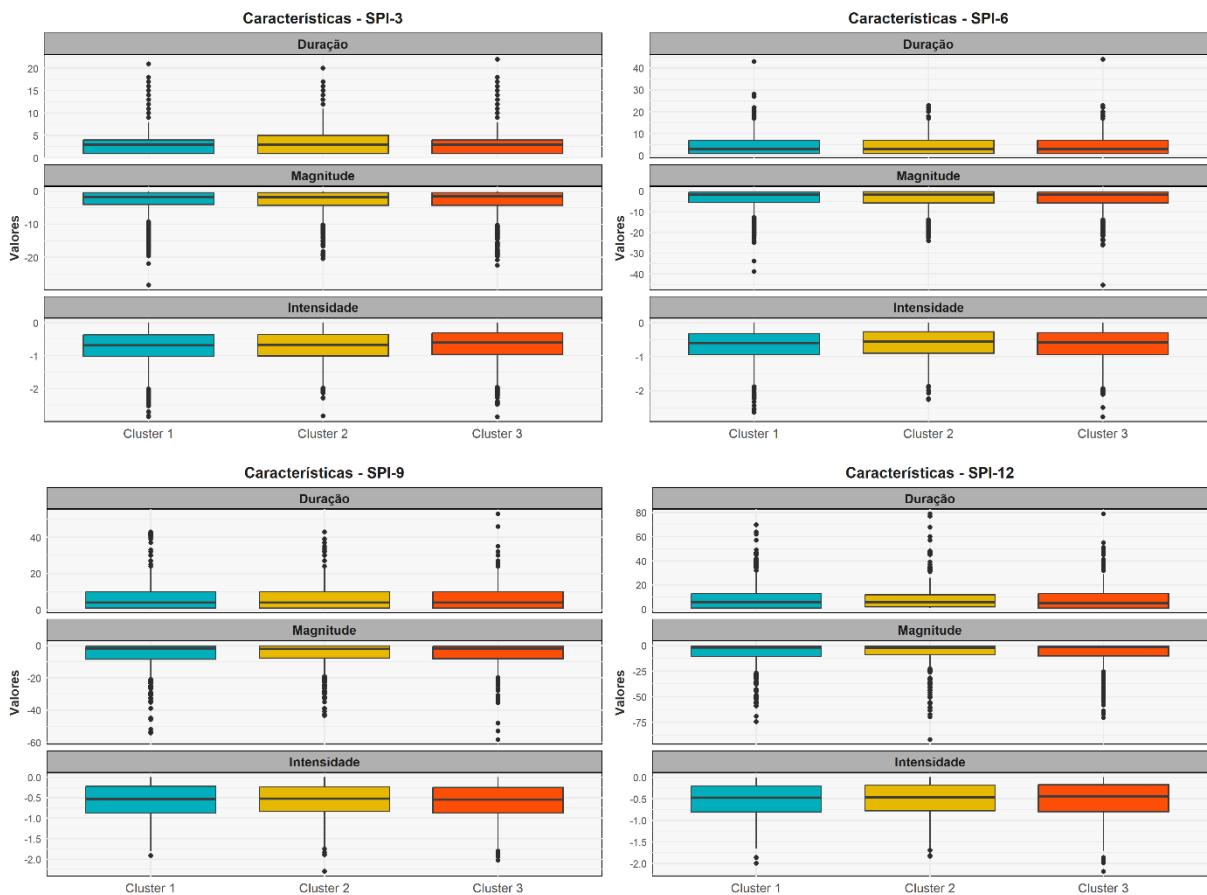
Uma limitação importante da análise por componentes principais (PCA) é que ela considera apenas relações lineares entre as variáveis. No entanto, é plausível que a relação entre o risco à seca e os impactos observados apresente natureza não linear. Nesse sentido, seria relevante que trabalhos futuros investigassem metodologias capazes de captar tais complexidades, incluindo abordagens baseadas em técnicas

mais avançadas, como aquelas inspiradas em inteligência artificial, com o objetivo de aprimorar a avaliação da efetividade dos índices de seca na identificação de impactos.

5.5.1 Análise do agrupamento de secas e impactos

Através das PCA's foram realizadas uma clusterização, agrupando os municípios em três clusters distintos, com base na similaridade de suas características frente à resiliência e vulnerabilidade às secas. Foi realizado gráfico do tipo boxplot para cada cluster nas diversas escalas temporais estudadas considerando as três características de secas (duração, magnitude e intensidade), conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Boxplot das características de secas agrupadas em clusters por escala temporal.



Fonte: Autora (2025).

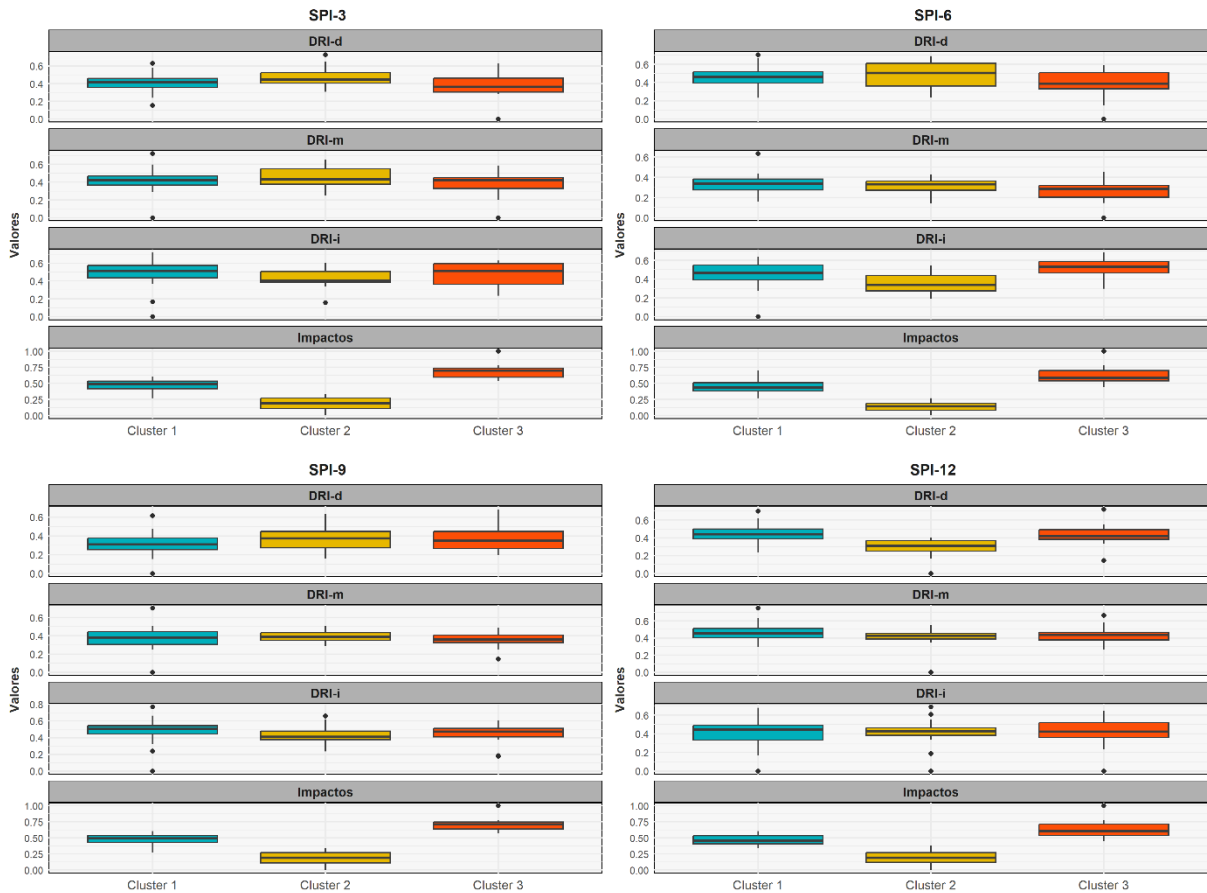
Ao analisar os clusters para todas as escalas temporais, observa-se uma combinação de homogeneidade e de heterogeneidade nas características das secas, variando conforme o período de análise. Em relação às características como a duração e a magnitude das secas, os clusters apresentaram medianas semelhantes em todos os

SPI's, no entanto é observado uma variação do interquartil (IQR), indicando uma significativa variação na duração e na magnitude das secas dentro de cada cluster.

Os outliers são particularmente significativos, principalmente nos clusters 1 e 3, que correspondem aos municípios localizados nas áreas centrais da bacia. Isso sugere que, embora a duração e a magnitude das secas sejam semelhantes entre os municípios, em determinados períodos, esses locais estão mais suscetíveis a eventos de seca mais prolongados e severos. Tal variabilidade pode intensificar os impactos na região, evidenciando que alguns períodos de seca são significativamente mais longos do que outros, mesmo dentro de clusters com padrões gerais semelhantes. Já a intensidade das secas é a característica mais homogênea entre os clusters, com medianas e dispersões mais próximas em todos os SPI's, caracterizando uma relativa consistência na intensidade das secas ao longo dos diferentes clusters. Esse padrão homogêneo evidencia as limitações do uso da intensidade associada ao SPI para a construção de índices de risco, uma vez que a falta de diferenciação entre os valores observados pode comprometer a capacidade de discriminar adequadamente os níveis de risco e impactos relacionados. Tal homogeneidade dificulta a correlação com os impactos da seca, tornando desafiadora a identificação de áreas particularmente vulneráveis e a formulação de estratégias de mitigação eficazes.

Da mesma forma, foi realizado o agrupamento de cada município pertencente aos clusters em gráficos boxplots considerando os riscos de secas (DRI-d, DRI-m e DRI-i) para as diferentes escalas temporais juntamente com os impactados (Figura 23).

Figura 23 - Boxplot dos riscos a secas agrupados em clusters juntamente com os impactos por escala temporal.



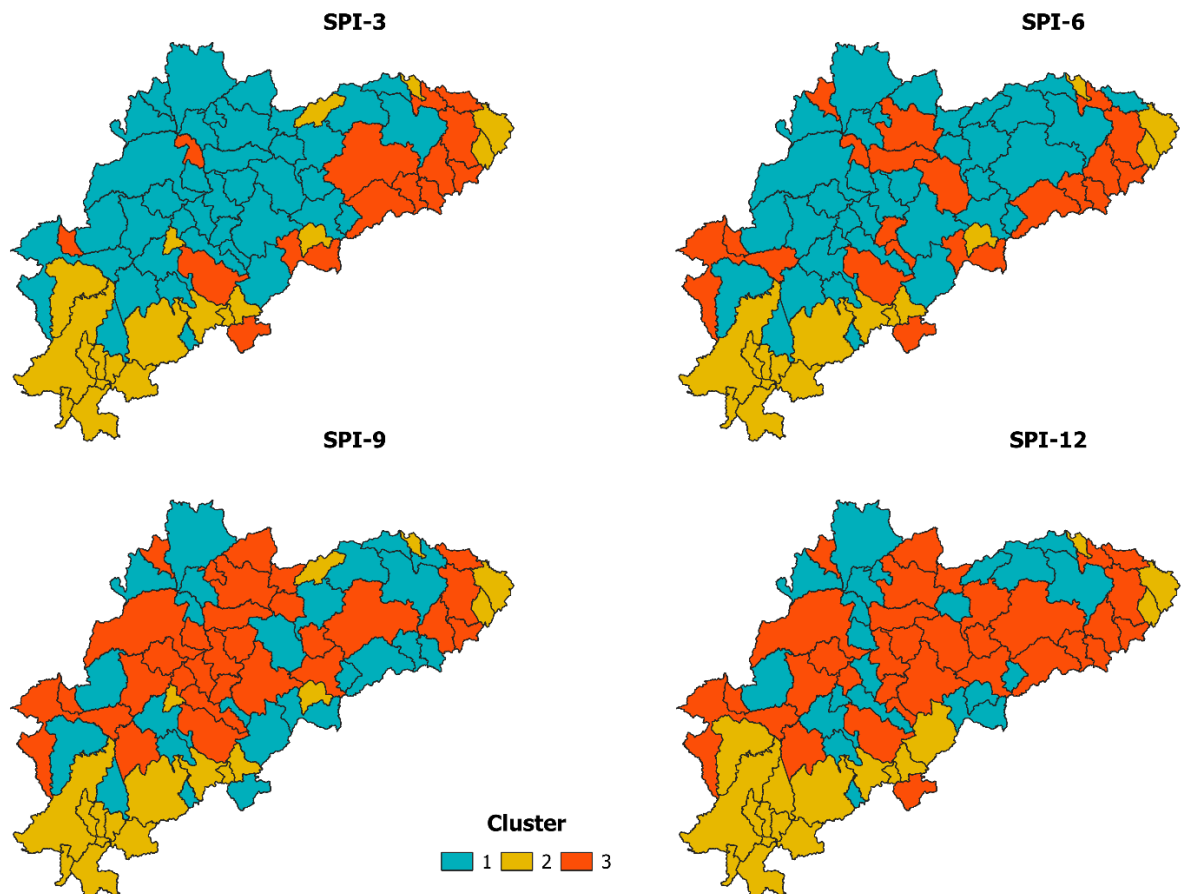
Fonte: Autora (2025).

A análise dos clusters dentro de cada escala temporal (SPI-3, SPI-6, SPI-9 e SPI-12) evidencia uma falta de homogeneidade entre eles, sugerindo que os impactos e riscos associados às secas variam significativamente entre as regiões analisadas. Diferente do que foi observado ao analisar as características das secas. De modo geral, os municípios pertencentes aos Clusters 1 e 3 apresentam valores medianos mais elevados para os indicadores de risco (DRI-d, DRI-m e DRI-i) e impacto, indicando que essas áreas tendem a ser mais afetadas por secas em comparação ao Cluster 2.

O Cluster 2, por sua vez, exibe menores valores medianos de risco, com um intervalo interquartil (IQR) geralmente mais estreito, refletindo uma menor variação dos valores de risco e, portanto, uma maior previsibilidade dos eventos de seca. Entretanto, os impactos nesse cluster apresentam uma dispersão maior, evidenciada pelo IQR mais amplo, indicando que os efeitos das secas podem ser mais variáveis.

De modo a entender o padrão espacial da bacia do rio Jequitinhonha na porção mineira, foi elaborada a Figura 24 em que mostra a predominância de três clusters (azul, amarelo e vermelho) em diferentes escalas temporais do SPI (SPI-3, SPI-6, SPI-9 e SPI-12), destacando padrões espaciais semelhantes, mas com variações sutis.

Figura 24 – Mapa de clusterização dos municípios para diferentes escalas temporais.



Fonte: Autora (2025).

O Cluster 1 é amplamente dominante em quase toda bacia, principalmente para o SPI-3 e SPI-6, cobrindo a maior parte dos municípios, especialmente na região central da bacia. Alguns municípios próximos à nascente da bacia também estão incluídos nesse cluster, mas sua predominância é mais evidente no centro, indicando os municípios que apresentam uma vulnerabilidade intermediária com relação a secas e seus impactos. O Cluster 2 aparece principalmente nos municípios localizados nas áreas periféricas da bacia, com maior concentração na região sul, próxima à nascente, e em algumas partes próximas à foz. Ele é menos frequente nos municípios centrais com destaque para o SPI-12 que apresenta maior coesão espacial. O Cluster 3 se encontra bem espalhado entre os municípios da bacia, com destaque para os municípios que

encontram próximos a região central da bacia. No SPI-3, os municípios aparecem de forma mais fragmentada, mas no SPI-9 e no SPI-12 a distribuição dos municípios se torna mais coesa, evidenciando o estabelecimento do padrão espacial das secas meteorológicas.

Uma justificativa para a clusterização da bacia pode ser encontrada nas características regionais de precipitação. As áreas próximas à nascente e à foz do rio Jequitinhonha, registram os maiores volumes anuais de precipitação (EMBRAPA, 2024), que correspondem às regiões onde os municípios do Cluster 2 estão mais presentes, situados fora da zona semiárida da bacia. Isso sugere que esses municípios tenham uma menor vulnerabilidade à seca, com menor impacto associado a eventos de déficit hídrico. Isso é comprovado pela menor quantidade de impactos destacados no Cluster 2 (Figura 23).

Por outro lado, a região do médio Jequitinhonha, de acordo com Barbosa (Minas Gerais, 1960, apud FERREIRA, 2007), que permanece amplamente protegida das influências marinhas e apresenta locais com até 9 ou 10 meses de ausência ou escassez de chuva, é dominada pelos Clusters 1 e 3. Essa predominância reflete condições climáticas mais homogêneas, porém marcadas por baixos volumes de precipitação, o que caracteriza altos níveis de vulnerabilidade à seca e, conseqüentemente, maior propensão a impactos associados.

Os resultados apresentados indicam que os municípios mais vulneráveis à seca estão predominantemente associados aos clusters 1 e 3, que abrangem as regiões do baixo e médio Jequitinhonha, na zona semiárida da bacia. Entre 2012 e 2016, as secas nessas regiões da bacia impulsionaram a implementação de programas por parte de organizações estatais e da sociedade civil, com o objetivo de empregar técnicas que garantam a perenização do abastecimento hídrico ou que atendam a demandas emergenciais (SILVA *et al.*, 2020b). Vale ressaltar que a efetividade dessas abordagens depende da sinergia entre as tecnologias adotadas, a mobilização das comunidades rurais, o alcance das organizações envolvidas e a disponibilidade de recursos financeiros (DOS SANTOS, 2023; SILVA *et al.*, 2020b). Embora as soluções alternativas para o fornecimento de água sejam eficazes em situações de urgência, elas evidenciam a necessidade de políticas públicas mais abrangentes e eficazes,

capazes de mitigar os impactos das secas de forma estruturada e promover a resiliência hídrica na região.

É importante destacar que este estudo se restringe à análise da seca meteorológica, utilizando o índice de precipitação padronizado (SPI) como principal ferramenta. Embora o SPI seja amplamente utilizado e facilite o cálculo do risco à seca, ele não contempla outras variáveis que podem influenciar as secas, como temperatura, evapotranspiração, velocidade do vento, capacidade de retenção de água do solo e umidade do solo, baseando-se apenas em dados de precipitação (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2010).

Embora diversos estudos apontem a precipitação como a principal variável determinante da duração, magnitude e intensidade das secas (OLADIPO, 1985; CHANG e CLEOPA, 1991), há evidências de que o aumento da temperatura intensifica a magnitude das secas, principalmente devido ao incremento da demanda evapotranspirativa e à consequente redução da umidade do solo (TRENBERTH *et al.*, 2014; WILLIAMS *et al.*, 2020; MARENGO *et al.*, 2021). Em determinadas condições, o impacto da evapotranspiração pode ser comparável ao da precipitação na dinâmica das secas (HU e WILLSON, 2000). González-Hidalgo *et al.* (2018) afirmam que a seca está sendo impulsionada por condições de temperatura que afetam a demanda evaporativa atmosférica, independentemente da evolução da precipitação.

Além disso, muitos desses estudos consideram apenas a intensidade das secas, desconsiderando outras características, como sua duração e magnitude, aspectos que, conforme demonstrado neste estudo, são fundamentais para uma avaliação mais precisa dos riscos. A falta de uma abordagem integrada compromete a precisão das previsões de impacto e pode resultar em estratégias inadequadas de gestão (SOUZA FILHO *et al.*, 2022).

Apesar dos avanços na pesquisa e no uso de indicadores de seca, ainda há uma desconexão entre os índices de seca e a avaliação dos impactos ambientais e sociais. Isso ocorre porque a relação entre os indicadores e os impactos da seca ainda carece de estudos mais aprofundados. Como consequência, os dados sobre impactos não

têm sido utilizados de forma eficaz para validar se os indicadores realmente representam os efeitos da seca (TORELLÓ-SENTELLES e FRANZK, 2022).

Diante disso, reduzir os impactos da seca na sociedade e no meio ambiente exige medidas de mitigação mais eficazes (TORELLÓ-SENTELLES e FRANZK, 2022). Assim, é fundamental que estudos futuros realizem testes com novas fontes de informação para caracterizar os impactos da seca, utilizando índices de risco derivados também de dados como evapotranspiração, umidade do solo, vazões e águas subterrâneas, e não apenas de precipitação. Isso permitirá uma avaliação mais abrangente e precisa da vulnerabilidade e possibilitará o desenvolvimento de estratégias de mitigação mais eficazes.

6 CONCLUSÕES

A partir deste trabalho, foi possível avaliar e calcular o risco de seca na porção mineira da bacia do rio Jequitinhonha, considerando três características de seca (duração, magnitude e intensidade) em múltiplas escalas temporais (SPI-3, SPI-6, SPI-9 e SPI-12), utilizando dados de precipitação do produto de sensoriamento remoto MSWEP. A escolha pelo MSWEP foi fundamentada em uma avaliação estatística comparativa entre as precipitações estimadas pelo ERA5 e os dados observados em 31 estações pluviométricas da ANA distribuídas pela área de estudo. Observou-se que o MSWEP apresenta acurácia mais próxima dos dados observacionais, justificando sua adoção. A utilização de produtos de reanálise foi uma alternativa viável para o cálculo do SPI, dado que as séries históricas das estações da ANA não apresentavam mais de 30 anos contínuos e sem falhas.

No que se refere à caracterização das secas, os dados do MSWEP demonstraram boa capacidade em captar as diferentes características desses eventos. Verificou-se que as secas de curto prazo (SPI-3 a SPI-9) ocorrem com maior frequência e tendem a ser menos duradouras e de menor magnitude em comparação às de longo prazo (SPI-12). Entretanto, a intensidade média dos eventos mostrou pouca variação entre as diferentes escalas, diminuindo levemente à medida que a escala temporal aumentava. Isso evidencia a necessidade de estudos que não considerem a intensidade como a única ou principal métrica representativa das secas.

De forma geral, os resultados indicam que o risco de seca apresenta comportamentos distintos entre os municípios da bacia, com variações significativas em função da escala temporal e das características analisadas. A maior parte dos municípios, contudo, enquadra-se nas faixas de risco entre baixo e moderado.

Quanto aos decretos de emergência, observou-se que a seca na região impactou fortemente setores como a agricultura, economia e aspectos sociais, sendo os mais frequentemente citados nos registros dos decretos. Outros setores, como saúde, qualidade da água, biodiversidade e infraestrutura, também foram afetados, ainda que em menor proporção. Anos críticos, como 2008, 2010 e 2016, evidenciam a

recorrência de eventos extremos e reforçam a urgência de políticas públicas voltadas à mitigação de impactos e ao fortalecimento da resiliência regional.

No que diz respeito aos impactos associados às secas, os resultados mostraram que, independentemente da escala temporal analisada, as categorias Agricultura, Economia, Qualidade da Água e Social apresentam alta sensibilidade às condições de seca. Em escalas menores (SPI-3 a SPI-9), essas categorias mostraram correlação direta com o risco associado à intensidade (DRI-i) e correlação inversa com os riscos relacionados à duração (DRI-d) e à magnitude (DRI-m), conforme identificado na PC1. Já em escalas maiores (SPI-12), observou-se uma correlação mais abrangente entre essas categorias e os riscos na PC1, indicando um padrão mais homogêneo de resposta a eventos prolongados de seca.

Dessa forma, conclui-se que a abordagem baseada em impactos é essencial para avaliar a aplicabilidade de diferentes índices, contribuindo para a redução de incertezas e para o aprimoramento das ferramentas de apoio à decisão. As categorias Saúde, Infraestrutura e Biodiversidade foram excluídas das análises de componentes principais (PCA) por apresentarem baixa representatividade nos decretos municipais, com poucos registros ou, em alguns casos, completa ausência de decretos relacionados a esses impactos em diversos municípios. A inclusão dessas categorias resultava em uma variância explicada inferior a 52% nas duas primeiras componentes (PC1 e PC2), comprometendo a qualidade e a interpretabilidade dos resultados. Com sua exclusão, houve um aumento significativo na variância explicada, tornando as análises mais representativas.

Por fim, a análise de cluster permitiu agrupar os municípios em três grupos distintos com base na similaridade de suas características frente à vulnerabilidade às secas. Isso possibilitou observar a distribuição espacial dos municípios mais vulneráveis, bem como aqueles mais impactados pelas secas em diferentes escalas temporais.

7 RECOMENDAÇÕES

Apesar de termos alcançado os objetivos deste trabalho, é importante destacar alguns pontos que precisam ser revisados e aprimorados. Assim, as seguintes recomendações são feitas:

Realizar novos estudos com diferentes valores de limiar para o cálculo do SPI. Neste estudo, considerou-se que o evento de seca teria início quando o SPI fosse igual ou inferior a 0. Não há uma referência específica para a adoção desse limiar. No entanto, ao adotar outros limiares, seria possível realizar comparações e descartar eventos que poderiam não ser considerados secas devido à sua breve duração.

Expandir o estudo, incorporando outros dados, como de evapotranspiração, umidade do solo e vazões para a determinação de índices de risco à seca, além da precipitação. A inclusão de dados de vazão por exemplo, permite uma análise mais completa do impacto da seca em recursos hídricos superficiais e subterrâneos, proporcionando uma visão direta sobre a disponibilidade de água nos rios e em reservatórios. Isso complementa as informações obtidas apenas com a precipitação, uma vez que a precipitação indica a quantidade de chuva sobre a área de estudo, enquanto a vazão revela como essa água é armazenada no sistema hidrológico, impactando a disponibilidade de água para consumo, agricultura e ecossistemas.

Além disso, a base de dados dos impactos apresenta incertezas relacionadas à disponibilidade eletrônica e à cobertura temporal e espacial dos decretos oficiais. Essas limitações podem resultar em uma subnotificação ou distorção da real magnitude dos impactos, dificultando uma avaliação abrangente dos eventos de seca. Nesse sentido, é fundamental que estudos futuros ampliem o escopo de análise, incorporando outras fontes de informação, como jornais locais, boletins governamentais, mídias sociais, relatos comunitários, dentre outros. A integração dessas fontes alternativas pode proporcionar uma visão mais detalhada e representativa dos impactos causados pelas secas.

8 REFERÊNCIAS

ABU ARRA, A.; ŞIŞMAN, E. Characteristics of Hydrological and Meteorological Drought Based on Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves. *Water*, v. 15, p. 3142, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15173142>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. Monitor de Secas. Disponível em: <https://monitordesecas.ana.gov.br>.

AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS DE ABASTECIMENTO E ÁGUA E DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DO ESTADO DE MINAS GERAIS - ARSAE-MG. Programa Regar Bacia Hidrográfica do rio Jequitinhonha. Belo Horizonte, 2023. 28 p.

AGHAKOUCHAK, A.; HUNING, L. S.; SADEGH, M. et al. Toward impact-based monitoring of drought and its cascading hazards. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 4, p. 582–595, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00457-2>.

ALAMDARLOO, E. H.; KHOSRAVI, H.; NASABPOUR, S.; GHOLAMI, A. Assessment of drought hazard, vulnerability and risk in Iran using GIS techniques. *Journal of Arid Land*, v. 12, n. 6, p. 984–1000, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0096-4>.

ALMEDEIJ, J. Drought Analysis for Kuwait Using Standardized Precipitation Index. *The Scientific World Journal*, v. 2014, ID 451841, 9 p. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/451841>.

ALPINO, T. A.; SENA, A. R. M.; FREITAS, C. M. Desastres relacionados à seca e saúde coletiva – uma revisão da literatura científica. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 21, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-81232015213.21392015>.

ALVALÁ, R. C. S.; CUNHA, A. P. M. A.; BRITO, S. S. B. et al. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 91, e20170221, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170209>.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY (AMS). Statement on meteorological drought. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 85, p. 771–773, 2004.

ANDRES, C. M. Avaliação da qualidade do produto MSWEP como fonte alternativa de dados de precipitação no Rio Grande do Sul. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/25995>.

AVIA, L. Q.; YULIHASTIN, E.; IZZATURRAHIM, M. H. et al. The spatial distribution of a comprehensive drought risk index in Java, Indonesia. *Kuwait Journal of Science*, v. 50, n. 4, p. 753-760, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.02.031>.

AZAM, M.; PARK, H. K.; MAENG, S. J.; KIM, H. S. Regionalization of Drought across South Korea Using Multivariate Methods. *Water*, v. 10, p. 24, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w10010024>.

BATES, B. C. et al. Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2008.

BATISTA, E. F.; PASSINI, L. de B. Development and application of a social vulnerability index (SOVI) to landslide risk analysis in Ribeira Medium Valley, Brazil. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, v. 21, n. 5, p. 2801–2829, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv21n5-024>.

BECK, H. E. et al. Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 23, p. 207–224, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-23-207-2019>.

BECK, H. E. et al. MSWEP V2 Global 3-Hourly 0.1° Precipitation: Methodology and Quantitative Assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 100, p. 473–500, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0138.1>.

BECK, H. E. et al. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, p. 589–615, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>.

BECKER, W. et al. Weights and importance in composite indicators: Closing the gap. *Ecological Indicators*, v. 80, p. 12–22, 2017.

BENNETT, A. N. D. et al. Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling & Software*, v. 40, p. 1-20, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.011>.

BHATTACHARYA, S.; DASS, A. Vulnerability to drought, cyclones and floods in India. *Winrock International*, Índia, set. 2007.

BIFULCO, M.; RANIERI, R. Impact of drought on human health. *European Federation of Internal Medicine*, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejim.2017.08.009>.

BIRKMANN, J. et al. Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. *Natural Hazards*, v. 67, p. 193–211, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5>.

BLAIKIE, P. M. et al. *At risk: natural hazards, people's vulnerability, and disasters*. New York: Routledge, 1994.

BOCK, L. É. et al. Comparação entre dados de precipitação de estimativas baseadas em satélites e monitorados por pluviômetros para diferentes regiões climáticas brasileiras. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 24., 2023, Aracaju. Anais [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2023. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=15274>.

BRASIL, J. et al. Drought-induced water-level reduction favors cyanobacteria blooms in tropical shallow lakes. *Hydrobiologia*, v. 770, n. 1, p. 145-164, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-015-2578-5>.

BROWN, J. R. et al. Assessing drought vulnerability using a socioecological framework. *Rangelands*, v. 38, n. 4, p. 162-168, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rala.2016.06.007>.

CANAMARY, E. A. Avaliação de índices para fins de monitoramento e previsão de secas no Nordeste setentrional. 133 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 2015.

CARDOSO, I. P.; SANTIAGO, M. M.; RODRIGUES, A. A.; NUNES, A. B. (2024). Validation of precipitation data generated by ERA5 reanalysis for the Mirim-São Gonçalo watershed, Brazil. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 17(2), 824–837. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p824-837>.

CARNEIRO, P. A. S.; FONTES, A. P. F.; FONTES, R. Proposição de políticas públicas de desenvolvimento regional do alto, médio e baixo Jequitinhonha (MG). *Caminhos de Geografia*, v. 17, p. 147-166, 2006. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/viewFile/15279/8579>.

CARVALHO, T. M. N.; FILHO, F. de A. de S.; DE BRITO, M. M. Unveiling water allocation dynamics: a text analysis of 25 years of stakeholder meetings. *Environmental Research Letters*, v. 19, n. 4, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad37cd>.

CELANTE, R. Avaliação do desempenho de dados de precipitação satelitais do produto MSWEP como fonte alternativa para modelagem hidrológica com o SWAT em bacias com escassez de dados. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/24365>.

CHANG, T. J.; CLEOPA, X. A. A proposed method for drought monitoring. *Water Resources Bulletin*, v. 27, p. 275–281, 1991.

CHEN, H.; SUN, J. Changes in drought characteristics over China using the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, v. 28, p. 5430–5447, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00707.1>.

CHIANG, F.; MAZDIYASNI, O.; AGHAKOUCHAK, A. Evidence of anthropogenic impacts on global drought frequency, duration, and intensity. *Nature Communications*, v. 12, p. 2754, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22314-w>.

CLIMATE ACTION NETWORK. CAN Briefing: The Role of Ecosystems and Biodiversity for Climate Change Mitigation Ambition and Adaptation & Resilience. *Climate Action Network*, 2021. Disponível em: <https://climatenetwork.org/resource/can-briefing-the-role-of-ecosystems-and-biodiversity-for-climate-change-mitigation-ambition-and-adaptation-resilience/>. Acesso em: 24 nov. 2024.

Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. Produção de grãos atinge recorde na safra 2021/22 e chega a 271,2 milhões de toneladas. Brasília: CONAB, 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4744-producao-de-graos-atinge-recorde-na-safra-2021-22-e-chega-a-271-2-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 30 mar. 2025.

COSTA, M. A. A trajetória do índice de vulnerabilidade social: histórico e perspectivas. *Boletim Regional, Urbano e Ambiental*, IPEA, jul.-dez. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/brua30art12>.

CUARTAS, L. A. et al. Recent hydrological droughts in Brazil and their impact on hydropower generation. *Water*, v. 14, p. 601, 2022.

CURI, R. C.; SANTOS, R. M.; MARGUTI, B. O. *Boletim Regional, Urbano e Ambiental*, IPEA, n. 19, jul.-dez. 2018. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9754/1/brua_19_nota_3.pdf.

CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, v. 84, n. 2, p. 242-261, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>.

DAI, A. Drought under global warming: a review. *WIREs Climate Change*, v. 2, n. 1, p. 45–65, 19 jan. 2011.

DASHTPAGERDI, M. M. et al. An investigation of drought magnitude trend during 1975–2005 in arid and semi-arid regions of Iran. *Environmental Earth Sciences*, v. 73, n. 3, p. 1231–1244, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3477-1>.

DE BRITO, M. M.; KUHLCHE, C.; MARX, A. Near-real-time drought impact assessment: a text mining approach on the 2018/19 drought in Germany. 2020.

DE NYS, E.; ENGLE, N. L.; MAGALHÃES, A. R. Secas no Brasil: política e gestão proativas. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE; Banco Mundial, 2016. 292 p.

DESCHAMPS, M. V. Vulnerabilidade socioambiental das regiões metropolitanas brasileiras. Rio de Janeiro: Observatório das Metrôpoles – IPPUR/FASE, 2009.

DG ENV EC. Water Scarcity & Droughts – In-depth assessment, Second Interim Report, Directorate General Environment, European Commission, Bruxelas, 2007.

DIAS, R.; MATOS, F. Impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos: desafios e implicações para a humanidade. *Revista Sociedade Científica*, v. 6, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.61411/rsc100003>.

DOMINGOS, S. I. S. *Análise do índice de seca Standardized Precipitation Index (SPI) em Portugal Continental e sua comparação com o Palmer drought severity index (PDSI)*. Lisboa, Portugal, 2006. Tese (Licenciatura) – Universidade de Lisboa.

DOS SANTOS, K. A. et al. Políticas públicas no semiárido brasileiro: do combate à convivência com a seca. *Geo UERJ*, v. 42, e66666, 2023. DOI: <https://doi.org/10.12957/geouerj.2023.66666>.

DOWNING, T. E.; BAKKER, K. Drought discourse and vulnerability. In: WILHITE, D. A. (ed.). *Drought: a global assessment*, v. 2. London: Routledge, 2000.

DRACUP, J. A.; LEE, K. S.; LINS, H. F. On the definition of droughts. *Water Resources Research*, v. 16, n. 2, p. 297-302, 1980.

DROUGHT MONITOR – What is the USDM? Disponível em: <https://droughtmonitor.unl.edu/About/WhatistheUSDM.aspx>. Acesso em: 20 abr. 2024.

ECMWF. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Reanalysis datasets*, 2020. Disponível em: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/browse-Preanalysis-datasets>. Acesso em: 25 maio 2024.

EMBRAPA. *Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha: caracterização ambiental, demográfica, agrária e socioeconômica* / Elena Charlotte Landau, Daniel Pereira Guimarães, editores técnicos. Brasília, DF: EMBRAPA, 2024. 167 p.: il. color. ISBN 978-65-5467-059-3.

FERNANDES, D.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L.; AMORIM, A. O.; CARDOSO, A. P. Índices para a quantificação da seca. Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, 2009. (Documentos, 244). 48 p.

FERREIRA, V. O. *Paisagem, recursos hídricos e desenvolvimento econômico na bacia do Rio Jequitinhonha, em Minas Gerais*. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. 291 p.

FIGUEIREDO, A. do V.; BECKER, V. Influence of extreme hydrological events in the quality of water reservoirs in the semi-arid tropical region. *Brazilian Journal of Water Resources*, v. 23, p. 1-8, 2018.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. *The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture*. 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/publications/sofia/2020/en/>. Acesso em: 24 nov. 2024.

FRANÇA, L. C. *A fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha em Minas Gerais*. Nova Xavantina, MT: Pantanal, 2022. 52 p.

FREIRE-GONZÁLEZ, J.; DECKER, D.; HALL, J. W. The economic impacts of droughts: a framework for analysis. *Ecological Economics*, v. 132, p. 196-204, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.11.005>.

GALIZONI, F. M.; RIBEIRO, E. M.; LIMA, V. M. P.; GOMES, N. M.; SILVA, E. P. Vozes da seca: lavradores, mediadores e poder público frente à estiagem no Semiárido do Jequitinhonha mineiro. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 55, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5380/dma.v55i0.73756>.

GHOLINIA, A.; ABBASZADEH, P. Agricultural drought monitoring: a comparative review of conventional and satellite-based indices. *Atmosphere*, v. 15, p. 1129, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos15091129>.

GONÇALVES, S. T. N.; JUNIOR, F. C. V. J.; SAKAMOTO, M. S.; SILVEIRA, C. S.; MARTINS, E. S. P. R. Índices e metodologias de monitoramento de secas: uma revisão. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, n. 3 (Suplemento), p. 495-511, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786363000>.

GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C.; VICENTE-SERRANO, S. M.; PEÑA-ANGULO, D.; SALINAS, C.; TOMAS-BURGUERA, M.; BEGUERÍA, S. High-resolution spatio-temporal analyses of drought episodes in the western Mediterranean basin (Spanish mainland, Iberian Peninsula). *Acta Geophys.*, v. 66, p. 381-392, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0138-x>.

GUDMUNDSSON, L.; STAGGE, J. H. SCI: Standardized Climate Indices such as SPI, SRI or SPEI. 2022.

GUO, H.; LI, M.; NZABARINDA, V.; BAO, A.; MENG, X.; ZHU, L.; DE MAEYER, P. Assessment of three long-term satellite-based precipitation estimates against ground observations for drought characterization in Northwestern China. *Remote Sens.*, v. 14, p. 828, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14040828>.

GUTTMAN, N. B. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 34, n. 1, p. 113–121, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05964.x>.

HAGENLOCHER, M.; CASTRO, M. C. Mapping malaria risk and vulnerability in the United Republic of Tanzania: a spatial explicit model. *Popul Health Metrics*, v. 13, p. 2, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12963-015-0036-2>.

HAN, L. Y.; ZHANG, Q.; MA, P. L.; JIA, J. Y.; WANG, J. S. The spatial distribution characteristics of a comprehensive drought risk index in southwestern China and underlying causes. *Theor. Appl. Climatol.*, v. 124, n. 3–4, p. 517-528, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1432-z>.

HANNAFORD, J.; LLOYD-HUGHES, B.; KEEF, C.; PARRY, S.; PRUDHOMME, C. Examining the large-scale spatial coherence of European drought using regional indicators of precipitation and streamflow deficit. *Hydrological Processes*, v. 25, p. 1146-1162, 2010.

HASSLER, B.; LAUER, A. Comparison of Reanalysis and Observational Precipitation Datasets Including ERA5 and WFDE5. *Atmosphere*, v. 12, p. 1462, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos12111462>.

HAYES, M.; SVOBODA, M.; WALL, N.; WIDHALM, M. The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 92, p. 485–488, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3103.1>.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORANYI, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; SCHEPERS, D.; SIMÕES, A. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.*, v. 146, p. 1999–2049, 2020. DOI: <10.1002/qj.3803>.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J. DE O. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. *E&S - Engineering and Science*, 2015. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/download/3398/2623>.

HU, Q.; WILLSON, G. D. Effect of temperature anomalies on the Palmer drought severity index in the central United States. *Int. J. Climatol.*, v. 20, p. 1899–1911, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. *Censo Demográfico 2022: Resultados*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html?=&t=resultados>. Acesso em: 03 jan. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. *Métodos e conceitos para o cálculo do Índice de Vulnerabilidade Social com base nas PNADs e desagregações*. Brasília: Ipea, 2018. (Relatório Institucional). Disponível em: <https://goo.gl/EdoQg7>. Acesso em: 5 set. 2024.

INSTITUTO ESTADUAL DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE MINAS GERAIS - IEPHA-MG. *Legislação*. 2017. Disponível em: <https://www.iepha.mg.gov.br/index.php/institucional/legislacao/14-patrimonio-cultural-protegido/bens-tombados/182-bacia-hidrogr%C3%A1fica-do-rio-jequitinhonha>. Acesso em: 08 ago. 2024.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. *Gestão e situação das águas de Minas Gerais*. Coordenação, Marcelo da Fonseca, organização Caroline Matos da Cruz Correia et al. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2020.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. *Monitor de Secas*. Disponível em: <https://igam.mg.gov.br/w/monitor-de-secas-detalha-reducao-da-estiagem-em-minas-apos-chuvas-de-janeiro->. Acesso em: 28 dez. 2024.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. *Monitoramento da qualidade das águas superficiais na bacia do rio Jequitinhonha em 2009*. Belo Horizonte, 154 p., 2010.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. *Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha*. Belo Horizonte, 2009.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. *Proposta de instituição do Comitê da bacia hidrográfica Afluentes Mineiros do Alto Jequitinhonha (UPGRHJQ1). Diagnóstico Sócio-Econômico ambiental apresentado ao Conselho Estadual 72 de*

Recursos Hídricos, como pré-requisito de aprovação do Comitê. Comissão PróComitê, 2009. Minas Gerais, 56 p.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. *Relatório anual de gestão e situação dos recursos hídricos de Minas Gerais – 2015.* Belo Horizonte, 198 p., 2017.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO - INSA. *O Semiárido Brasileiro.* Disponível em: <https://www.gov.br/insa/pt-br/semiario-brasileiro>. Acesso em: 28 dez. 2024.

INTERGOVERNAMENTAL PAINEL IN CLIMATE CHANGE - IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects.* Cambridge University Press, 2022.

INTERGOVERNAMENTAL PAINEL IN CLIMATE CHANGE - IPCC. *Mudanças Climáticas 2014: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade. Parte B: Aspectos Regionais.* Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, ed. VR Barros et al. Nova York: Cambridge University Press, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. *Global warming of 1.5°C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* [S.I.]: IPCC, 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Acesso em: 26 dez. 2024.

INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION - ILO. *Water scarcity and its impact on economic vulnerability in rural areas.* 2018. Disponível em: <https://www.ilo.org/>. Acesso em: 27 dez. 2024.

JENKS, G. The data model concept in statistical mapping. *International Cartographic Association ed. International Yearbook of Cartography*, v. 7, p. 186-190, 1967.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. *Applied Multivariate Statistical Analysis.* Prentice Hall, 1998.

JUNIOR, E. P. S.; BLAIN, G. C.; XAVIER, A. C. F. Avaliação dos Dados de Reanálise do Climatic Research Unit (CRU) e do 5th Generation of European Reanalysis (ERA5) no Monitoramento Probabilístico Padronizado da Seca. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 37, n. 2, p. 319-329, jul.-set. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863720019>.

JÚNIOR, L. N.; NETO, J. L. S. Índice de Vulnerabilidade Social à Desastres Naturais para Áreas Urbanas. *Revista Geociências Nordeste*, Caicó, v. 6, n. 2, p. 65-72, jul.-dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2020v6n2ID19280>.

KEYANTASH, J.; DRACUP, J. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v. 83, n. 8, p. 1167–1180, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1167>.

KHOSHNAZAR, A.; CORZO PEREZ, G. A.; DIAZ, V. Spatiotemporal drought risk assessment considering resilience and heterogeneous vulnerability factors: Lempa transboundary river basin in the Central American dry corridor. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 9, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9040386>.

KHOSHNAZAR, A.; PEREZ, G. C.; SAJJAD, M. Characterizing spatial–temporal drought risk heterogeneities: A hazard, vulnerability and resilience-based modeling. *Journal of Hydrology*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129321>.

KOURTIS, I. M.; VANGELIS, H.; TIGKAS, D.; MAMARA, A.; NALBANTIS, I.; TSAKIRIS, G.; TSIHRINTZIS, V. A. Avaliação da seca na Grécia usando dados de reanálise climática SPI e ERA5. *Sustentabilidade*, v. 15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152215999>.

LI, Y.; ZHUANG, J.; BAI, P.; YU, W.; ZHAO, L.; HUANG, M.; XING, Y. Evaluation of three long-term remotely sensed precipitation estimates for meteorological drought monitoring over China. *Remote Sensing*, v. 15, p. 86, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15010086>.

LIMA, S. L.; SILVA, M. T.; SOUSA, W. G.; SIQUEIRA, M. D. S.; ANDRADE, A. S. D.; MELO, M. M. M. S. Space and temporal episode standards dry in the State of Rio

Grande do Norte. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v. 9, n. 6, p. 330–342, 2019.

LINHARES, L. I. M.; MONTEIRO, J. B.; PACHECO-GRAMATA, A. P. P. Geografia dos riscos e vulnerabilidades: uma breve discussão teórica e metodológica. *Revista Casa da Geografia de Sobral*, Sobral/CE, v. 23, p. 75–98, maio 2021.

LIU, H.; MOTODA, H. Feature selection for knowledge discovery and data mining. *Springer*, 2018.

LIU, X. et al. Agricultural drought monitoring: Progress, challenges, and prospects. *Journal of Geographical Sciences*, v. 26, n. 6, p. 750–767, 30 jun. 2016.

LLOYD-HUGHES, B. The impracticality of a universal drought definition. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 117, p. 607–611, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1025-7>.

LLOYD-HUGHES, B.; SAUNDERS, M. A. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, v. 22, n. 13, p. 1571–1592, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.846>.

MACIEL, S. A. *Clima, disponibilidade hídrica e pobreza na porção mineira da bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Programa de Pós-Graduação em Geografia, 288 p., 2021.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C.S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L.L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Earth Sciences. An. Acad. Bras. Ciênc.* 90 (2 suppl 1), Aug 2018, <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: characterization, causes, and impacts. *Frontiers in Water*, v. 3, p. 13, 2021.

MCKEE, T. B.; DOES KEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, 1993.

MELO, M. P. DE; FERREIRA, V. DE O. Levantamento da qualidade hídrica e indicadores de contaminação na porção mineira da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha. 2022. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, AbrHidro.

MIGUEZ, M. G.; GREGÓRIO, L. T.; VERÓL, A. P. Gestão de riscos e desastres hidrológicos. 1. ed. Rio de Janeiro: *Elsevier*, 2018.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa CERH - MG nº 06, de 04 de outubro de 2002. Estabelece as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais. Publicada no *Diário Executivo de Minas Gerais*, 05 out. 2002.

MINAS GERAIS. *Estudo Geográfico do Vale do Médio Jequitinhonha*. Belo Horizonte: Grupo de Trabalho para a Pecuária, 1960.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, v. 391, p. 202–216, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>.

MULER, R. DOS A. DE S.; MOURA, V.; BORMA, L. DE S. Distribuição espaço-temporal da precipitação e SPI no estado de Rondônia (RO), Brasil, por meio de técnicas de geoestatística. *Revista Geográfica Venezolana*, v. 59, n. 2, p. 246-260, 2018. Universidad de los Andes.

MUÑOZ-SABATER, J.; DUTRA, E.; AGUSTÍ-PANAREDA, A.; ALBERGEL, C.; ARDUINI, G.; BALSAMO, G.; BOUSSETTA, S.; CHOULGA, M.; HARRIGAN, S.; HERBACH, H.; MARTENS, B.; MIRALLES, D. G.; PILES, M.; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, N. J.; ZSOTER, E.; BUONTEMPO, C.; THÉPAUT, J.-N.: ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 4349–4383, <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>, 2021.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. DE A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2007. v. 1.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. E. River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NASROLLAHI, M.; KHOSRAVI, H.; MOGHADDAMNIA, A.; MALEKIAN, A.; SHAHID, S. Assessment of drought risk index using drought hazard and vulnerability indices. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 11, n. 20, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3971-y>.

NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH - NCAR. Dai Global Palmer Drought Severity Index (PDSI) - Dataset. Disponível em: <https://data.ucar.edu/dataset/dai-global-palmer-drought-severity-index-pdsi>. Acesso em: 28 dez. 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION - NOAA. The Importance of Actions and Research to Build Drought-Resilient Communities. 2023. Disponível em: <https://drought.noaa.gov/>. Acesso em: 06 dez. 2024.

NETO, R. M. B. *Avaliação da seca e de suas características sobre o estado da Paraíba utilizando dados TRMM e de pluviômetros (1998-2017)*. João Pessoa, 2020. 189 f.

NOBRE, C.; MARENGO, J.; SELUCHI, M.; CUARTAS, L.; ALVES, L. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 8, p. 252-262, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.82022>.

NUNES, W. DA S.; RIBEIRO, E. M.; SANTOS, S. P.; GALIZONI, F. M. Águas para a agricultura familiar: uma análise dos programas públicos de abastecimento no Jequitinhonha mineiro. *Campo-Território: revista de Geografia Agrária*, Uberlândia, v. 19, n. 56, p. 171-195, set./dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCT195674993>.

NYATUAME, M.; AGODZO, S. Analysis of Extreme Rainfall Events (Drought and Flood) over Tordzie Watershed in the Volta Region of Ghana. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, v. 5, p. 275-295, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4236/gep.2017.59019>.

OECD. *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. Paris: OECD Publishing, 2008. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/handbook-on-constructing-composite-indicators-methodology-and-user-guide_9789264043466-en.html. Acesso em: 28 dez. 2024.

OLADIPO, E. O. A comparative performance analysis of three meteorological drought indices. *Journal of Climatology*, v. 5, p. 655–664, 1985.

ORIMOLOYE, I. R. Agricultural drought and its potential impacts: Enabling decision-support for food security in vulnerable regions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 6, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.838824>.

ORRICO, S. R. M. *Sistema associativo de saneamento e seus efeitos sobre a população em comunidades do semi-árido baiano*. 2003. Tese (Doutorado) - Faculdade de Saúde Pública da USP, São Paulo, 2003.

PELINSON, D.; FAN, F. M.; RUHOFF, A. L.; PAIVA, R. C. D. Análise comparativa da diferença do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) utilizando dados de estação pluviométrica e sensoriamento remoto. *XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2021. ISSN 2318-0358.

PEREIRA, D.R.; OLIVEIRA, A.R.; COSTA, M.S. Evaluation of precipitation products in a Brazilian watershed: Tocantins-Araguaia watershed case study. *Theor Appl Climatol* 155, 7845–7865 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05091-6>.

PEREIRA, T. A. S. *Análise e previsão de chuvas na estação seca do leste do Nordeste do Brasil: aplicação nas bacias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio (AL/PE)*. 171 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

PESSINI, P. B. *Estudo dos eventos de seca meteorológica na região Sul do Brasil*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 87 p., 2017.

PIMENTA, B. P. P. *Mudanças climáticas e secas no Brasil: uma análise espacial integrada a partir de modelos IEGC e monitoramento climático no semiárido brasileiro*. 2020. Dissertação (Mestrado em Teoria Econômica) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.12.2020.tde-15102020-101650>. Acesso em: 28 dez. 2024.

PONTES FILHO, J. D.; PORTELA, M. M.; STUDART, T. M. de C.; SOUZA FILHO, F. de A. A continuous drought probability monitoring system, CDPMS, based on copulas. *Water*, v. 11, n. 9, p. 1925, 2019.

QUIRING, S. M. Meteorological drought: Understanding the links between climate and drought indices. In: WILHITE, D. A. (Ed.). *Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues* (pp. 65-97). CRC Press, 2009.

RAPOSO, V. M. B.; COSTA, V. A. F.; RODRIGUES, A. F. A review of recent developments on drought characterization, propagation, and influential factors. *Science of the Total Environment*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165550>. 21 p.

RESENDE, A. R.; CASTRO, T. R.; ALMEIDA, F. F. F. Crise hídrica do Vale do Jequitinhonha: uma análise da participação cidadã no Município de Pedra Azul. *Perspectivas em Políticas Públicas*, ISSN 2236-045X, v. XIII, n. 26, mai./ago. 2020.

RIBEIRO, C. L. C.; DE MELLO, C. R.; GUZMAN, J. A. Groundwater storage trend in headwater basins: shreds of evidence from the last decades in Minas Gerais state, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, v. 83, p. 327, 2024a. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11645-8>.

RIBEIRO, R. E.; ALMEIDA, R. A.; PINTO, D. B. F. Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Mucuri em escalas temporais mensal e diária. *Caderno Pedagógico*, v. 21, n. 3, p. e3266, 2024b. DOI: <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n3-123>.

ROSADO, J.; MORAIS, M. M. Estratégias de Gestão da Água em Situação de Escassez: Regiões Semiáridas e Mediterrânicas. *Sustentabilidade em Debate*, 2010. DOI: <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v1n2.2010.1678>.

ROSENDO, E. E. Q. *Desenvolvimento de indicadores de vulnerabilidade à seca na região semiárida brasileira*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/5536>.

ROYER, A. C. *Caracterização e efeitos dos períodos de seca e da aridez na suscetibilidade do solo à erosão hídrica no nordeste de Portugal*. Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança, Bragança, Portugal, 2019.

RUBIÃO, A.; CASTRO, T. R.; ALMEIDA, F. F. F. de. Crise hídrica do Vale do Jequitinhonha: uma análise da participação cidadã no Município de Pedra Azul. *Perspectivas em Políticas Públicas* [Recurso Eletrônico], Belo Horizonte, v. 13, n. 26, maio/ago. 2020. Disponível em: <https://dspace.almg.gov.br/handle/11037/56675>. Acesso em: 20 dez. 2024.

SAJJAD, M.; CHAN, J. C. L. Risk assessment for the sustainability of coastal communities: A preliminary study. *Science of the Total Environment*, v. 671, p. 339–350, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.326>.

SAMPAIO, E. V. de S. B. et al. *Desertificação no Brasil: Conceitos, Núcleos e Tecnologias de Recuperação e Convivência*. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2003.

SANTOS, J. F.; PULIDO-CALVO, I.; PORTELA, M. M. Spatial and temporal variability of droughts in Portugal. *Water Resources Research*, v. 46, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1029/2009WR008071>.

SANTOS, K. M. S. *Avaliação da Eficiência do Monitor de Secas para Definição de Secas em Sergipe*. 2020. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 147 p.

SANTOS, M. A. F.; COSTA, V. S.; GALVINCIO, J. D. SECAS METEOROLÓGICA, AGRÍCOLA, HIDROLÓGICA NO MUNICÍPIO DE SERRINHA-BA. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 28, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.74084>.

SANTOS, M. S. *Caracterização espaço-temporal de secas utilizando ondaletas e o standardized precipitation index: uma aplicação para a parcela mineira da bacia do rio São Francisco*. 2011. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

SASS, K. S. *Mudanças climáticas, secas e impactos econômicos: uma análise para a Região Metropolitana de São Paulo*. 152 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 2021.

SCARIOT, N. et al. Capacidade de detecção de precipitação extrema por produtos de satélite: estudo de caso na região de Santa Maria (RS) em abril de 2024. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 25., 2024, Balneário Camboriú. Anais [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2024. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=16887>.

SENA, A. R. M. *Seca, vulnerabilidade socioambiental e saúde: Impactos no semiárido brasileiro*. 2017. Tese (Doutorado) – Instituto de Comunicação e Informação Científica e Tecnológica em Saúde, Pós-graduação em Informação e Comunicação em Saúde, Rio de Janeiro.

SENA, A.; BARCELLOS, C.; FREITAS, C.; CORVALAN, C. Managing the Health Impacts of Drought in Brazil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 11, n. 10, p. 10737-10751, 2014.

SILVA, A. F. A. *Avaliação da propagação de secas meteorológicas para hidrológicas na Bacia do Rio São Francisco: Análise exploratória, fatores influentes e estratégias de previsão*. 2020. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 127 p.

SILVA, E. B. Impacto da seca na saúde nos municípios do nordeste brasileiro. *Perspectivas Contemporâneas*, v. 17, n. 1, p. 1–16, 2022. DOI: <https://doi.org/10.54372/pc.2022.v17.3409>.

SILVA, J. L.; RIBEIRO, E. M.; LIMA, V. M. P.; HELLER, L. As secas no Jequitinhonha: demandas técnicas e custos do abastecimento no semiárido de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v. 22, e 202013, p. 1–23, 2020.

SILVA, N.G.; ALMEIDA, F.F. A.; FILHO, R. L. M. S.; SOUZA, W. M.; GALVÍNCIO, J. D. Vulnerabilidade ambiental e socioeconômica aos eventos extremos de precipitação relacionados a seca no semiárido nordestino – Estudo de caso da Bacia Hidrográfica de Terra Nova – Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.16, n.03 (2023) 1490-1.510

SLETTE, I. J.; SMITH, M. D.; KNAPP, A. K.; VICENTE-SERRANO, S. M.; CAMARERO, J. J.; BEGUERÍA, S. Standardized metrics are key for assessing drought severity. *Global Change Biology*, v. 26, e1–e3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14899>.

SMAKHTIN, V. U.; SCHIPPER, E. L. Droughts: The impact of semantics and perceptions. *Water Policy*, v. 10, p. 131–143, 2008.

SMITH, M. D. et al. Extreme drought impacts have been underestimated in grasslands and shrublands globally. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 121. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2309881120>, 2024.

SODOGE, J.; KUHLCHE, C.; BRITO, M. M. Automatized spatio-temporal detection of drought impacts from newspaper articles using natural language processing and machine learning. *Weather and Climate Extremes*, v. 41, p. 100574, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100574>.

SOUZA, K. A. DE; ESPÍNDOLA, G. M. DE; SILVA, C. E. DA. Análise de atributos limnológicos em reservatórios do semiárido nordestino. *Revista Brasileira de*

Geografia Física, v. 14, n. 1, p. 357–371, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.1.p357-371>.

SOUZA FILHO, F. A.; LOPES, T. M. X. M.; SILVA, S. M. O.; ARAÚJO JUNIOR, R. M. Identificação de impactos e respostas às secas para mitigação da vulnerabilidade hídrica: o caso de Fortaleza. *Revista DAE*, v. 70, n. 236, p. 195–207, abr./jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.045>.

STAGGE, J. H.; TALLAKSEN, L. M.; GUDMUNDSSON, L.; VAN LOON, A. F.; STAHL, K. Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4267>, 2015.

STANKE, C.; KERAC, M.; PRUDHOMME, C.; MEDLOCK, J.; MURRAY, V. Health effects of drought: a systematic review of the evidence. *PLoS Currents*, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1371/currents.dis.7a2cee9e980f91ad7697b570bcc4b004>.

SUN, Q.; MIAO, C.; DUAN, Q.; ASHOURI, H.; SOROOSHIAN, S.; HSU, K. L. A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and inter-comparisons. *Reviews of Geophysics*, v. 56, p. 79–107, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>.

SVOBODA, M.; FUCHS, B.; Integrated Drought Management Programme (IDMP). *Handbook of Drought Indicators and Indices*. Drought Mitigation Center Faculty Publications, p. 117, 2016. Disponível em: <http://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/117>.

SVOBODA, M.; HAYES, M.; WOOD, D. Standardized Precipitation Index User Guide. World Meteorological Organization (WMO), WMO-No. 1090, 2012.

TAREK, M.; BRISSETTE, F. P.; ARSENAULT, R. Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 24, p. 2527–2544, 2020. DOI: 10.5194/hess-24-2527-2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-24-2527-2020>.

TLADI, T. M.; NDAMBUKI, J. M.; SALIM, R. W. Meteorological drought monitoring in the Upper Olifants sub-basin, South Africa. *Physica Chemica Earth*, v. 128, 2022. DOI: 10.1016/j.pce.2022.103273. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103273>.

TORELLÓ-SENTELLES, H. E.; FRANZKE, C. L. E. Drought impact links to meteorological drought indicators and predictability in Spain. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 26, p. 1821-1844, 2022. DOI: 10.5194/hess-26-1821-2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-26-1821-2022>.

TORRES-VÁZQUEZ, M. Á.; HALIFA-MARÍN, A.; MONTÁVEZ, J. P.; TURCO, M. High resolution monitoring and probabilistic prediction of meteorological drought in a Mediterranean environment. *Weather and Climate Extremes*, v. 40, 2023. DOI: 10.1016/j.wace.2023.100558. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100558>.

TREMBERTH, K. E.; DAI, A.; SCHRIER, G. V.; JONES, P. D.; BARICHIVICH, J.; BRIFFA, K. R.; SHEFFIELD, J. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, v. 4, n. 1, p. 17-22, 2014.

UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UNISDR). *Drought Risk Reduction Framework and Practices: Contributing to the Implementation of the Hyogo Framework for Action*. Geneva: UNISDR, 2009. Disponível em: https://www.unisdr.org/files/11541_DroughtRiskReduction2009library.pdf. Acesso em: 27 dez. 2024.

UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION - UNISDR. *Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives*. Geneva: UNISDR, 2004.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION - UNISDR. *Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives*. Vol. II - Annexes. Geneva: UNISDR, 2004.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION - UNODRR. *Special Report on Drought 2021*. Disponível em: <https://www.undrr.org/publication/gar-special-report-drought-2021>. Acesso em: 29 dez. 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - UFPB. Frequência e gravidade de eventos de seca no Brasil cresceram na última década, diz estudo da UFPB. 2024. Disponível em: <https://www.ufpb.br/ufpb/contents/noticias/frequencia-e-gravidade-de-eventos-de-seca-no-brasil-cresceram-na-ultima-decada-diz-estudo-da-ufpb>. Acesso em: 28 dez. 2024.

VAN LOON, A. F. Hydrological drought explained. *WIREs Water*, v. 2, n. 4, p. 359–392, 14 jul. 2015. DOI: 10.1002/wat2.1085.

VAN LOON, A. F. Hydrology and society: Transdisciplinary interactions and challenges. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2019.

VAN LOON, A. F.; GLEESON, T.; CLARK, J.; VAN DIJK, A. I.; STAHL, K.; HANNAFORD, J.; MELSEN, L. A. Drought in the Anthropocene. *Nature Geoscience*, p. 89-91, 2016.

VAN LOON, A. F.; VAN LANEN, H. A. A process-based typology of hydrological drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 16, p. 1915–1946, 2012. DOI: 10.5194/hess-16-1915-2012.

VEETTIL, A. V.; MISHRA, A. K. Quantifying thresholds for advancing impact-based drought assessment using classification and regression tree (CART) models. *Journal of Hydrology*, v. 625, Part A, p. 129966, 2023. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129966.

VEGA-VIVIESCAS, C.; RODRÍGUEZ-S, E. A. Evaluation of reanalysis data in the study of meteorological and hydrological droughts in the Magdalena-Cauca river basin, Colombia. *DYNA*, v. 86, n. 211, p. 268-277, 2019. DOI: 10.15446/dyna.v86n211.80530.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, v. 23, n. 7, p. 1696-1718, 2010.

VICENTE-SERRANO, S. M.; DOMÍNGUEZ-CASTRO, F.; REIG, F.; TOMAS-BURGUERA, M.; PEÑA-ANGULO, D.; LATORRE, B.; BEGUERÍA, S.; RABANAQUE, I.; NOGUERA, I.; LORENZO-LACRUZ, J.; et al. A global drought monitoring system and dataset based on ERA5 reanalysis: A focus on crop-growing regions. *Geoscience Data Journal*, v. 10, p. 505–518, 2022. DOI: 10.1002/gdj3.178.

WANG, D.; ZHANG, Q.; SINGH, V. P.; SHEN, Z.; WANG, G.; WU, W.; YUAN, R. Amplifying Meteorological Droughts Across Middle- and Low-Latitude Northern Hemisphere. *Frontiers*, v. 10, 2022. DOI: 10.3389/feart.2022.914232.

WAYCARBON. *As Mudanças Climáticas no Setor de Saneamento*. Instituto Tratar Brasil. Versão 2.0. Novembro/2024.

WEAVER, S.; STEWARD, C.; GUINAN, P.; SEMENOVA, I.; ALOYSIUS, N.; LUPO, A.; HUNT, S. Atmospheric Blocking and Drought Patterns: An In-Depth Analysis and Comparison of the Dry Summers of 2022 and 2023 in the Midwest USA. *US CLIVAR*, 2024. Disponível em: <https://usclivar.org/abstract-blocking-2024/atmospheric-blocking-drought-patterns-in-depth-analysis-comparison>. Acesso em: 29 jan. 2025.

WILHITE, D. A., et al. *Drought risk and vulnerability: A global assessment*. Earthscan, 2007.

WILHITE, D. A.; PULWARTY, R. S. Drought and water crisis: The role of the National Drought Mitigation Center. In: *Handbook of Drought Indicators and Indices*, p. 341-362. Springer, 2017.

WILHITE, D. A.; SVOBODA, M.; PULWARTY, R. S. Managing drought: A roadmap for change in the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 50, n. 4, p. 1-12, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/jawr.12133>.

WILHITE, D.A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In: WILHITE, D.A. (ed). *Drought: a global assessment*. Hazards and disasters: a series of definitive major works. Routledge Publishers, London, 2000.

WILHITE, D.A.; GLANTZ, M.H. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, v. 10, p. 111–120, 1985.

WILLIAMS, A. P.; COOK, E. R.; SINGH, D.; MIKHAILOVICH, J.; SNEE, P.; BOLLES, K.; MASS, C. R. Large contribution from anthropogenic warming to an emerging North American megadrought. *Science*, v. 368, n. 6488, p. 314-318, 2020.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. *Standardized Precipitation Index User Guide* - WMO - No. 1090, p. 1–24, 2012.

WU, J.; LIU, Z.; YAO, H.; CHEN, X.; CHEN, X.; ZHENG, Y.; HE, Y. Impacts of Reservoir Operations on Multi-Scale Correlations between Hydrological Drought and Meteorological Drought. *Journal of Hydrology*, v. 563, p. 726–736, 2018.

WWF BRASIL. Índice de Vulnerabilidade aos Desastres Naturais relacionados às Secas no Contexto da Mudança do Clima. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?uNewsID=36450>. Acesso em: 18 dez. 2024.

YANG, Y.; ZHANG, S.; RODERICK, M. L.; MCVICAR, T. R.; YANG, D.; LIU, W.; LI, X. Comparing Palmer Drought Severity Index drought assessments using the traditional offline approach with direct climate model outputs. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 24, p. 2921–2930, 2020. DOI: 10.5194/hess-24-2921-2020.

YEVJEVICH, V. An Objective Approach to Definitions of Continental Hydrologic Droughts. *Hydrology Paper no 23*. Fort Collins, Colorado State University, 1967.

ZARGAR, A.; SADIQ, R.; NASER, B.; KHAN, F. I. A review of drought indices. *Environmental Reviews*, v. 19, n. NA, p. 333–349, 2011. DOI: 10.1139/a11-013.

ZHANG, R.; LI, L.; ZHANG, Y.; HUANG, F.; LI, J.; LIU, W.; MAO, T.; XIONG, Z.; SHANGGUAN, W. Assessment of agricultural drought using soil water deficit index

based on ERA5-land soil moisture data in four southern provinces of China. *Agriculture*, v. 11, p. 411, 2021. DOI: 10.3390/agriculture11050411.

ZHOU, Z.; WANG, V.; LI, L.; FU, Q.; DING, Y.; CHEN, P.; XUE, P.; WANG, T.; SHI, H. Recent development on drought propagation: A comprehensive review. *Journal of Hydrology*, v. 645, Part B, p. 132196, 2024. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132196.

ZINK, M.; SAMANIEGO, L.; KUMAR, R.; THOBER, S.; MAI, J. et al. The German drought monitor. *Environmental Research Letters*, v. 11, n. 7, p. 074002, 2016.

ZONSEIN, J. Índice de risco de inundações como ferramenta de gestão de inundações. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

APÊNDICE A – Municípios inseridos totalmente e parcialmente na porção mineira da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha

Nº	Município	População (hab.)	Área (m²)	Inserção	CH
1	Almenara	40.364	2.294,43	Total	JQ3
2	Angelândia	7.718	185,21	Total	JQ2
3	Araçuaí	34.297	2.236,28	Total	JQ2/JQ3
4	Aricanduva	4.719	243,33	Parcial	JQ2
5	Bandeira	4.741	483,79	Total	JQ3
6	Berilo	9.826	587,11	Total	JQ1/JQ2
7	Bocaiúva	48.032	3.206,76	Parcial	JQ1
8	Botumirim	5.790	1.568,88	Total	JQ1
9	Cachoeira de Pajeú	9.110	695,67	Parcial	JQ3
10	Capelinha	39.636	965,29	Total	JQ2
11	Caraiá	19.548	1.242,34	Parcial	JQ3
12	Carbonita	8.512	1.456,09	Total	JQ1/JQ2
13	Chapada do Norte	10.337	830,83	Total	JQ2
14	Comercinho	6.660	654,96	Total	JQ3
15	Coronel Murta	8.200	815,41	Total	JQ3
16	Couto de Magalhães de Minas	4.245	485,65	Total	JQ1
17	Cristália	5.121	840,70	Total	JQ1
18	Datas	5.465	310,10	Parcial	JQ1
19	Diamantina	47.702	3.891,66	Parcial	JQ1
20	Divisópolis	10.213	572,93	Total	JQ3
21	Felício dos Santos	5.133	357,62	Total	JQ2
22	Felisburgo	6.489	596,22	Parcial	JQ3
23	Francisco Badaró	7.366	461,48	Total	JQ2
24	Fruta de Leite	4.647	762,84	Total	JQ1/JQ3
25	Grão Mogol	13.901	3.885,29	Total	JQ1
26	Guaraciama	5.051	390,26	Parcial	JQ1
27	Itacambira	4.252	1.788,44	Total	JQ1
28	Itamarandiba	32.948	2.735,57	Parcial	JQ2
29	Itaobim	19.151	679,02	Total	JQ3
30	Itinga	13.745	1.649,62	Total	JQ3
31	Jacinto	11.042	1.393,61	Total	JQ3
32	Jenipapo de Minas	6.100	284,45	Total	JQ2
33	Jequitinhonha	24.007	3.514,22	Total	JQ3
34	Joáima	13.888	1.664,19	Parcial	JQ3
35	Jordânia	10.304	546,71	Total	JQ3
36	José Gonçalves de Minas	3.969	381,33	Total	JQ1/JQ2
37	Josenópolis	3.630	541,39	Total	JQ1
38	Leme do Prado	4.341	280,04	Total	JQ1/JQ2
39	Malacacheta	17.516	727,89	Parcial	JQ2
40	Mata Verde	9.112	227,54	Total	JQ3
41	Medina	20.156	1.435,90	Total	JQ3
42	Minas Novas	24.405	1.812,40	Total	JQ2

N°	Município	População (hab.)	Área (m²)	Inserção	CH
43	Monte Formoso	4.381	385,55	Parcial	JQ3
44	Novo Cruzeiro	26.975	1.702,98	Total	JQ2/JQ3
45	Novorizonte	4.571	271,61	Total	JQ1/JQ3
46	Olhos-D'Água	5.385	2.092,08	Total	JQ1
47	Padre Carvalho	5.058	446,27	Total	JQ1
48	Padre Paraíso	17.334	544,38	Parcial	JQ3
49	Pedra Azul	24.410	1.594,65	Total	JQ3
50	Ponto dos Volantes	10.883	1.212,41	Total	JQ3
51	Riacho dos Machados	8.756	1.315,54	Parcial	JQ1
52	Rio do Prado	4.639	479,82	Parcial	JQ3
53	Rio Pardo de Minas	28.271	3.117,68	Parcial	JQ1
54	Rio Vermelho	12.641	986,56	Parcial	JQ2
55	Rubelita	5.679	1.110,30	Total	JQ1/JQ3
56	Rubim	10.298	965,17	Total	JQ3
57	Salinas	40.178	1.862,12	Total	JQ3
58	Salto da Divisa	6.110	938,01	Total	JQ3
59	Santa Cruz de Salinas	3.910	589,61	Parcial	JQ3
60	Santa Maria do Salto	4.755	440,61	Total	JQ3
61	Santo Antônio do Jacinto	10.327	503,71	Parcial	JQ3
62	São Gonçalo do Rio Preto	3.032	314,46	Total	JQ2
63	Senador Modestino Gonçalves	4.008	952,05	Total	JQ2
64	Serranópolis de Minas	4.399	551,95	Parcial	JQ1
65	Serro	21.952	1.217,81	Parcial	JQ1
66	Setubinha	9.917	534,66	Total	JQ2
67	Taiobeiras	33.050	1.220,05	Parcial	JQ3
68	Turmalina	20.000	1.153,11	Total	JQ1/JQ2
69	Veredinha	5.181	631,69	Total	JQ2
70	Virgem da Lapa	11.804	868,91	Total	JQ1/JQ2/JQ3

Fonte: Autora (2025).

APÊNDICE B – Relação dos dados pluviométricos

Código	Ponto	Sub-bacia	Nome	Município	Monitoramento	Análise	
					(anos)	Período	Anos
1540019	Ponto 1	54	Jordania	Jordânia	28	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1540020	Ponto 2	54	Bandeira	Bandeira	28	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1641012	Ponto 3	54	Fazenda Boa Sorte - Jusante	Joaíma	30	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1641013	Ponto 4	54	Comercinho	Comercinho	28	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1641023	Ponto 5	54	CBL	Araçuaí	18	01/01/2005 a 31/01/2022	18
1641024	Ponto 6	54	Água Boa	Santa Cruz de Salinas	18	01/01/2005 a 31/01/2022	18
1641025	Ponto 7	54	Barragem do Clovis	Itinga	18	01/01/2005 a 31/01/2022	18
1642001	Ponto 8	54	Araçuaí	Araçuaí	47	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1640000	Ponto 9	54	Jacinto	Jacinto	82	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1640001	Ponto 10	54	Fazenda Cajueiro	Almenara	48	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1640009	Ponto 11	54	Rubim	Rubim	28	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1641001	Ponto 12	54	Itaobim	Itaobim	90	01/12/1999 a 30/11/2021	21
1641007	Ponto 13	54	São João Grande	Itaobim	49	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1641010	Ponto 14	54	Itinga	Itinga	46	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1642026	Ponto 15	54	Ponte Vacaria	Salinas	30	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1642027	Ponto 16	54	Barra do Salinas	Coronel Murta	30	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1642028	Ponto 17	54	Itira	Araçuaí	31	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1643027	Ponto 18	54	Pensão Caveiras	Grão Mogol	23	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1741013	Ponto 19	54	Padre Paraíso	Padre Paraíso	46	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1741019	Ponto 20	54	Caraí	Caraí	18	01/01/2005 a 31/01/2022	18
1741020	Ponto 21	54	Jirau	Araçuaí	18	01/01/2005 a 31/01/2022	18
1742014	Ponto 22	54	Capelinha	Capelinha	48	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1742020	Ponto 23	54	Fazenda Facão	Araçuaí	38	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1742022	Ponto 24	54	Ponte Alta	Turmalina	31	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1742023	Ponto 25	54	Minas Novas	Minas Nova	30	01/01/2000 a 31/12/2021	21
1742025	Ponto 26	54	Setubinha	Setubinha	23	01/01/2000 a 31/12/2021	21

Código	Ponto	Sub-bacia	Nome	Município	Monitoramento	Análise		
					(anos)	Período	Anos	
1742033	Ponto 27	54	Aguada Nova	Araçuaí	18	01/01/2005 a 31/01/2022		18
1743002	Ponto 28	54	Vila Terra Branca - Jusante	Bocaiúva	71	01/01/2000 a 31/12/2021		21
1743016	Ponto 29	54	Itacambira	Itacambira	28	01/01/2000 a 31/12/2021		21
1743018	Ponto 30	54	Senador Modestino	Senador Modestino Gonçalves	23	01/01/2000 a 31/12/2021		21
1843015	Ponto 31	54	Povoado de Vau	Diamantina	23	01/01/2000 a 31/12/2021		21

Fonte: Autor (2025).

APÊNDICE C – Classificações (Dr) e pesos (Dw) para categorias de seca, juntamente com as probabilidades de ocorrência para o SPI-6.

Intervalos			Categoria	Peso (Dw)	Probabilidade de ocorrência	Classificação (Dr)
Duração	Magnitude	Intensidade				
SPI > 14,5	SPI ≤ -35,1	SPI ≤ -1,3	Extrema (E)	4	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1
8,5 < SPI ≤ 14,5	-35,1 < SPI ≤ -12,9	-1,3 < SPI ≤ -0,8	Severa (S)	3	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1
4,5 < SPI ≤ 8,5	-12,9 < SPI ≤ -4,2	-0,8 < SPI ≤ -0,4	Moderada (M)	2	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1
1,0 ≤ SPI ≤ 4,5	-4,2 ≤ SPI ≤ 0	-0,4 ≤ SPI ≤ 0	Baixa (B)	1	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1

Fonte: Autora (2025).

APÊNDICE D – Classificações (Dr) e pesos (Dw) para categorias de seca, juntamente com as probabilidades de ocorrência para o SPI-9.

Intervalos			Categoria	Peso (Dw)	Probabilidade de ocorrência	Classificação (Dr)
Duração	Magnitude	Intensidade				
SPI > 28,5	SPI ≤ -45,8	SPI ≤ -1,4	Extrema (E)	4	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1
14,5 < SPI ≤ 28,5	-45,8 < SPI ≤ -14,6	-1,4 < SPI ≤ -0,8	Severa (S)	3	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1
5,5 < SPI ≤ 14,5	-14,6 < SPI ≤ -4,9	-0,8 < SPI ≤ -0,4	Moderada (M)	2	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1
1,0 ≤ SPI ≤ 5,5	-4,9 ≤ SPI ≤ 0	-0,4 ≤ SPI ≤ 0	Baixa (B)	1	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1

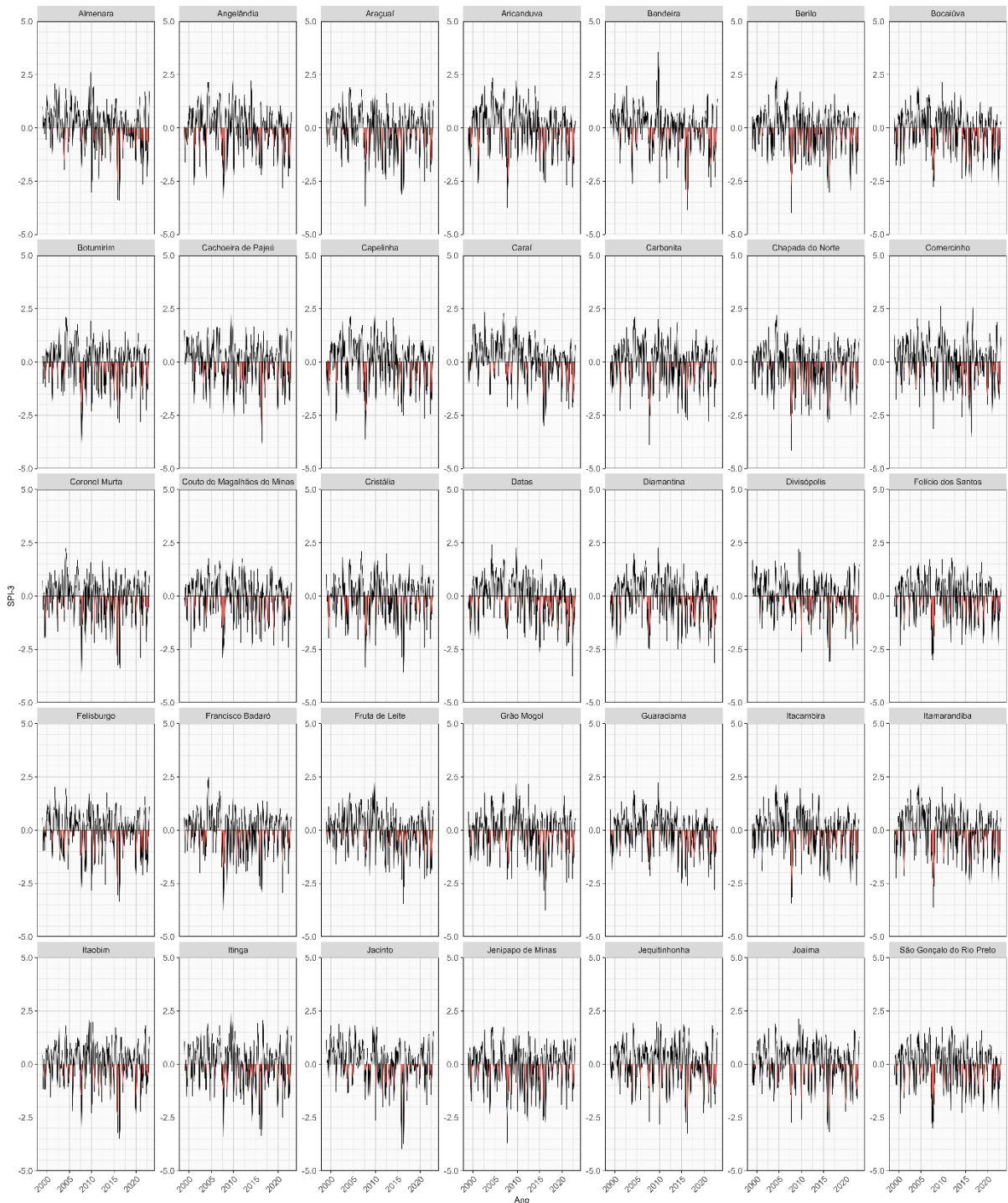
Fonte: Autora (2025).

APÊNDICE E – Classificações (Dr) e pesos (Dw) para categorias de seca, juntamente com as probabilidades de ocorrência para o SPI-12.

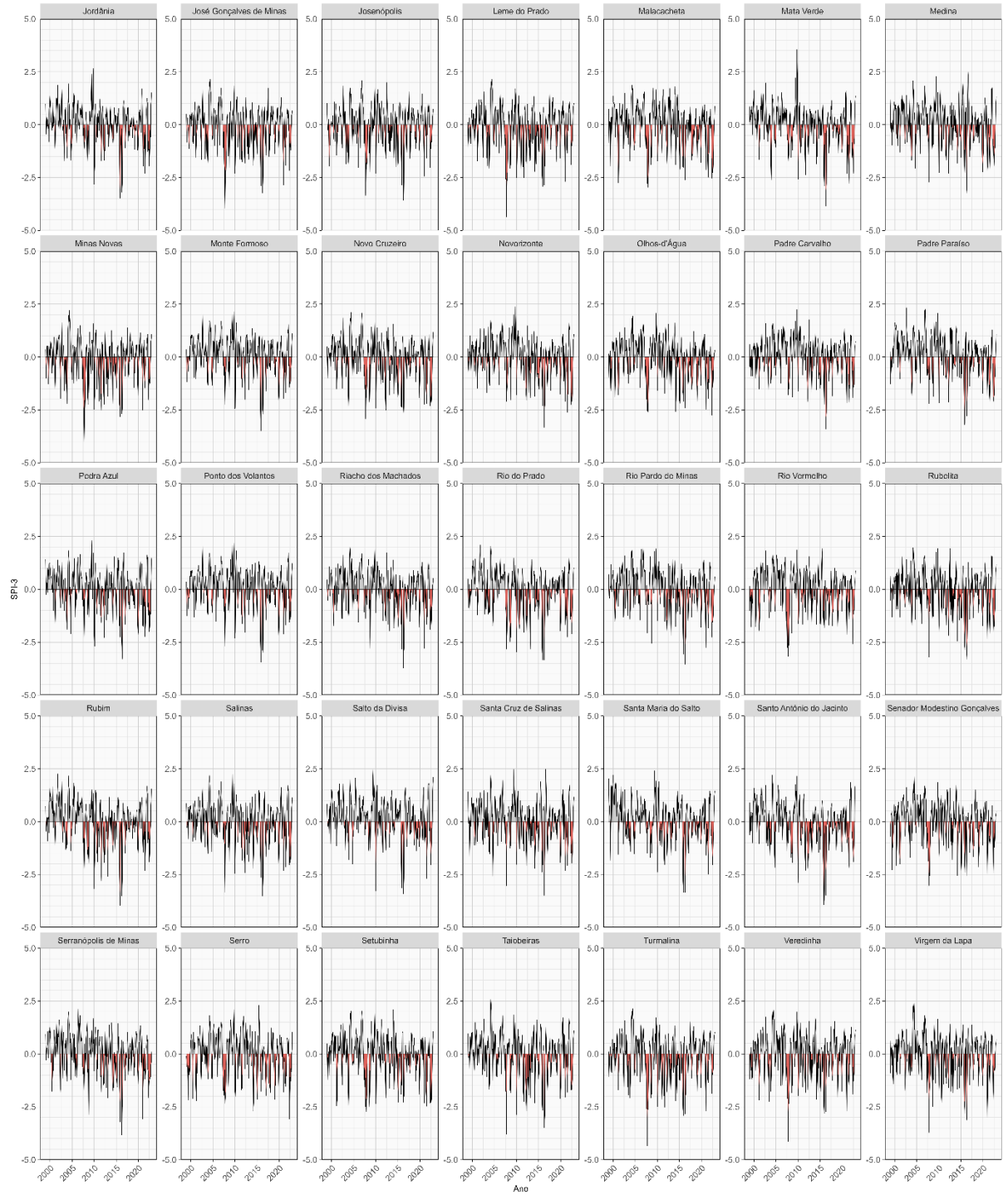
Intervalos			Categoria	Peso (Dw)	Probabilidade de ocorrência	Classificação (Dr)
Duração	Magnitude	Intensidade				
SPI > 32,5	SPI ≤ -39,3	SPI ≤ -1,1	Extrema (E)	4	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1
17,5 < SPI ≤ 32,5	-39,3 < SPI ≤ -18,0	-1,1 < SPI ≤ -0,7	Severa (S)	3	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1
6,5 < SPI ≤ 17,5	-18,0 < SPI ≤ -6,0	-0,7 < SPI ≤ -0,3	Moderada (M)	2	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1
1,0 ≤ SPI ≤ 6,5	-6,0 ≤ SPI ≤ 0	-0,3 ≤ SPI ≤ 0	Baixa (B)	1	Muito alta	4
					alta	3
					baixa	2
					Muito baixa	1

Fonte: Autora (2025).

APÊNDICE F – SPI-3 - Período de 1999 a 2023

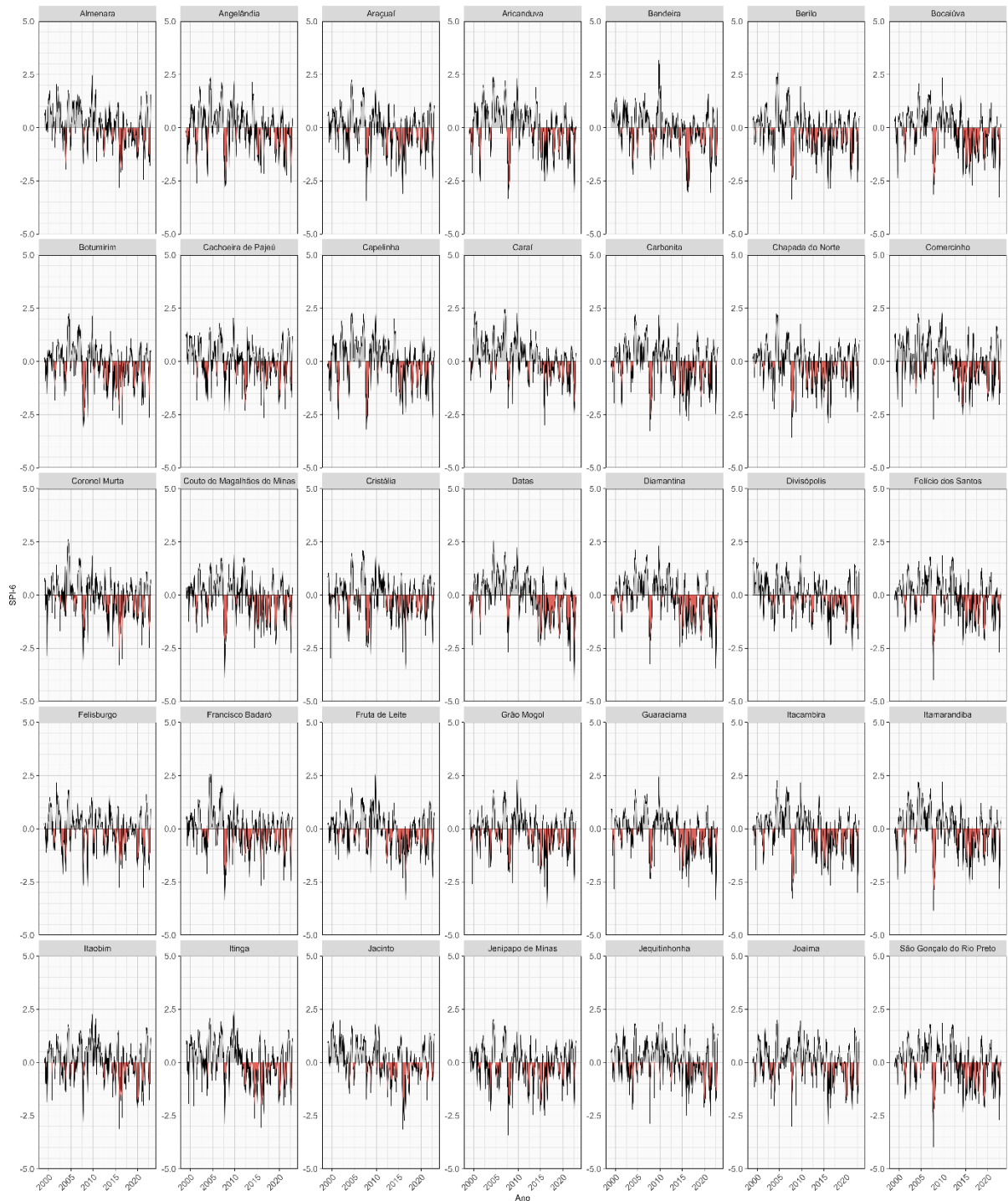


Fonte: Autora (2025).

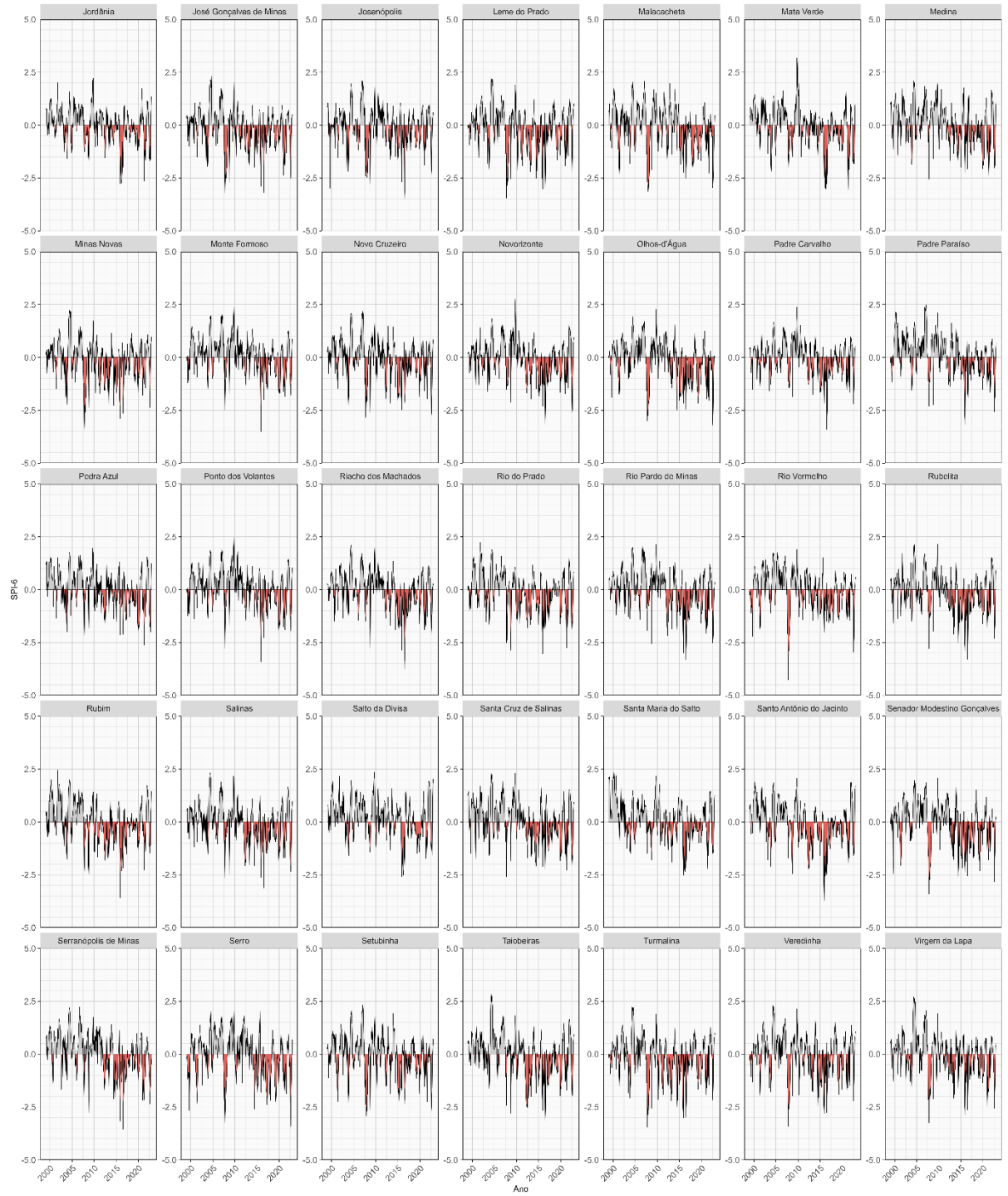


Fonte: Autora (2025).

APÊNDICE G – SPI-6 - Período de 1999 a 2023

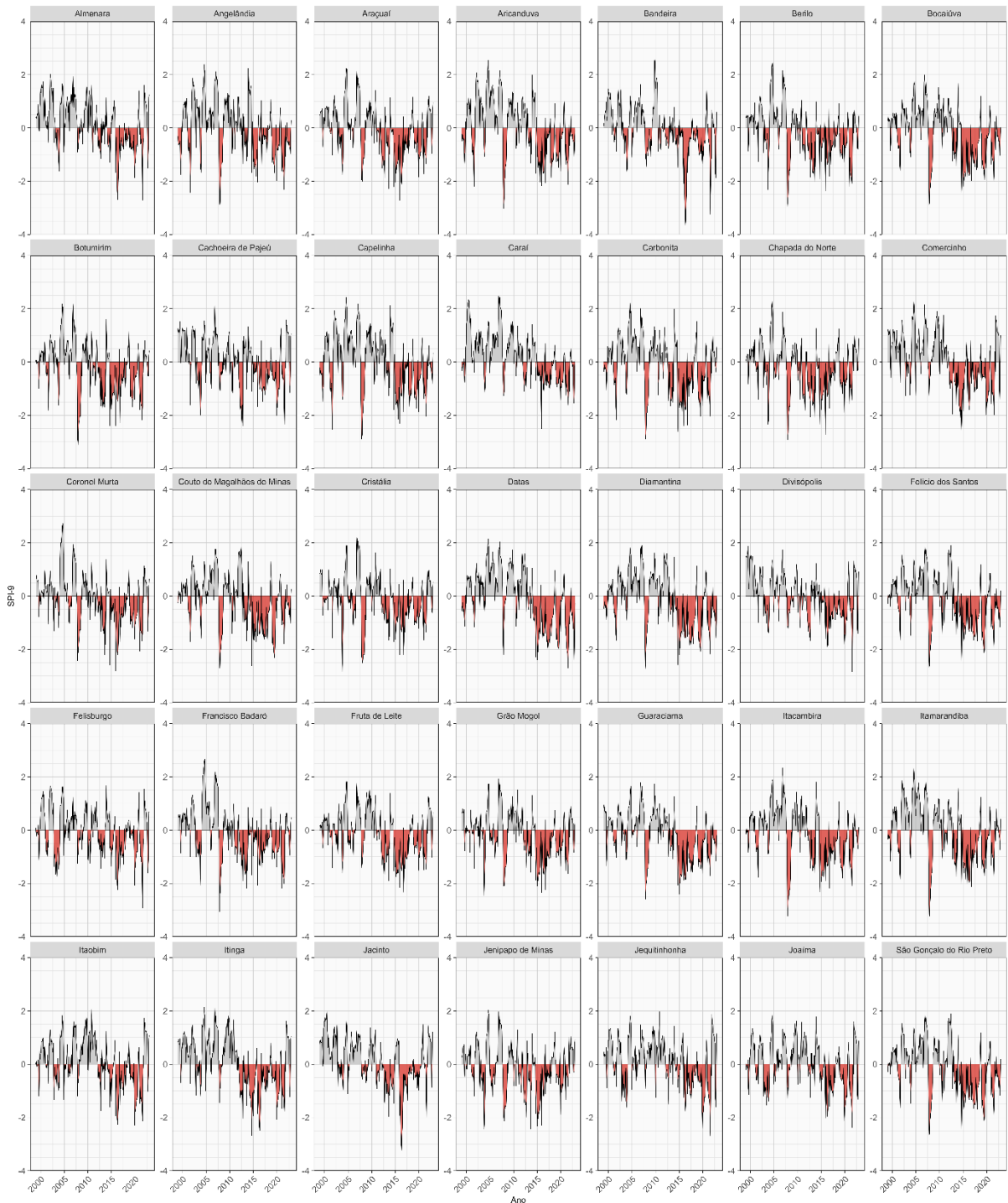


Fonte: Autora (2025).

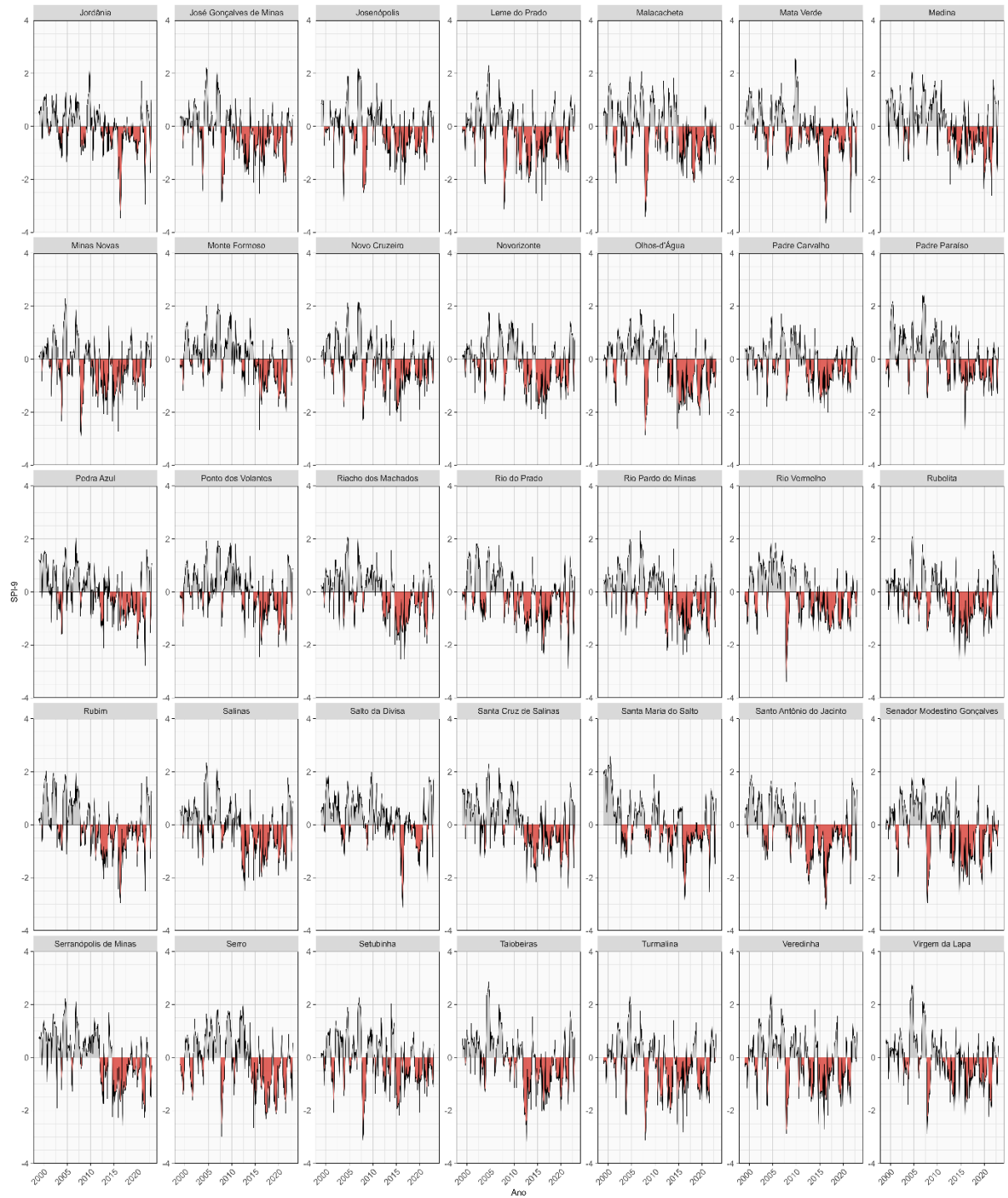


Fonte: Autora (2025).

APÊNDICE H – SPI-9 - Período de 1999 a 2023

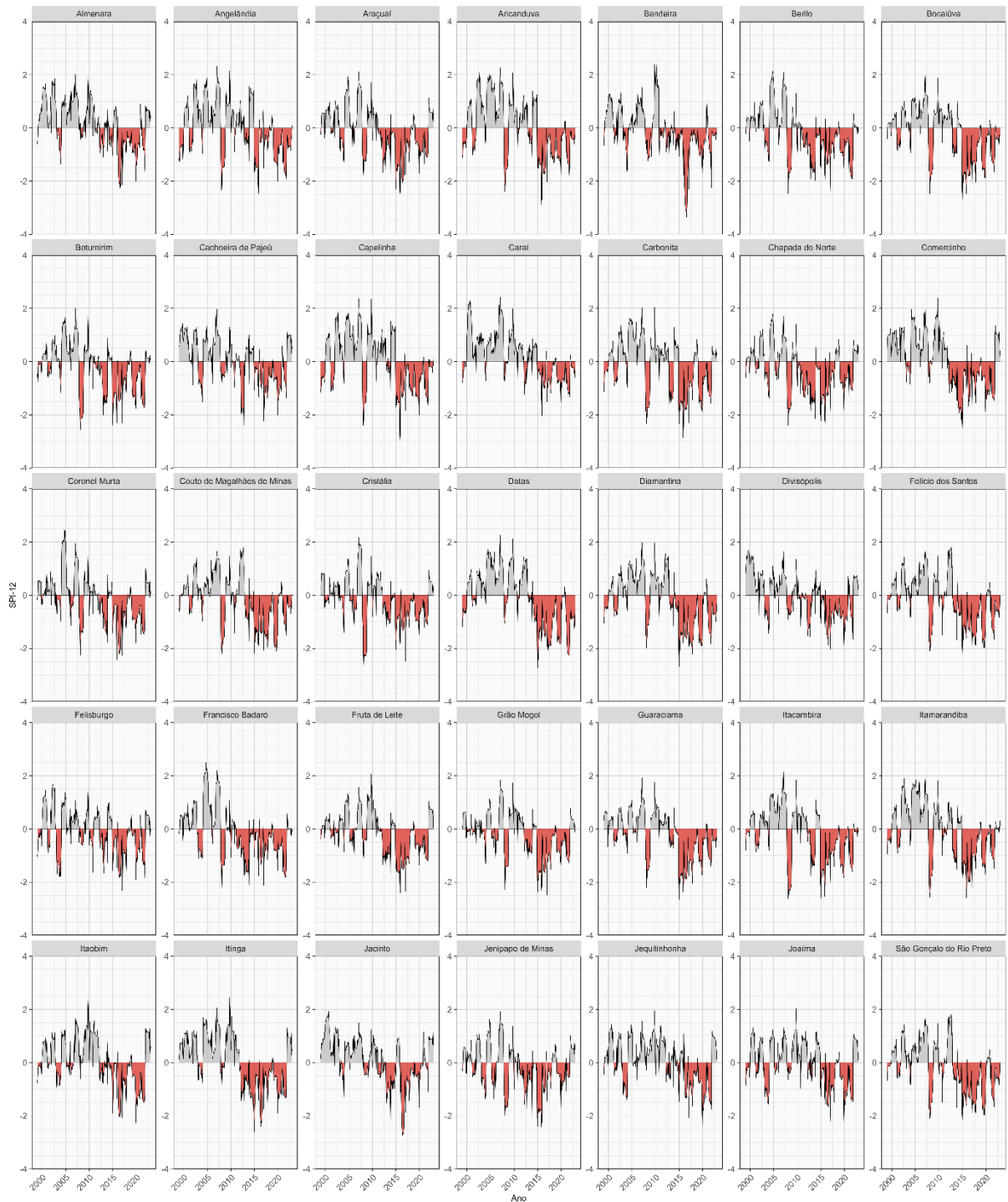


Fonte: Autora (2025).

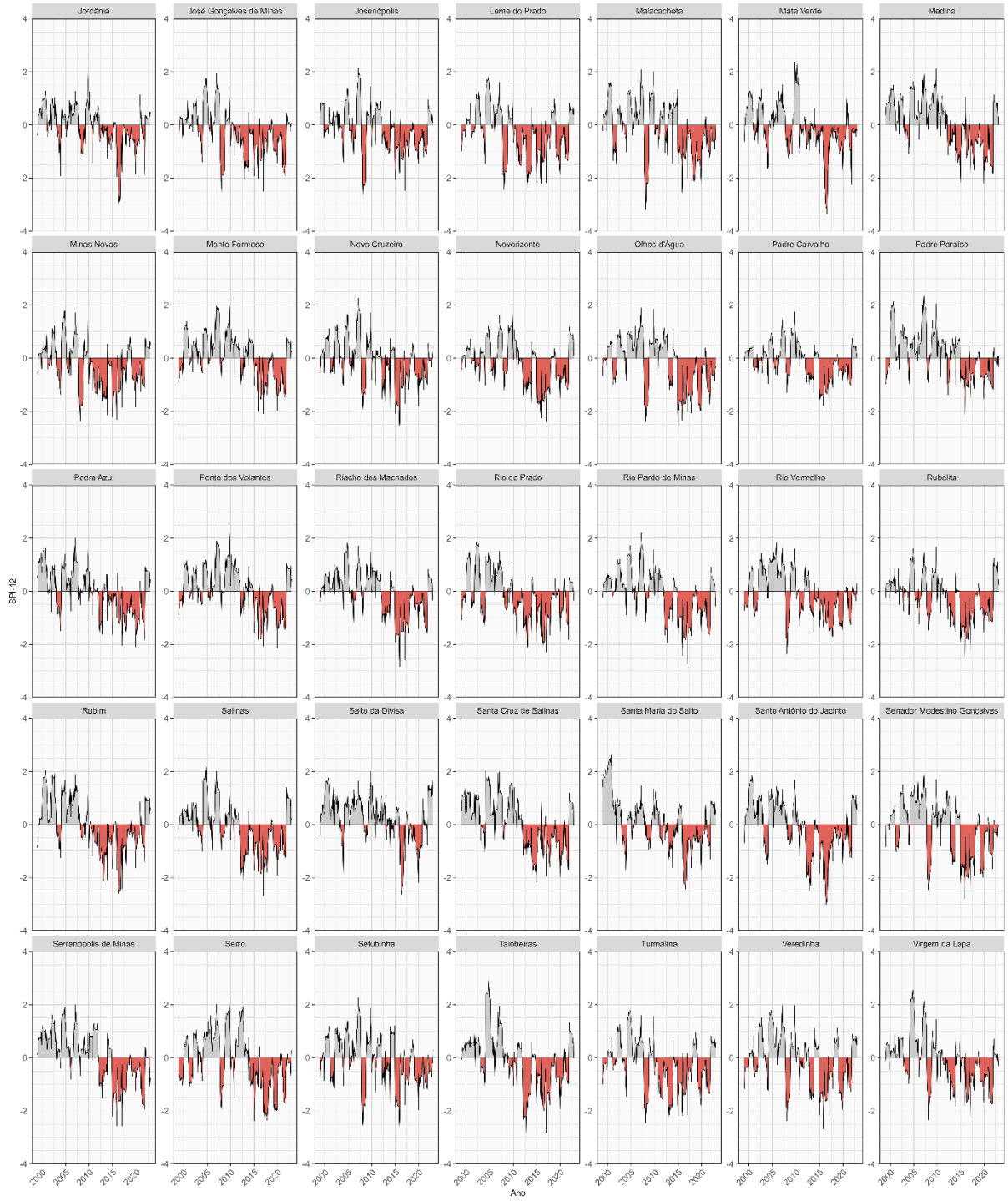


Fonte: Autora (2025).

APÊNDICE I – SPI-12 – Período de 1999 a 2023



Fonte: Autora (2025).



Fonte: Autora (2025).