Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

IMPACTOS DAS SECAS NA PRODUÇÃO DE FEIJÃO E MILHO NA MESORREGIÃO NORTE DE MINAS GERAIS

Impacts of drought on bean and corn production in the northern mesorregion of Minas Gerais

Impactos de las sequías en la producción de frijol y maíz en la mesorregión norte de Minas Gerais

Gabriella Guedes Rocha
Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira (UNIFEI)
gabriellaguedesr@unifei.edu.br

Ana Carolina Vasques Freitas
Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira (UNIFEI)
ana.freitas@unifei.edu.br

Ana Paula Martins do Amaral Cunha
Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN)
ana.cunha@cemaden.gov.br

Resumo: A presente pesquisa buscou analisar a ocorrência de secas e investigar o impacto das mesmas na produtividade de milho e feijão na mesorregião norte de Minas Gerais. A abordagem incluiu primeiramente a análise das ocorrências de seca em 25 municípios identificados pelo Sistema de Informações de Desastres (S2iD). Posteriormente, utilizando dados de precipitação e evapotranspiração potencial e informações sobre a produtividade de milho e feijão, obtidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), foi possível realizar análises espaciais de tendência para cada variável considerada. Os resultados indicaram tendências significativas de redução na precipitação e no Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) e de aumento na evapotranspiração durante o período de 2003 a 2019. Paralelamente, observou-se uma diminuição no rendimento médio da produção de milho (em 57% dos municípios) e feijão (em 70% dos municípios) para o mesmo intervalo temporal. Correlações positivas foram observadas entre o rendimento dos grãos e a precipitação e entre o rendimento e o SPEI. Valores negativos de correlação foram observados entre o rendimento dos grãos e a evapotranspiração. Os resultados obtidos podem oferecer subsídios valiosos para a formulação de estratégias de adaptação e mitigação diante de condições climáticas adversas.

Palavras-chave: Mudança Climática. Evapotranspiração. Agricultura.

Abstract: This research sought to analyze the occurrence of droughts and investigate their impact on corn and bean productivity in the northern mesoregion of Minas Gerais. The approach first included the analysis of drought occurrences in 25 municipalities identified by the Disaster Information System (S2iD). Subsequently, using data on precipitation and potential evapotranspiration and information on c orn and bean productivity, obtained by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), it was possible to carry out spatial trend analysis for each variable considered. The results indicated significant trends of reduction in precipitation and the Standardized Evapotranspiration Precipitation Index (SPEI) and increase in evapotranspiration during the period from 2003 to 2019. At the same time, a decrease in the average yield of corn production was observed (by 57% municipalities) and beans (in 70% of municipalities) for the same time interval. Positive correlations were observed between grain yield and precipitation and between yield and SPEI. Negative correlation values were observed between grain yield and evapotranspiration. The results obtained can offer valuable information for formulating adaptation and mitigation strategies in the face of adverse climatic conditions.

Keywords: Climate change. Evapotranspiration. Agriculture.

Resumen: Esta investigación buscó analizar la ocurrencia de sequías e investigar su impacto en la productividad de maíz y frijol en la mesorregión norte de Minas Gerais. El enfoque incluyó primero el análisis de la ocurrencia de sequías en 25 municipios identificados por el Sistema de Información de Desastres (S2iD). Posteriormente, utilizando datos sobre precipitación y evapotranspiración potencial e información sobre productividad de maíz y frijol, obtenidos por el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE), fue posible realizar análisis de tendencia espacial para cada variable considerada. Los resultados indicaron tendencias significativas de reducción de la precipitación y del Índice de Precipitación por Evapotranspiración Estandarizada (SPEI) y aumento de la evapotranspiración durante el período de 2003 a 2019. Al mismo tiempo, se observó una disminución en el rendimiento promedio de la producción de maíz (en un 57% municipios) y frijol (en el 70% de los municipios) para el mismo intervalo de tiempo. Se observaron correlaciones positivas entre rendimiento de grano y precipitación y entre rendimiento y SPEI. Se observaron valores de correlación negativos entre el rendimiento de grano y la evapotranspiración. Los resultados obtenidos pueden ofrecer información valiosa para formular estrategias de adaptación y mitigación ante condiciones climáticas adversas.

Palabras clave: Cambio Climático. Evapotranspiración. Agricultura.

Submetido em: 10/12/2023
Aceito para publicação em: 19/03/2024
Artigo Publicado em: 14/04/2024

1. INTRODUÇÃO

A água desempenha um papel crucial na sustentação da vida e no progresso da sociedade, servindo como recurso para atividades domésticas, insumo na agricultura e indústria, suporte para manutenção do equilíbrio dos ecossistemas e, ao mesmo tempo, tendo sua disponibilidade ameaçada pelos eventos extremos (ATAÍDE, 2021). Cada atividade demanda características específicas relacionadas à quantidade ou qualidade da água, sendo dependente e influenciando, portanto, as condições naturais das águas superficiais e subterrâneas (ANA, 2020).

O clima global está passando por alterações, resultando em eventos climáticos extremos mais frequentes e intensos, como altas temperaturas, chuvas volumosas e períodos de seca (MARENGO *et al.*, 2016). Entre os fenômenos naturais adversos, a seca se destaca como o que mais impacta a sociedade, afetando vastas áreas territoriais por longos períodos.

As secas são eventos climáticos naturais, caracterizados por um déficit de precipitação em relação à uma condição normal para uma região, sem início definido, podendo ocorrer em praticamente todas as zonas climáticas (GONÇALVES *et al.*, 2021). Esses eventos podem ser detectados por meio de dados meteorológicos e hidrológicos de uma determinada região. A análise de eventos recorrentes de secas pode subsidiar a identificação de áreas vulneráveis e auxiliar na tomada de decisão para garantia de atendimento às demandas hídricas de cada região (GONÇALVES *et al.*, 2021).

Segundo Moreira (2016), as secas têm impacto significativo em uma região, afetando diversos setores, como agricultura, pecuária, abastecimento de água, turismo e a vida humana em geral, e em comparação com outros desastres ambientais, esses eventos afetam uma área geográfica maior, se desenvolvendo de forma lenta, sendo que as medidas empregadas na mitigação de impactos de outros desastres naturais, muitas vezes não são aplicáveis quando se trata de secas.

Estudos apontam que a ocorrência de secas tem se intensificado nos últimos anos, em muitos países, devido às mudanças climáticas, sendo agravada pelo crescente aumento na demanda por recursos hídricos (NAUMANN, 2021; BATISTA-ALBUQUERQUE *et al.*, 2022).

No Estado de Minas Gerais há uma grande diversidade no que se refere a aspectos físicos, tais como relevo, clima e vegetação, bem como diversidades no aspecto

socioeconômico, com desigualdade na divisão de renda e condições de vida da população (ESPÍNDOLA, 2009). Particularmente, a região norte do estado mineiro está inserida no domínio do clima semiárido e, portanto, apresenta características semelhantes ao interior da região Nordeste do país, tanto que a Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – Sudene incluiu esta região no seu campo de atuação (SUDENE, 2021). Nesse sentido, a região norte de Minas Gerais é a que contribui com o maior número de municípios enquadrados na nova delimitação do semiárido brasileiro, realizada em 2005, representando um total de 54, sendo que um dos critérios utilizados para tal definição foi o índice de aridez (BRASIL, 2005).

Ao longo das últimas décadas, flutuações climáticas, como excesso ou escassez de chuvas, geadas e outros fenômenos, resultaram em significativas reduções na produção agropecuária. As perdas de grãos somente no ano de 2020, estimadas com base nos dados da Companhia Nacional de Abastecimento, totalizaram aproximadamente 36,7 milhões de toneladas (CONAB, 2023).

A agricultura exerce um papel fundamental no Estado de Minas Gerais, sendo que o mesmo ocupou a sexta posição em 2022 entre os dez principais produtores nacionais (MAPA, 2022). De acordo com o Balanço do Agronegócio de Minas Gerais elaborado pela Secretaria da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (SEAPA, 2023), o estado participou com 11,1% do valor bruto de produção nacional em 2022, sendo que as lavouras representaram 66,1% de todo o faturamento do estado, alcançando R$87,5 bilhões. Os grãos são cultivados em todas as regiões do estado, sendo a produção bastante diversificada, com algodão herbáceo, amendoim, arroz, girassol, feijão, milho, trigo, soja e sorgo (SEAPA, 2023). Contudo, os grãos mais exportados da safra 2021/2022 foram soja (5,8 milhões de toneladas), milho (475 mil toneladas), algodão (19,8 mil toneladas) e feijão (3 mil toneladas) (SEAPA, 2023). O norte de Minas Gerais contribuiu no ano de 2021 para a produção desses grãos no estado com as seguintes porcentagens: 16% (algodão herbáceo), 5% (feijão), 3% (milho) e 3% (soja) (SEAPA, 2023).

Um dos índices mais utilizados para o monitoramento de ocorrências de secas é o Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração - SPEI, que é multiescalar e baseado em dados climáticos (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2010). Este índice pode ser usado para determinar o início, duração e magnitude das condições de seca em relação às condições

normais em uma variedade de sistemas naturais e geridos, como culturas, ecossistemas, rios, recursos hídricos, entre outros (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2010).

A agricultura tem sido, ao longo dos séculos, intrinsecamente ligada às condições naturais. Essa interdependência não apenas exige dos técnicos e agricultores um profundo respeito, mas também apresenta constantemente desafios crescentes e mais complexos à sua habilidade de superar obstáculos (SEAPA, 2023).

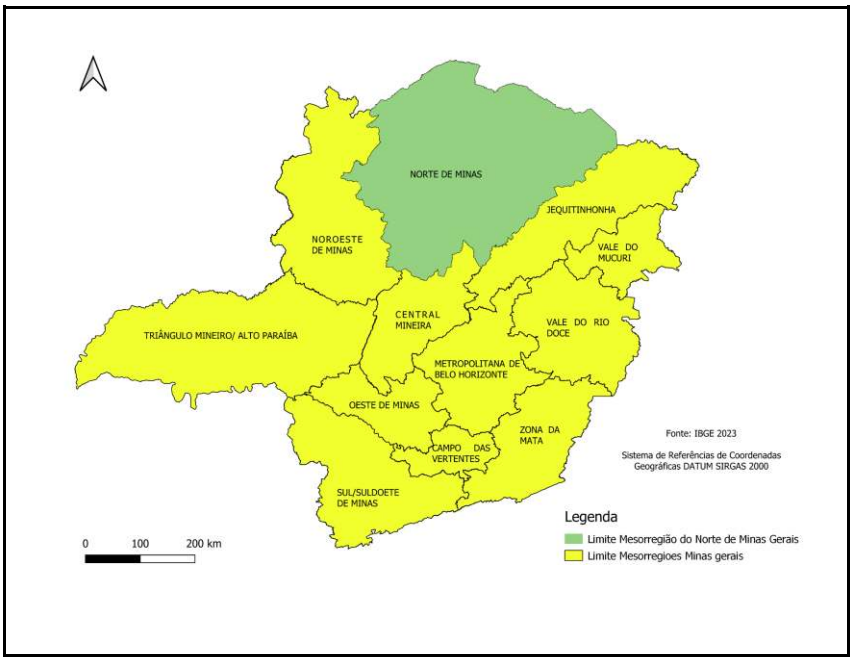
Portanto, esse estudo tem como objetivo analisar os eventos de seca nos municípios da mesorregião norte de Minas Gerais, por meio do índice SPEI, e seus impactos na produção de feijão e milho. Espera-se que os resultados obtidos com este estudo possam fornecer subsídios para o desenvolvimento de políticas e estratégias que promovam a resiliência e a adaptação aos eventos de seca, visando mitigar seus impactos e garantir a sustentabilidade e a segurança alimentar dessas regiões vulneráveis.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

A mesorregião Norte de Minas Gerais (Figura 1) localiza-se entre os paralelos de 14º24'0" e 17º33'0" de latitude sul e entre os meridianos de 41º56'0" e 45º44'0" de longitude oeste de Greenwich. A região é constituída por sete microrregiões (Montes Claros, Salinas, Grão Mogol, Janaúba, Januária, Bocaiúva e Pirapora), perfazendo um total de 89 municípios distribuídos em uma área de 128.451 km², 1.722.156 habitantes e densidade 13,4 hab./km² (CIDADE-BRASIL, 2023).

Figura 1 - Localização da Área de Estudo: Mesorregião Norte de Minas Gerais

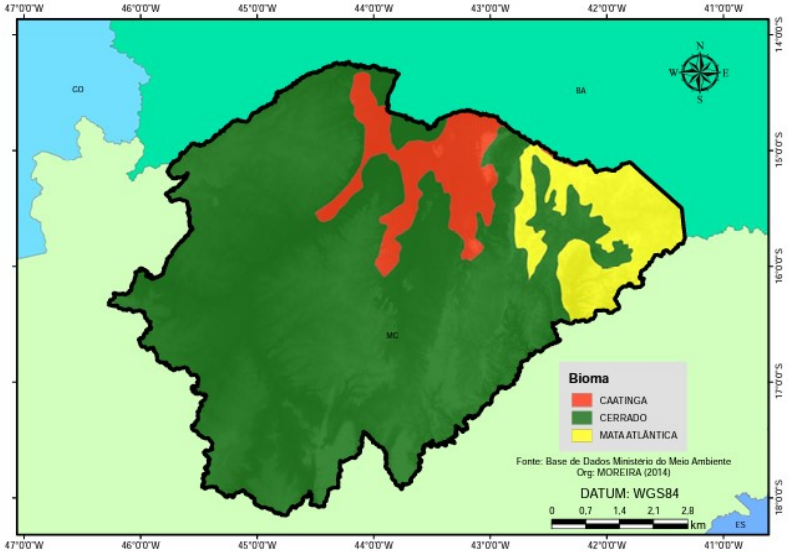


Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Em termos de elevação, a mesorregião norte apresenta altitudes de até 1.797 metros. Desta forma, em áreas superiores a 700 metros têm-se a Serra do Espinhaço, Planalto dos Geraizeiros, Chapadas do Rio São Francisco, Chapadas, Planaltos e Patamares dos Rios Jequitinhonha/Pardo, Patamares dos Rios São Francisco/Tocantins e Serra da Saudade. Em altitudes inferiores a 700 metros, há as Depressões do Alto-Médio Rio São Francisco e Baixadas dos Rios Jacaré/Salitre e as Planícies Fluviais e/ou Fluviolacustres (IBGE, 2010).

De acordo com a Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais (SEAPA, 2023), a cobertura vegetal de Minas Gerais se divide em quatro biomas principais: Mata Atlântica, Cerrado, Campos de Altitude ou Rupestres e Mata Seca. Diversos fatores, como clima, relevo e bacias hidrográficas contribuem para essa variedade de biomas. A vegetação de Cerrado, contudo, é predominante, aparecendo em cerca de 50% do Estado, especialmente nas bacias dos rios São Francisco e Jequitinhonha. No caso da mesorregião norte de Minas Gerais, o Cerrado também predomina, embora estejam presentes os biomas da Caatinga e Mata Atlântica (CARVALHO, 2014) (Figura 2).

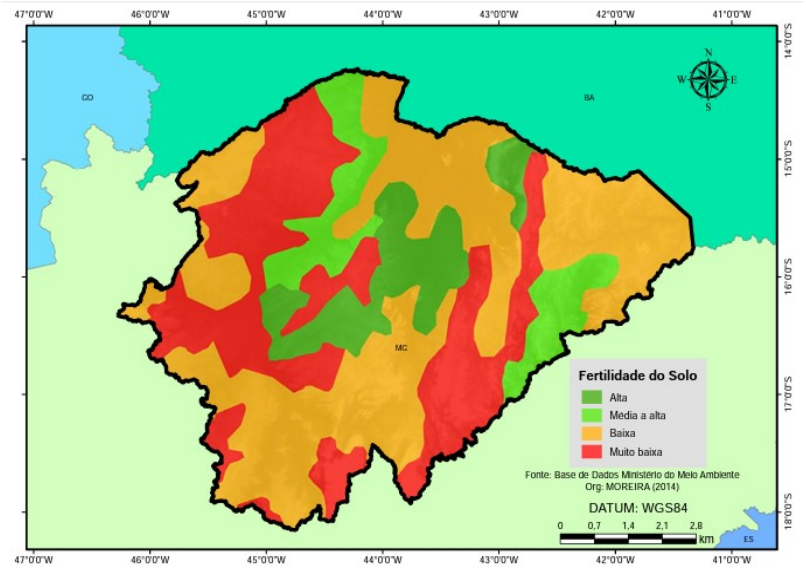
Figura 2 - Biomas da mesorregião norte de Minas Gerais.



Fonte: Moreira (2014).

Quanto à fertilidade dos solos na região de estudo (Figura 3), esses são em sua grande maioria, de baixa e de muito baixa fertilidade, devido a sua composição, sendo formados por materiais altamente lixiviados, ricos em alumínio e com concentração de pedregulhos (CPRM, 2010). A maioria dos solos da região são ácidos e de difícil correção, além do que, devido aos seus constituintes e alta permeabilidade, possuem baixa capacidade de retenção de umidade, de nutrientes e de assimilar matéria orgânica (CPRM, 2010).

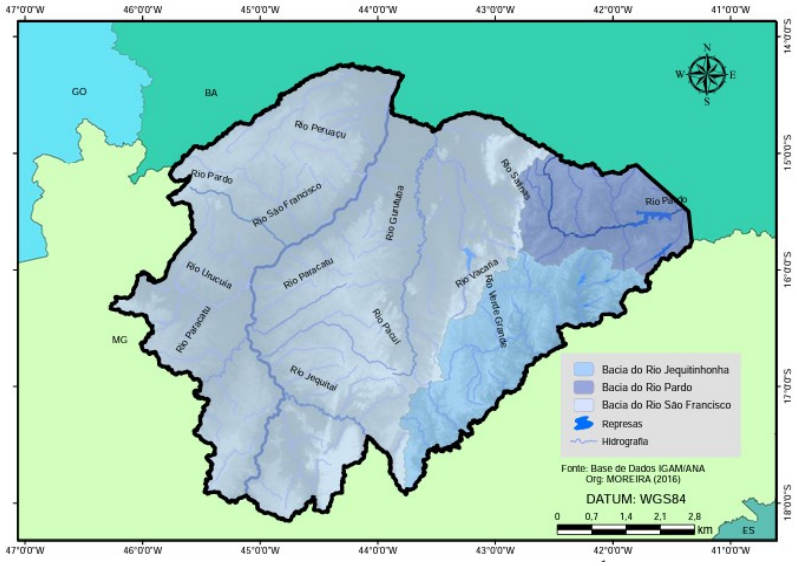
Figura 3 - Fertilidade do solo da mesorregião norte de Minas Gerais



Fonte: Moreira (2014).

A bacia predominante na mesorregião norte de Minas Gerais é a do Rio São Francisco, embora estejam presentes a bacia do Rio Pardo e do Rio Jequitinhonha (MOREIRA, 2014) (Figura 4).

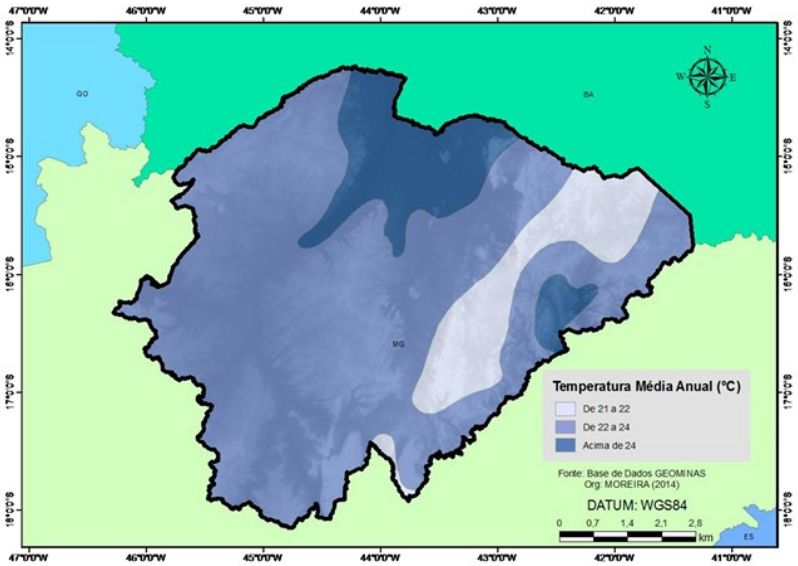
Figura 4 - Bacias Hidrográficas Federais da mesorregião norte de Minas Gerais



Fonte: Moreira (2014).

A temperatura média anual varia entre 22 a 24 ºC para a maior parte da região (Figura 5). As altas temperaturas durante todo o ano colaboram no aumento da evapotranspiração (MOREIRA, 2014).

Figura 5 - Temperatura média anual da mesorregião norte de Minas Gerais



Fonte: Moreira (2014).

O norte de Minas Gerais apresenta características físicas semelhantes à região semiárida do Nordeste do Brasil, possuindo temperaturas elevadas, irregularidade pluviométrica e recorrência de secas. Devido a estas semelhanças a região foi inserida na área de atuação da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE).

2.2. Dados e Procedimentos Metodológicos

Nesse estudo foram utilizados os dados diários de precipitação e evapotranspiração potencial de Xavier *et al.* (2022), abrangendo um período de aproximadamente 60 anos, de 01/01/1961 a 31/07/2020. A partir desses dados, procedeu-se ao cálculo dos totais mensais de precipitação e evapotranspiração potencial na mesorregião norte de Minas Gerais, empregando o software Climate Data Operators (CDO).

Primeiramente, foi feito um levantamento dos municípios da mesorregião norte com maior ocorrência de secas cadastradas na Plataforma do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD) entre 1991 e 2012, sendo identificados 25 municípios. Os totais mensais de precipitação e evapotranspiração potencial foram extraídos para esses 25 municípios da região. Posteriormente, efetuou-se o cálculo do balanço hídrico para cada uma dessas localidades, que corresponde à diferença entre a precipitação e a evapotranspiração.

Para a análise dos dados de balanço hídrico desses municípios utilizou-se o software Rstudio, empregando o pacote SPEI versão 1.7 para calcular o índice na escala de 12 meses, conhecido como SPEI-12. De acordo com Vicente-Serrano *et al.* (2010) o Índice Padronizado de Evapotranspiração de Precipitação (SPEI) representa uma extensão do amplamente adotado Índice Padronizado de Precipitação (SPI). O SPEI foi desenvolvido para levar em consideração tanto a precipitação quanto a evapotranspiração potencial (PET) no contexto da avaliação da seca. Diferentemente do SPI, o SPEI incorpora o impacto predominante do aumento das temperaturas na demanda por água. Assim como o SPI, o SPEI pode ser calculado em diferentes intervalos temporais (p.e. de 1 a 48 meses).

A análise resultante consistiu na identificação de eventos de seca em cada um dos municípios selecionados. Um evento de seca foi considerado como tendo início quando o valor do SPEI permaneceu abaixo de -1 por dois meses consecutivos, e foi encerrado quando o valor do SPEI se manteve positivo por, pelo menos, dois meses consecutivos. É importante observar que esses meses com valores positivos não foram incluídos nos cálculos de duração, magnitude e intensidade média dos eventos de secas.

A fim de determinar a duração do período de seca, somaram-se os meses compreendidos entre o início e o término do evento. A magnitude ou severidade foi calculada como a soma dos valores do SPEI ao longo desse período. A intensidade média foi obtida através da razão entre a magnitude e a duração do evento.

Foi realizado também o cálculo de frequência dos eventos, de acordo com cada categoria de seca (fraca, moderada, grave, extrema e excepcional). Nesse contexto, de acordo com o Monitor de Secas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), valores de SPEI situados entre -0,5 e -0,7 indicam um período de seca fraca, enquanto aqueles entre -0,8 e -1,2 caracterizam uma seca moderada. Já valores entre -1,3 e -1,5 representam uma seca grave, e de -1,6 a -1,9 indicam uma seca extrema. Qualquer valor abaixo de -2,0 é classificado como seca excepcional. Essas categorias oferecem uma classificação abrangente dos graus de intensidade da seca, proporcionando uma compreensão mais detalhada das condições climáticas em relação ao índice SPEI-12.

Devido ao fato de que nem todos os municípios que apresentam ocorrências de secas fazem o cadastro desses eventos na plataforma S2iD e a necessidade de visualização espacial do SPEI, esse índice também foi calculado para todos os municípios da mesorregião norte de

Minas Gerais utilizando todos os pontos de grade dos dados de Xavier *et al.* (2022) por meio do código em linguagem Python disponibilizado pelo NOAA's National Integrated Drought Information System (NIDIS) (ADAMS, 2017). Deve-se ressaltar que esses dados se encontram em uma resolução espacial de 0,1º de latitude por 0,1º de longitude. Após isso, foi aplicado no software QGIS a ferramenta "estatística zonal" para obter o valor médio de SPEI em cada limite de polígonos dos 89 municípios da mesorregião norte de Minas Gerais e, assim, gerar o mapa de SPEI para a região. A mesma ferramenta foi aplicada para gerar os mapas e a série histórica dos dados de precipitação e evapotranspiração potencial para cada um dos 89 municípios.

Os dados de produção agrícola e rendimento médio da cultura foram obtidos da Pesquisa de Produção Agrícola Municipal (PAM), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que são disponibilizados no Sistema de Recuperação Automática (SIDRA). Em relação à produção de grãos, considerou-se a produção anual do milho e do feijão por Rendimento Médio Anual da Produção (kg ha^{-1}), uma vez que estas são as principais culturas de sequeiro, que se refere ao tipo de plantio que não exige que o ser humano realize o processo de irrigação com água, utilizando apenas a água da chuva, fazendo o uso da umidade existente no solo. É o tipo de agricultura que ocorre em regiões semi-áridas, cuja precipitação média anual é inferior a 500 mm. Essas também são as culturas que possuíam série histórica com menor quantidade de dados ausentes.

Assim, finalmente, foram geradas séries históricas, no período de 2003 a 2019 (devido a disponibilidade dos dados do PAM), para o rendimento de cada grão, precipitação, evapotranspiração potencial e SPEI para cada um dos 89 municípios da mesorregião norte. As tendências de cada série histórica foram analisadas por meio do teste Mann-Kendall com significância estatística de 95% e foi realizado o cálculo da correlação entre o rendimento de cada grão e as outras séries. A inclinação de Theil-Sen do teste Mann-Kendall e o p-valor para cada série foram obtidos no Rstudio utilizando a biblioteca trend.

A eficácia e confiabilidade de qualquer análise estatística, como o teste de Mann-Kendall, dependem da qualidade dos dados utilizados. Dada a relevância do PAM na obtenção de informações do Rendimento Médio Anual da Produção para a avaliação de desempenho das culturas, a falta de dados compromete a capacidade de realizar uma análise abrangente e precisa. Vale ressaltar que o teste Mann-Kendall não é aplicável quando há dados ausentes na

série temporal, uma vez que a presença de dados incompletos pode distorcer os resultados e prejudicar a validade estatística das conclusões. Portanto, as análises realizadas nesse estudo não contemplaram outros grãos, como algodão e soja, que possuem relevância na área de estudo, pois estes apresentaram uma grande quantidade de dados ausentes na série histórica.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Análise das ocorrências de Secas

Os 25 municípios que apresentaram as maiores ocorrências de secas, de acordo com os dados da Plataforma S2iD, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Síntese das ocorrências de seca na mesorregião norte de Minas Gerais entre 1991 e 2012.

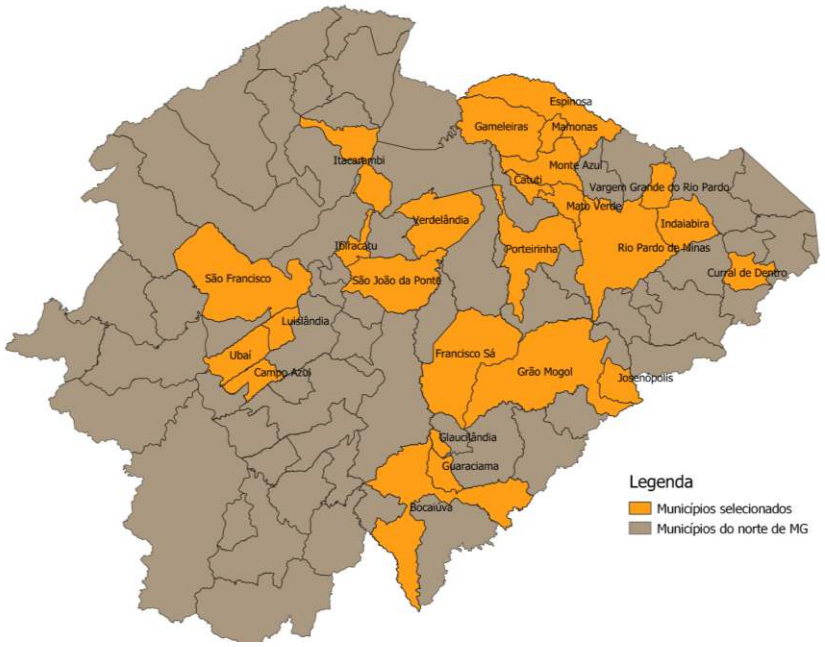
Ocorrências	Município
20	ESPINOSA
20	FRANCISCO SÁ
20	UBAÍ
20	INDAIABIRA
19	GUARACIAMA
19	GRÃO MOGOL
19	JOSENÓPOLIS
19	GAMELEIRAS
19	MATO VERDE
19	SÃO FRANCISCO
19	IBIRACATU
19	SÃO JOÃO DA PONTE
19	RIO PARDO DE MINAS
18	BOCAIÚVA
18	CATUTI
18	MAMONAS
18	MONTE AZUL
18	PORTEIRINHA
18	ITACARAMBI
18	CAMPO AZUL
18	GLAUCILÂNDIA
18	LUISLÂNDIA
18	VERDELÂNDIA
18	CURRAL DE DENTRO
18	VARGEM GRANDE DO RIO PARDO

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Pode-se verificar que os municípios de Espinosa, Francisco Sá, Ubaí e Indaiabira são os que apresentaram o maior número de ocorrências (20).

O mapa representado na Figura 6 evidencia a posição geográfica dos municípios da Tabela 1, que apresentaram maior número de ocorrências de secas. É notável a ausência de um padrão espacial entre esses municípios, sendo uma possível explicação para tal fenômeno o fato de que nem todos os municípios que apresentam ocorrências de secas fazem a inserção das mesmas na plataforma. Essa ausência de registros por parte de outros municípios pode prejudicar a avaliação abrangente das ocorrências de seca; por isso, posteriormente, procedeu-se a análise em toda a região.

Figura 6 - Mapa da localização dos municípios com maiores ocorrências de secas na mesorregião norte de Minas Gerais.



Sistema de Referência de Coordenadas Geográficas DATUM SIRGAS 2000.

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Na Tabela 2 é possível verificar a magnitude e intensidade média dos eventos de seca ocorridos com maior tempo de duração em cada município selecionado. Os municípios que apresentaram as maiores durações e magnitude de secas foram Mamonas, Gameleiras e Catuti. Já os municípios de Glaucilândia, Monte Azul e Espinosa foram os que apresentaram as maiores intensidades médias (Tabela 2).

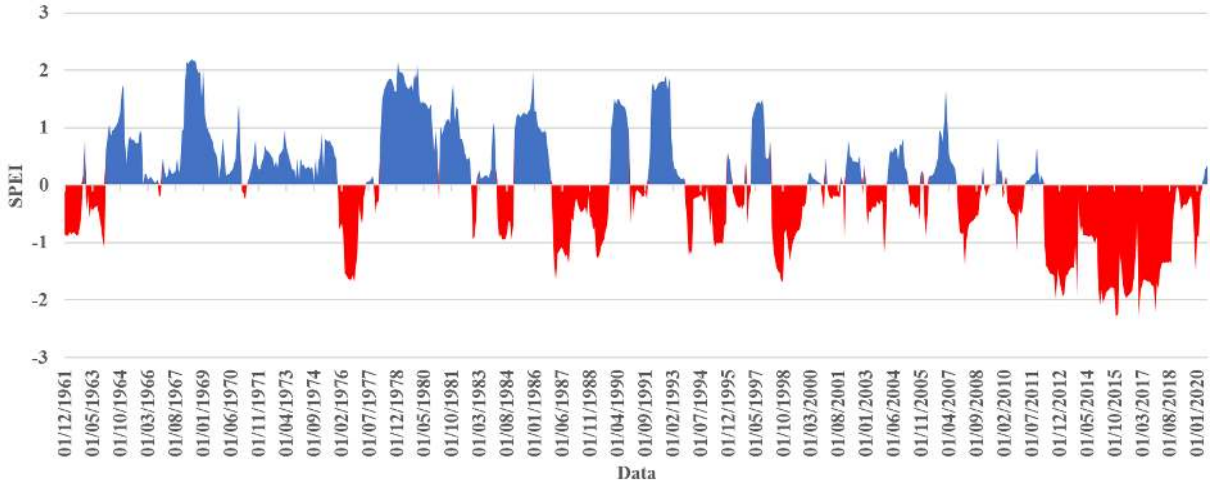
Tabela 2 - Magnitude e Intensidade Média dos eventos de seca ocorridos com maior tempo de duração em cada município selecionado.

Município	Período	Duração (meses)	Magnitude	Intensidade média
Bocaiúva	12/2012 a 07/2020	92	-111,18	-1,21
Campo Azul	12/2012 a 07/2020	92	-99,37	-1,08
Catuti	03/2012 a 02/2020	96	-122,30	-1,27
Curral de Dentro	12/2012 a 04/2020	89	-76,40	-0,86
Espinosa	03/2012 a 11/2018	81	-113,10	-1,40
Francisco Sá	12/2014 a 07/2020	68	-36,78	-0,54
Gameleiras	04/2012 a 06/2020	99	-125,46	-1,27
Glaucilândia	12/2014 a 09/2018	46	-68,31	-1,49
Grão Mogol	12/2014 a 07/2020	68	-77,76	-1,14
Guaraciama	12/2014 a 09/2018	46	-37,32	-0,81
Ibiracatu	01/2013 a 06/2020	90	-98,47	-1,09
Indaiabira	12/2014 a 09/2018	46	-43,71	-0,95
Itacarambi	12/2012 a 03/2020	88	-93,44	-1,06
Josenópolis	12/2012 a 07/2020	92	-100,23	-1,09
Luislândia	01/2013 a 07/2020	91	-110,32	-1,21
Mamonas	03/2012 a 04/2020	98	-129,40	-1,32
Mato Verde	03/2012 a 10/2018	80	-109,67	-1,37
Monte Azul	03/2012 a 10/2018	80	-116,33	-1,45
Porteirinha	12/2012 a 04/2020	89	-103,05	-1,16
Rio Pardo de Minas	12/2014 a 10/2018	47	-55,70	-1,19
São Francisco	12/2012 a 07/2020	92	-113,71	-1,24
São João da Ponte	01/2013 a 07/2020	91	-116,99	-1,29
Ubaí	12/2012 a 07/2020	92	-109,86	-1,19
Vargem Grande do Rio Pardo	12/2014 a 01/2018	38	-43,57	-1,15
Verdelândia	12/2012 a 05/2020	90	-112,63	-1,25

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

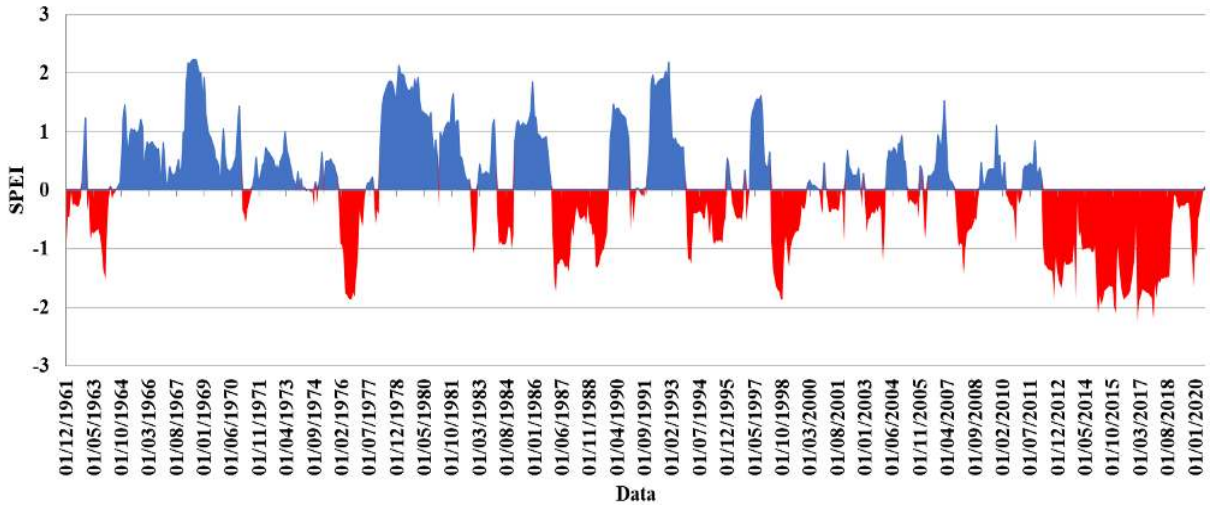
As figuras a seguir (Figuras 7, 8 e 9) apresentam o SPEI para os municípios de Mamonas, Gameleiras e Catuti no qual as barras em tonalidade vermelha denotam os períodos com déficit de precipitação. Pode-se notar nos três gráficos um aumento na ocorrência de episódios de seca nos últimos anos, especialmente o longo período que se estendeu de 2012 a 2020.

Figura 7 - SPEI-12 para o município de Mamonas



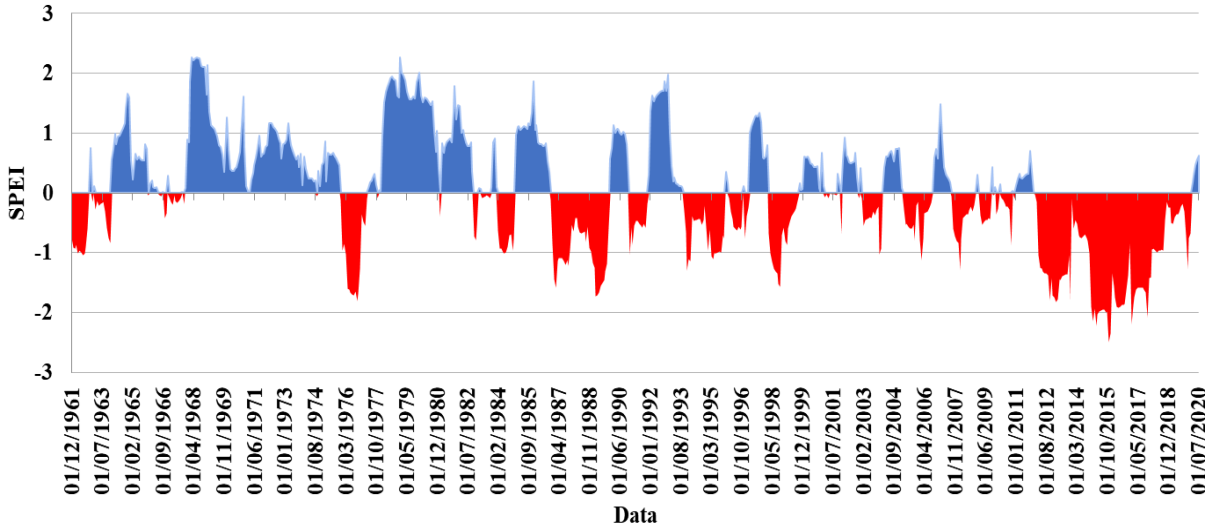
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 8 - SPEI-12 para o município de Gameleiras



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

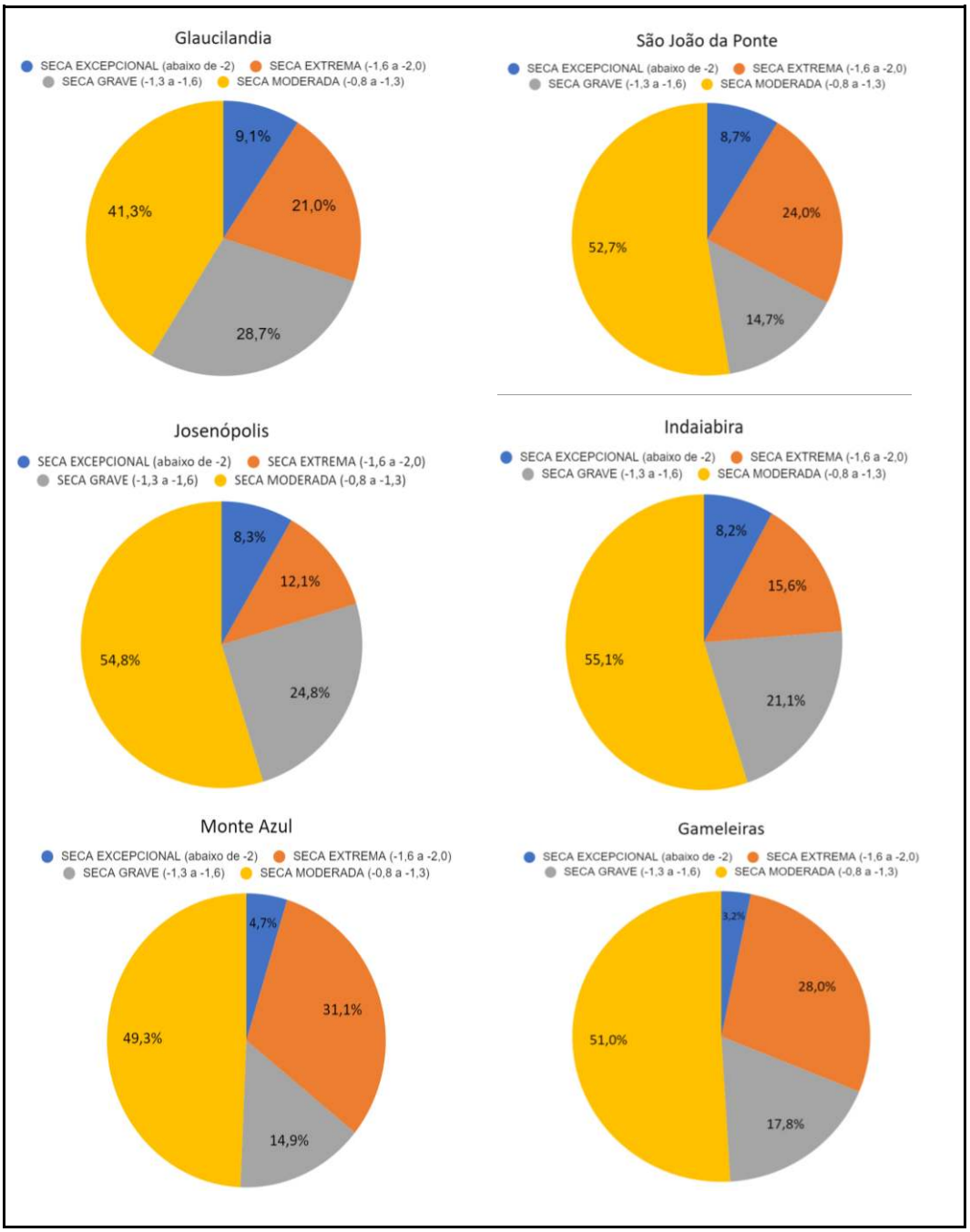
Figura 9 - SPEI-12 para o município de Catuti



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Em termos de frequência, de acordo com as categorias de secas, pode-se verificar que os eventos de seca excepcional ocorrem em menor número, como esperado (CUNHA *et al.*, 2019). Alguns municípios apresentaram maiores ocorrências nesta categoria em relação a outros, como, por exemplo, Glaucilândia (9,1%), São João da Ponte (8,7%), Josenópolis (8,3%) e Indaiabira (8,2%), conforme ilustrado na Figura 10. Já no caso de seca extrema, Monte Azul (31%) e Gameleiras (28%) foram os que tiveram as maiores ocorrências (Figura 10).

Figura 10 - Frequência de secas de acordo com as categorias

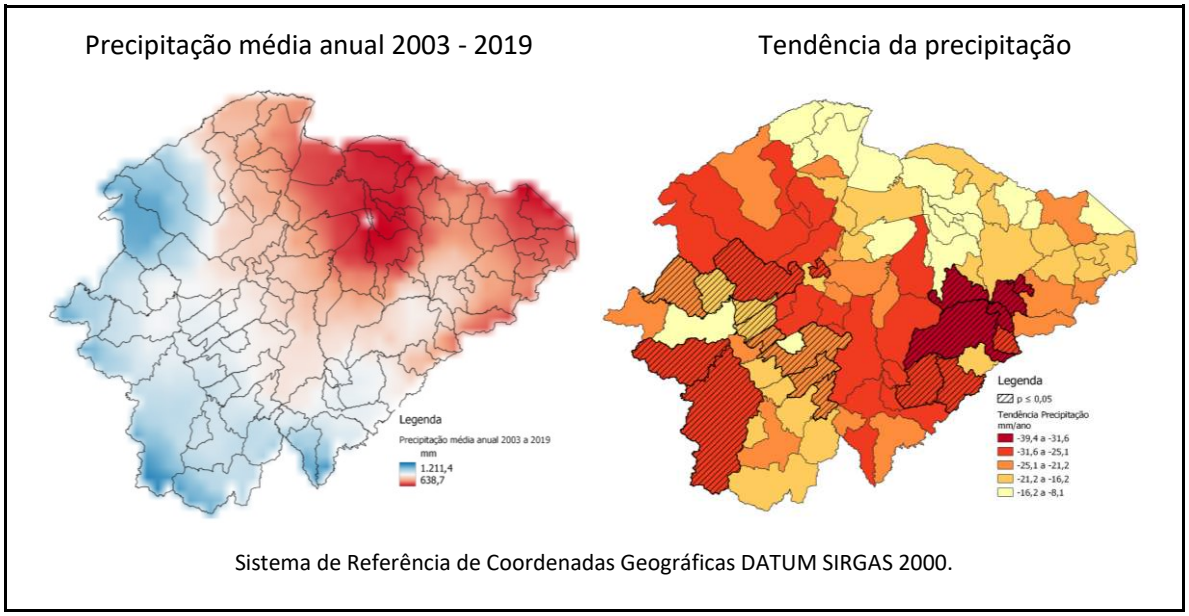


Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

3.2 Análise dos impactos na produção de milho e feijão

Para a análise dos impactos da seca na produção de milho e feijão, foi inicialmente conduzida uma avaliação da precipitação média anual e sua tendência ao longo do tempo, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Precipitação média anual (mm) e tendência (mm/ano) para a mesorregião norte de Minas Gerais com áreas estatisticamente significativas ao nível de 95% em hachurado.

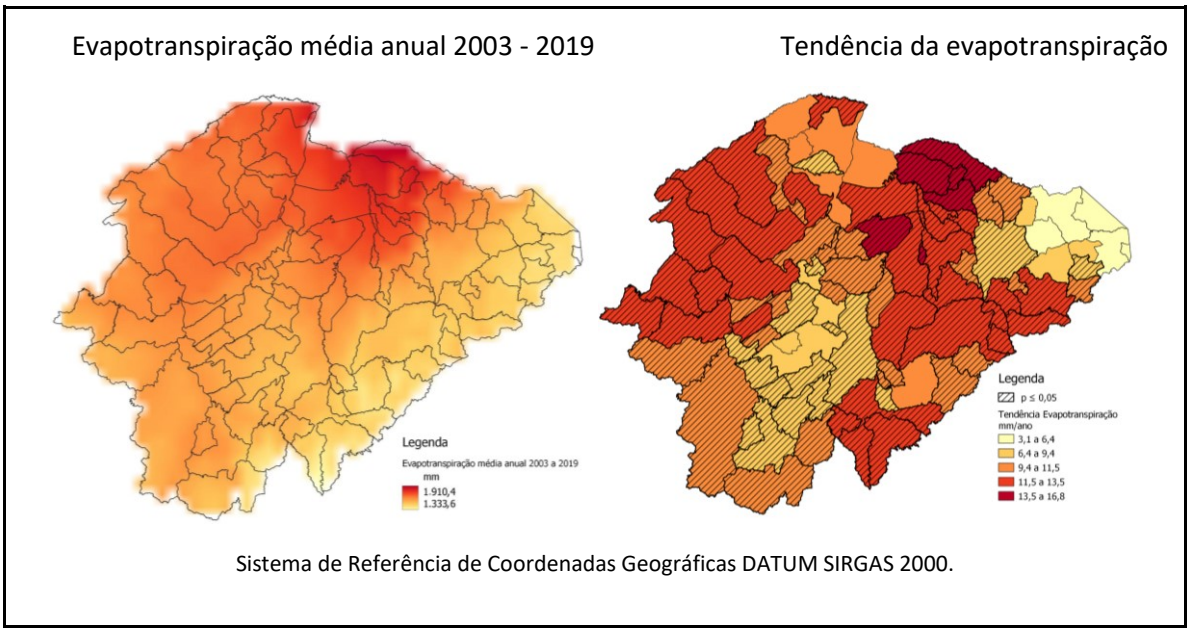


Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A precipitação média anual na mesorregião norte de Minas Gerais durante o período de 2003 a 2019 variou entre 638,7 mm a 1.211 mm, sendo que a porção norte-nordeste da mesorregião é a que apresenta os menores índices pluviométricos (Figura 11). Em termos de tendência, a precipitação na área de estudo vem apresentando redução ao longo do tempo, podendo chegar a um déficit de 39,4 mm por ano.

Posteriormente, procedeu-se à avaliação da evapotranspiração na mesorregião durante o mesmo intervalo temporal de 2003 a 2019 (Figura 12). Pode-se notar que os valores de evapotranspiração média anual são superiores aos da precipitação, situando-se entre 1.333,6 mm e 1.910,4 mm, conforme evidenciado no mapa à esquerda. Além disso, a análise de tendência realizada com o teste de Mann-Kendall, apresentada no mapa à direita, indica um aumento significativo na evapotranspiração ao longo desse período, indicando que as perdas por evaporação irão aumentar, conforme a temperatura aumenta, devido ao aquecimento global, o que somado a tendência de redução da precipitação, indica um cenário bastante preocupante para essa região. A maior parte dos municípios apresentam tendência positiva de evapotranspiração significativa ao nível de 95%, podendo chegar a 16,8 mm por ano (Figura 12).

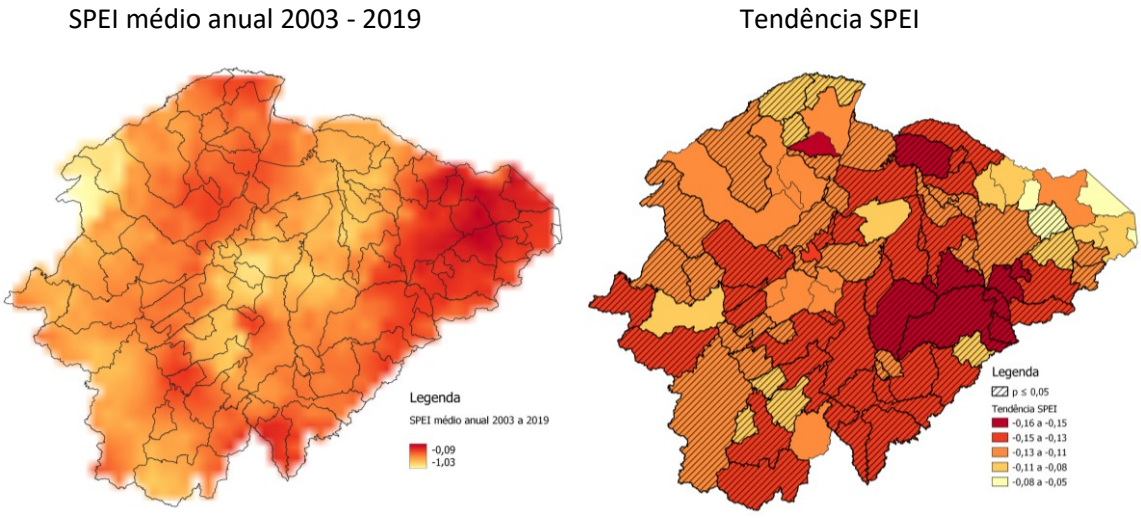
Figura 12 - Evapotranspiração média anual (mm) e tendência (mm/ano) para a mesorregião norte de Minas Gerais com áreas estatisticamente significativas ao nível de 95% em hachurado.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A Figura 13 apresenta o mapa de SPEI médio anual e a tendência na mesorregião durante o período de 2003 a 2019. Nota-se que o SPEI médio anual é negativo, variando de -0,09 a -1,03. Além disso, a tendência do SPEI mantém-se negativa ao longo do tempo, variando entre -0,05 a -0,16 por ano, sendo a mesma significativa a 95% em quase todos os municípios.

Figura 13 - SPEI médio anual e tendência para a mesorregião norte de Minas Gerais com áreas estatisticamente significativas ao nível de 95% em hachurado.



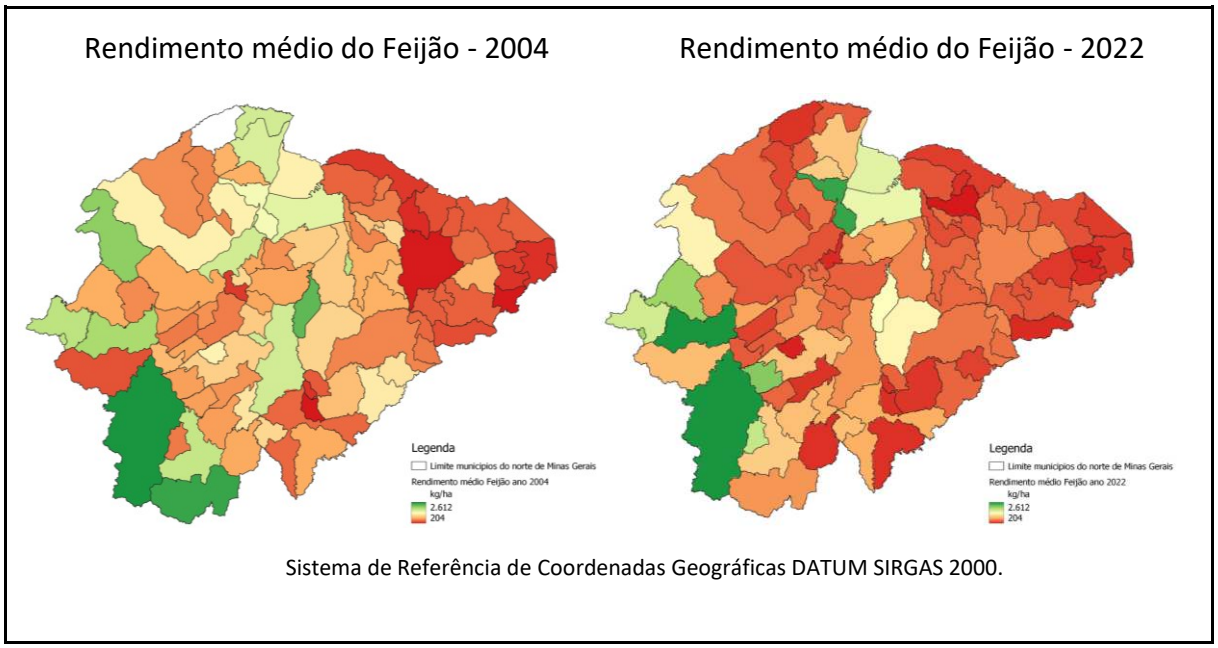
Sistema de Referência de Coordenadas Geográficas DATUM SIRGAS 2000.

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Deve-se ressaltar que, especificamente para a precipitação, apenas alguns municípios apresentaram p-valor abaixo de 0,05, indicando que as variações observadas nessa variável não foram estatisticamente robustas na mesorregião como um todo. Em contraste, tanto para a evapotranspiração, quanto para o SPEI, o p-valor esteve consistentemente abaixo de 0,05 em praticamente toda a região estudada, evidenciando uma significância estatística generalizada nessas variáveis em termos de tendência ao longo do período analisado.

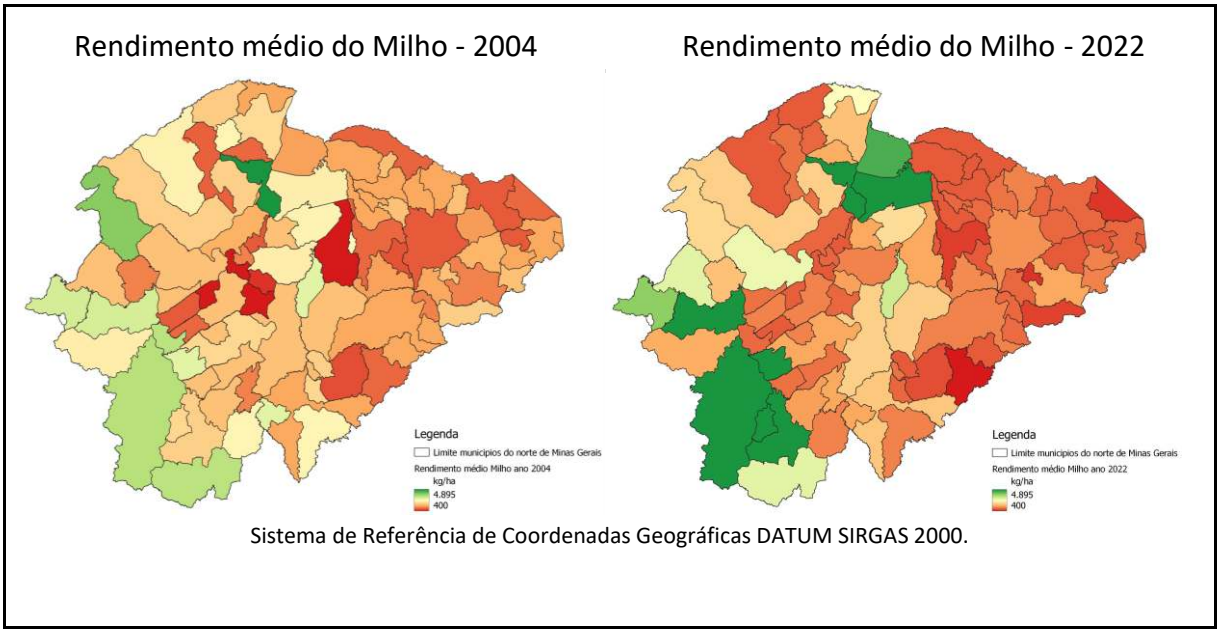
Após as análises climáticas, procedeu-se a um comparativo entre os dados de rendimento médio anual na produção de feijão e milho em 2004 e 2022. No que tange ao feijão (Figura 14), é possível observar, de modo geral, uma redução no rendimento no ano de 2022 em relação a 2004, evidenciada pelos tons mais avermelhados, que representam valores mais baixos, variando de 204 a 2.612 kg ha^{-1}. Essa redução é também perceptível no rendimento médio anual do milho em 2022, com valores variando de 400 a 4.895 kg ha^{-1} para o mesmo período (Figura 15).

Figura 14 - Mapa de Rendimento Médio Anual da Produção kg ha^{-1} de feijão.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 15 - Mapa de Rendimento Médio Anual da Produção kg ha^{-1} de feijão.



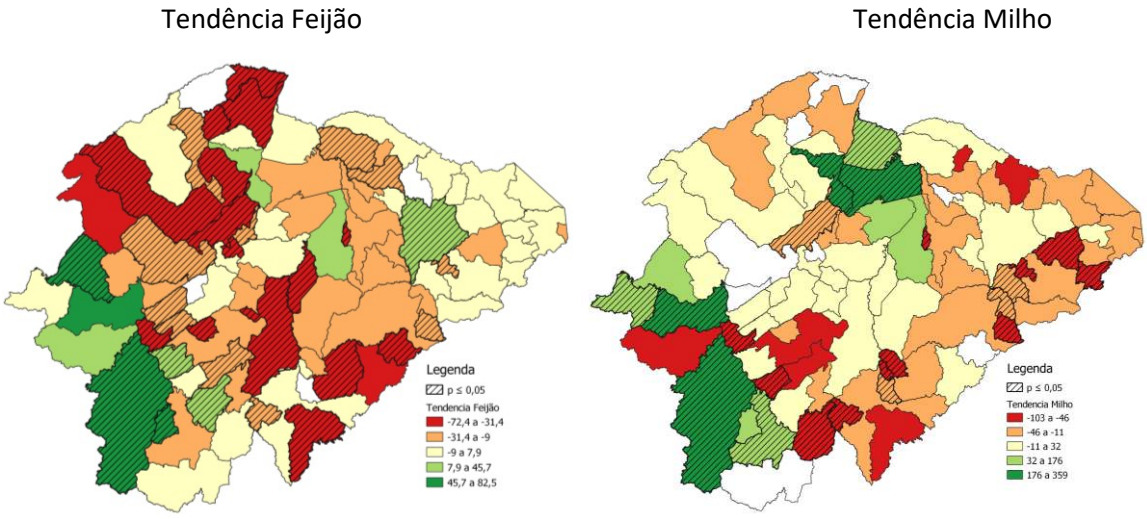
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

O período compreendido entre 2012 e 2020, conforme indicado pelos dados do SPEI-12 para os 25 municípios analisados, destacou-se como o período de maior seca. Essa correlação entre a queda na produtividade agrícola e o período de seca sinaliza a uma influência significativa das condições climáticas na produção de milho e feijão durante esse intervalo temporal, embora alguns municípios tenham apresentado aumento do rendimento,

o que pode ser conseguido por meio de investimentos em tecnologias agrícolas ou acesso à irrigação.

O teste de tendência de Mann-Kendall também foi aplicado para avaliar o rendimento dos grãos analisados, revelando resultados divergentes em diferentes municípios (Figura 16). Observou-se uma tendência negativa em parte deles, enquanto outra parte apresentou uma tendência positiva para os dois tipos de grãos. A análise estatística foi complementada pelo cálculo do p-valor, indicando significância estatística em alguns municípios. Entretanto, em determinadas localidades, a ausência de dados impediu a realização da análise de tendência, resultando em espaços em branco nos mapas (Figura 16).

Figura 16 - Mapa de tendência do rendimento de milho e feijão com áreas estatisticamente significativas ao nível de 95% em hachurado.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Dos 91 municípios analisados, 52 (57%) apresentaram tendências de redução no rendimento do milho e 64 (70%) no rendimento do feijão. Em termos de tendências estatisticamente significativas, 15 (16,5%) municípios apresentaram tendências de redução no rendimento do milho e 27 (29,7%) no rendimento do feijão.

Finalmente, foi analisada a correlação temporal entre o rendimento do milho e do feijão com SPEI, precipitação e evapotranspiração no período de 2003 a 2019. As Tabelas 3 e 4 apresentam somente os municípios que apresentaram tendências negativas de rendimento

para o milho e feijão e que foram estatisticamente significativas ao nível de 95% para todas as variáveis analisadas (rendimento, precipitação, evapotranspiração e SPEI).

Tabela 3 - Valores de tendência (tend) e correlação de Pearson (correl) entre o rendimento do milho e cada variável analisada. Valores de correlação em negrito são significativos ao nível de 95%.

Município	Tend milho	Tend prec.	Tend evapo.	Tend SPEI	Correl rend/prec	Correl rend/evapo	Correl rend/SPEI
Fruta de Leite	-32,19	-34,77	12,17	-0,16	0,04	-0,16	0,14
Guaraciama	-33,33	-27,89	9,15	-0,13	0,46	-0,44	0,26
Josenópolis	-50,00	-28,67	12,97	-0,15	-0,04	-0,25	0,46
Juramento	-75,00	-26,40	11,32	-0,12	**0,48**	**-0,58**	**0,52**
Novorizonte	-76,20	-31,76	11,48	-0,15	0,44	-0,37	0,47
Padre Carvalho	-33,33	-39,40	11,96	-0,16	0,20	-0,12	0,17
Pedras de Maria da Cruz	-38,43	-26,83	10,31	-0,12	0,33	-0,26	**0,63**
Santa Cruz de Salinas	-48,08	-21,68	10,75	-0,12	**0,57**	**-0,60**	**0,62**

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Tabela 4 - Valores de tendência (tend) e correlação de Pearson (correl) entre o rendimento do feijão e cada variável analisada. Valores de correlação em negrito são significativos ao nível de 95%.

Município	Tend feijão	Tend prec.	Tend evapo.	Tend SPEI	Correl rend/prec	Correl rend/evapo	Correl rend/SPEI
Botumirim	-31,75	-27,64	9,75	-0,14	0,44	-0,38	0,36
Campo Azul	-21,41	-21,17	9,97	-0,12	**0,51**	**-0,48**	0,36
Itacambira	-37,29	-26,59	11,15	-0,14	**0,53**	**-0,60**	**0,62**
Josenópolis	-12,77	-28,67	12,97	-0,15	-0,02	-0,12	0,21
Montes Claros	-38,24	-25,36	9,38	-0,13	**0,76**	**-0,68**	**0,64**
Novorizonte	-10,20	-31,76	11,48	-0,15	0,08	-0,08	0,28
Pedras de Maria da Cruz	-72,42	-26,83	10,31	-0,12	0,41	**-0,57**	**0,52**
Rubelita	-7,67	-24,74	13,35	-0,14	0,11	-0,02	-0,05
São Francisco	-16,56	-26,40	11,72	-0,13	0,43	**-0,54**	0,17
São João da Lagoa	-23,69	-22,87	7,43	-0,14	**0,57**	-0,38	0,48
Ubaí	-10,23	-19,15	12,13	-0,13	0,32	-0,06	0,01

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Pode-se observar que todos os municípios (com exceção de Josenópolis) apresentaram valores positivos de correlação entre o rendimento e a precipitação e entre o rendimento e o SPEI (Tabelas 3 e 4). Valores negativos foram observados entre o rendimento e a evapotranspiração, indicando que quanto maior a evapotranspiração, menor o rendimento (Tabelas 3 e 4).

Somente os municípios de Josenópolis, Novorizonte e Pedras de Maria da Cruz que apresentaram tendências significativas de redução de rendimento, tanto para o milho, quanto para o feijão, sendo que as tendências foram estatisticamente significativas para todas as variáveis analisadas (Tabelas 3 e 4).

Interessante notar que dos 25 municípios selecionados com maiores ocorrências de seca (Tabela 1), somente Guaraciama (Tabela 3), Josenópolis, São Francisco e Ubaí (Tabela 4)

apresentaram tendências estatisticamente significativas em todas as variáveis analisadas para o período de 2003 a 2019. Isso indica que outros municípios, como Juramento e Novorizonte (Tabela 3), Pedras de Maria da Cruz e Montes Claros (Tabela 4), entre outros, apresentaram tendências maiores de redução de rendimento do feijão e milho, redução da precipitação e SPEI e aumento da evapotranspiração do que os 25 municípios selecionados, o que significa que pode haver uma ausência de registros de seca por parte desses municípios na plataforma S2iD. Assim, destaca-se que os registros de ocorrência de impactos oriundos da Plataforma S2iD devem ser utilizados com cautela em análises de recorrências de secas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo apontaram para um aumento significativo na evapotranspiração, acompanhado por uma diminuição na precipitação e no Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) durante o período de 2003 a 2019. Essas observações coincidem com os testes de tendência e análises de correlação realizados, indicando um cenário preocupante. Esses padrões climáticos adversos parecem estar correlacionados a uma redução no rendimento da produção de milho e feijão ao longo desse intervalo temporal, embora alguns municípios tenham conseguido superar essas adversidades e obter resultados positivos. Sugere-se que estudos futuros analisem esses municípios, em termos de estratégias adotadas para obtenção desses resultados, a despeito das condições climáticas desfavoráveis.

Considerando as particularidades da mesorregião norte de Minas Gerais, que se enquadra no clima semiárido, caracterizado por escassez de água, os impactos da seca na produção agrícola de sequeiro tornam-se ainda mais significativos. No contexto dos impactos específicos da seca sobre a produção agrícola, é importante destacar que a escassez de água afeta diretamente o desenvolvimento das plantas, resultando em menor produtividade e qualidade dos grãos. A redução na precipitação, combinada com o aumento na evapotranspiração, contribui para condições de estresse hídrico, prejudicando o crescimento adequado das culturas. Isso pode resultar em problemas como diminuição do tamanho dos grãos ou espigas, diminuição na produção total e aumento da vulnerabilidade das plantações e doenças.

Diante desses impactos, medidas de mitigação tornam-se indispensáveis e a implementação de tecnologias pode desempenhar um papel crucial. Estratégias como o investimento em tecnologias para lidar com a escassez de água durante a produção de grãos, especialmente em regiões suscetíveis à seca como o norte de Minas Gerais são fundamentais.

Algumas soluções tecnológicas podem incluir irrigação Inteligente baseada em sensores e monitoramento climático, podendo, assim, otimizar o uso da água. A irrigação precisa, ajustada de acordo com as necessidades reais de cada cultura, reduz o desperdício e maximiza a eficiência hídrica.

Tecnologias de sensoriamento remoto com o uso de drones e satélites equipados com sensores podem fornecer informações em tempo real sobre a saúde das plantas e as condições do solo. Isso permite uma gestão mais precisa e adaptativa da irrigação, identificando áreas que precisam de mais ou menos água.

Culturas geneticamente modificadas podem ser uma opção de investimento, como em variedades de milho e feijão geneticamente modificadas para resistir a condições de estresse hídrico pode aumentar a robustez das culturas, reduzindo a dependência de recursos hídricos.

Investimentos em monitoramento climático e previsões meteorológicas podem auxiliar os agricultores a antecipar períodos de seca e ajustar suas práticas de manejo. Captação e armazenamento de água da chuva podem proporcionar uma fonte adicional de água durante os períodos secos. Finalmente, tecnologias de conservação do solo como a adoção de cobertura morta, terraceamento e sistemas de plantio direto contribuem para a conservação da umidade no solo.

A busca por soluções integradas e adaptáveis, considerando as particularidades da região em questão, é essencial para garantir a resiliência da agricultura frente às mudanças climáticas e para assegurar a segurança alimentar no longo prazo.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao CNPq a bolsa de Iniciação Científica concedida a primeira autora e a Unifei que apoiou a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ADAMS, J. **Climate_indices, an open source Python library providing reference implementations of commonly used climate indices**, 2017. Disponível em: https://github.com/monocongo/climate_indices. Acesso em: 24 nov. 2023.

ANA. **Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Disponível em: https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/mudancas-climaticasrecursos-hidricos. Acesso em: 10 out. 2023.

ATAÍDE, L. C. P. de. **Impactos da Variabilidade Hidroclimática no Semiárido Brasileiro.** Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021. Disponível em: http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/26186. Acesso em: 15 nov. 2023.

BATISTA, D. F.; ALBUQUERQUE, T. M. A. **Impacto da Seca na Agricultura dos Territórios Agreste Central, Alto Sertão e Centro-Sul de Sergipe.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 37, p. 81-88, 2022.

BRASIL. **Nova Delimitação do Semi-Árido Brasileiro.** Ministério da Integração Nacional. Brasília: DF, 2005.

CARVALHO, C. F. de. **Proposição de fundamentos de Gerenciamento de Recursos Hídricos para bacias hidrográficas do semiárido mineiro, com base em um estudo de caso no Município de Monte Azul/MG.** Monografia (Especialização em Gerenciamento de Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas, 2014. Disponível em: http://hdl.handle.net/1843/VRNS-9T7F7Q. Acesso em: 11 ago. 2023.

CIDADE-BRASIL. **Mesorregião do Norte de Minas**, 2023. Disponível em: https://www.cidade-brasil.com.br/mesorregiao-do-norte-de-minas.html. Acesso em: 11 jul. 2023.

CONAB. **A Perda de Grãos no Brasil e no Mundo: dimensão, representatividade e diagnóstico**. Companhia Nacional de Abastecimento, 2023. Disponível em: https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/compendio-de-estudos-da-conab/item/download/46263_45ffa214c0fa0389c97a393f7ba2e7fe. Acesso em: 20 out. 2023.

CRPM. Serviço Geológico do Brasil. **GEODIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS - PROGRAMA GEOLOGIA DO BRASIL LEVANTAMENTOS DA GEODIVERSIDADE**, 2010. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/14704/3/Geodiversidade_MG.pdf. Acesso em: 29 jun. 2023.

CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; DEUSDARÁ LEAL, K.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; et al. Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere,** v. 10, n. 11, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3390/atmos10110642. Acesso em: 20 set. 2023.

ESPINDOLA, H. S. **Território e geopolítica nas Minas Gerais do século XIX**. Cadernos da Escola do Legislativo, v.11, n.16, p.71-88, 2009. Disponível em: https://dspace.almg.gov.br/bitstream/11037/1261/3/0001261.pdf. Acesso em: 26 mai. 2023.

GONÇALVES, S. T. N.; JUNIOR, F. C. V.; 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, p. 495-511, 2021.

IBGE. **Produto Interno Bruto dos Municípios.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pib-munic/tabelas. Acesso em: 01 jun. 2023.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Climanálise**, v. 3, n. esp., p. 49-54, 2016.

MAPA. **Agropecuária Brasileira em Números.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/agropecuaria-brasileira-em-numeros/abn-05-2022.pdf. Acesso em: 14 nov. 2023.

MOREIRA, A. A. **Análise da seca/estiagem no norte do estado de Minas Gerais a partir de dados MODIS.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/147931/001000980.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 26 set. 2023.

NAUMANN, G.; CAMMALLERI, C.; MENTASCHU, L.; FEYEN, L. Increased economic drought impacts in Europe with anthropogenic warming. **Nature Climate Change**, v. 11, p. 485-491, 2021.

SEAPA. **Balanço do Agronegócio de Minas Gerais.** Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais, 2023. Disponível em: https://www.mg.gov.br/agricultura/noticias/desempenhos-recordes-do-agronegocio-mineiro-em-2022-sao-detalhados-em#:~:text=Puxadas%20pela%20valoriza%C3%A7%C3%A3o%20das%20commodities,de%20toda%20a%20s%C3%A9rie%20hist%C3%B3rica. Acesso em: 20 nov. 2023

SEAPA. **Projeções do agronegócio: Minas Gerais 2017 a 2027, projeções de longo prazo.** Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais. 2023. Disponível em: https://www.mg.gov.br/agricultura/documento/projecoes_2017_a_2027pdf. Acesso em: 15 nov. 2023.

SUDENE. **RESOLUÇÃO CONDEL/SUDENE Nº 150, DE 13 DE DEZEMBRO DE 2021.** Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. ed. 246, s. 1, p. 52, 2021.

VICENTE-SERRANO, S. M. Centro Nacional de Equipe de Pesquisa Atmosférica (Eds). **"O Guia de Dados Climáticos: Índice Padronizado de Evapotranspiração de Precipitação (SPEI)."** Disponível em: https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-evapotranspiration-index-spei. Acesso em: 29 out. 2023.

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, pp. 1–15, 2022.