

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Eventos extremos de calor e seca no período de cultivo da soja e do trigo no
Sul do Brasil: uma análise baseada em índices climáticos**

Guilherme Nunes Torma
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

GUILHERME NUNES TORMA

**Eventos extremos de calor e seca no período de cultivo da soja e do trigo no
Sul do Brasil: uma análise baseada em índices climáticos**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Gabrielle Ferreira Pires

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

T684e
2025
Torma, Guilherme Nunes, 1999-
Eventos extremos de calor e seca no período de cultivo da
soja e do trigo no Sul do Brasil: uma análise baseada em índices
climáticos / Guilherme Nunes Torma. – Viçosa, MG, 2025.
1 dissertação eletrônica (105 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Gabrielle Ferreira Pires.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2025.

Referências bibliográficas: f. 82-91.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.742>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Clima - Brasil, Sul. 2. Soja - Brasil, Sul - Efeito das
mudanças climáticas. 3. Trigo - Brasil, Sul - Efeito das
mudanças climáticas. 4. Cereais - Efeito do calor. 5. Cereais -
Efeito da seca. 6. Análise de séries temporais. I. Pires, Gabrielle
Ferreira, 1987-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada. III. Título.

CDD 22. ed. 551.69816

GUILHERME NUNES TORMA

Eventos extremos de calor e seca no período de cultivo da soja e do trigo no Sul do Brasil: uma análise baseada em índices climáticos

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 5 de agosto de 2025.

Assentimento:

Guilherme Nunes Torma
Autor

Gabrielle Ferreira Pires
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 03/11/2025 às 21:51:28 e pela orientadora em 04/11/2025 às 15:32:29. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **SKDB.GPXK.BFIU** e clique no botão 'Validar documento'.

À minha avó.

AGRADECIMENTOS

À sorte de ter...

Uma irmã que me inspirou a seguir essa jornada acadêmica e a alçar vôos inimagináveis.

Apoio incondicional da minha falecida avó e da minha mãe, que foram bases essenciais para a concretização das minhas realizações.

Encontrado amigos acolhedores e presentes nos momentos mais difíceis e radiantes da minha trajetória.

Um companheiro por ter estado sempre ao meu lado durante o processo de construção.

Uma orientadora exemplar, bem como uma equipe sempre aberta à troca de saberes.

Ademais, agradeço à Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos é apenas uma gota no oceano. Mas, o oceano seria menor se lhe faltasse uma gota”.
(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

TORMA, Guilherme Nunes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2025. **Eventos extremos de calor e seca no período de cultivo da soja e do trigo no Sul do Brasil: uma análise baseada em índices climáticos.** Orientadora: Gabrielle Ferreira Pires.

A contínua elevação da temperatura média da superfície global tem aumentado a frequência e a intensidade dos eventos extremos de calor e secas, tornando a produção agrícola mais instável. A Região Sul do Brasil não é exceção nesse cenário, devido aos impactos significativos sobre culturas economicamente relevantes à nível nacional, como a soja e o trigo. A investigação da manifestação e intensificação dos extremos climáticos, ao longo do ciclo de cultivo dessas culturas, é primordial para a implementação de medidas adaptativas diante dessa emergência climática. Assim, o objetivo principal deste estudo foi analisar as tendências de índices climáticos extremos nos períodos de cultivo dessas culturas. Foram utilizados dados climáticos diários, de 1961 a 2024, provenientes do Brazilian Daily Weather Gridded Data, aplicando-se índices associados a extremos de temperatura e déficit de pressão de vapor (VPD), bem como índices de seca meteorológicos e o índice climático de umidade. Posteriormente, os dados foram recortados com base em duas definições distintas de período de cultivo: o Período Apto para o Cultivo, delimitado pela janela de plantio recomendada pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático e pelo ciclo médio das cultivares registradas; e o Período Efetivo de Cultivo, definido espacial e temporalmente com base no calendário fenológico da soja, elaborado a partir de estudo guiado por ajustes nas curvas da fluorescência da clorofila induzida pela radiação solar. Por fim, as tendências das métricas associadas aos índices climáticos extremos e aos eventos detectados foram estimadas por meio de Inclinação de Sen, em conjunto com o teste de Mann-Kendall. Os resultados indicam intensificação do estresse térmico em todos os cultivos analisados, ao passo que o estresse por VPD apresentou sinais de escalada, especialmente na porção setentrional da região. Em relação às condições hídricas, observou-se heterogeneidade espacial, com agravamento das secas em direção às fronteiras continentais. Tais alterações climáticas podem comprometer a estabilidade da produtividade agrícola regional, caso não sejam adotadas estratégias de adaptação no manejo das culturas, as quais devem ser adequadas ao sinal climático extremo característico de cada área de cultivo.

Palavras-chave: tendências; secas; extremos de calor; cultivo da soja; trigo; Sul do Brasil

ABSTRACT

TORMA, Guilherme Nunes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2025.
Extreme heat and drought events during the growing season of soybean and wheat in Southern Brazil: an analysis based on climate indices. Adviser: Gabrielle Ferreira Pires.

The continuous rise in global mean surface temperature has increased the frequency and intensity of extreme heat and drought events, making agricultural production more unstable. The Southern Region of Brazil is no exception to this scenario, as evidenced by the significant impacts on economically important crops at the national level, such as soybean and wheat. Investigating the occurrence and intensification of climate extremes throughout the growing season of these crops is essential for the implementation of adaptive measures in the face of this climate emergency. Therefore, the main objective of this study was to analyze the trends of extreme climate indices during the cultivation periods of these crops. Daily climate data from 1961 to 2024 were obtained from the Brazilian Daily Weather Gridded Data, and indices related to temperature extremes and vapor pressure deficit (VPD) were applied, along with meteorological drought indices and the Climate Humidity Index. Subsequently, the data were filtered based on two distinct definitions of the growing period: the Suitable Growing Period, defined by the planting window recommended by the Agricultural Zoning for Climate Risk and the average crop cycle of registered cultivars; and the Effective Growing Period, defined spatially and temporally based on the soybean phenological calendar, developed through a study guided by adjustments to solar-induced chlorophyll fluorescence curves. Finally, trends in the metrics associated with extreme climate indices and detected events were estimated using the Sen's slope estimator in combination with Mann-Kendall test. The results indicate an intensification of heat stress across all analyzed crops, while VPD-related stress showed signs of escalation, particularly in the northern portion of the region. Regarding water availability, spatial heterogeneity was observed, with drought conditions worsening toward the continental interior. These climate changes may compromise the stability of regional agricultural productivity unless adaptive crop management strategies are adopted and tailored to the characteristic pattern of climate extremes in each growing area.

Keywords: trends ; droughts; heat extremes; soybean cultivation ; wheat; Southern Brazil

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1— Fluxograma das etapas metodológicas do estudo.	19
Figura 2— Média de produção de grãos e percentual de área plantada para soja (a, b) e trigo (d, e) no período de 2019 a 2023. Localização geográfica das regiões edafoclimáticas da soja (c) e macrorregiões tritícolas (f). Área de estudo compreendendo os estados do Rio Grande do Sul (RS); Santa Catarina (SC) e Paraná (PR).	21
Figura 3— Calendário de plantio recomendado pelo ZARC para a soja e o trigo, com painéis que informam o início (a, b) e o fim (c, d), e suas respectivas durações dos períodos indicados (e, f).	38
Figura 4— Período apto de cultivo para a soja e trigo, com painéis que representam o início (a, b) e o fim (c, d) do ciclo, e respectivas durações respectivas durações (e, f).	41
Figura 5— Período efetivo de cultivo para a soja, com painéis que representam o início (a), o fim (b) e a duração (c) do ciclo.	42
Figura 6— Distribuições mensais dos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), nas sub-regiões sojícolas: 101, 102 e 103, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.	45
Figura 7— Distribuições mensais dos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), nas sub-regiões sojícolas: 104, 201 e 202, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.	46
Figura 8— Distribuições mensais dos índices climáticos: Tmaxx (a–d), VPDx (e–h), SPI-3 (i–l), SPEI-3 (m–p) e CMI-5 (q–t), nas sub-regiões sojícolas: 102*, 103*, 201* e 202*, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.	48
Figura 9— Distribuições mensais dos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), nas sub-regiões tritícolas: 1, 2 e 3, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.	49
Figura 10— Distribuição espacial do número de eventos extremos por década, associados aos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), no PAC da soja, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.	51
Figura 11— Distribuição espacial do número de eventos extremos por década, associados aos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), no PEC da soja, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.	53

Figura 12— Distribuição espacial do número de eventos extremos por década, associados aos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), no PAC do trigo, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.....	54
Figura 13— Distribuição espacial da máxima intensidade média (a) e acumulado médio (b) associados aos índices climáticos: Tmaxx (I–III), VPDx (IV–VI), SPI-3 (VII–IX), SPEI-3 (X–XII) e CMI-5 (XIII–XV), no PAC da soja, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023. Municípios com amostras estatisticamente distintas em relação ao intervalo de 1964–1983 estão destacados.	56
Figura 14— Distribuição espacial da máxima intensidade média (a) e acumulado médio (b) associados aos índices climáticos: Tmaxx (I–III), VPDx (IV–VI), SPI-3 (VII–IX), SPEI-3 (X–XII) e CMI-5 (XIII–XV), no PEC da soja, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023. Municípios com amostras estatisticamente distintas em relação ao intervalo de 1964–1983 estão destacados.	58
Figura 15— Distribuição espacial da máxima intensidade média (a) e acumulado médio (b) associados aos índices climáticos: Tmaxx (I–III), VPDx (IV–VI), SPI-3 (VII–IX), SPEI-3 (X–XII) e CMI-5 (XIII–XV), no PAC do trigo, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023. Municípios com amostras estatisticamente distintas em relação ao intervalo de 1964–1983 estão destacados.	60
Figura 16— Distribuição espacial da duração máxima média (a) e frequência de ocorrência média (b) associadas aos índices climáticos: Tmaxx (I–III), VPDx (IV–VI), SPI-3 (VII–IX), SPEI-3 (X–XII) e CMI-5 (XIII–XV), no PAC da soja, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023. Municípios com amostras estatisticamente distintas em relação ao intervalo de 1964–1983 estão destacados.	62
Figura 17— Distribuição espacial da duração máxima média (a) e frequência de ocorrência média (b) associadas aos índices climáticos: Tmaxx (I–III), VPDx (IV–VI), SPI-3 (VII–IX), SPEI-3 (X–XII) e CMI-5 (XIII–XV), no PEC da soja, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023. Células com amostras estatisticamente distintas em relação ao intervalo de 1964–1983 estão destacadas.....	64
Figura 18— Distribuição espacial da duração máxima média (a) e frequência de ocorrência média (b) associadas aos índices climáticos: Tmaxx (I–III), VPDx (IV–VI), SPI-3 (VII–IX), SPEI-3 (X–XII) e CMI-5 (XIII–XV), no PAC do trigo, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023. Municípios com amostras estatisticamente distintas em relação ao intervalo de 1964–1983 estão destacados.	66

Figura 19— Distribuição espacial das tendências por décadas das métricas derivadas dos índices climáticos no PAC da soja, estimadas por meio da Inclinação de Sen: Tmaxx (a), VPDx (b), SPI-3 (c), SPEI-3 (d) e CMI-5 (e). As métricas consideradas foram: intensidade máxima (I), acumulado (II), duração máxima (III) e frequência (IV). Municípios com tendência estatisticamente significativa, com base no teste de Mann-Kendall, estão destacados.....	69
Figura 20— Distribuição espacial das tendências por décadas das métricas derivadas dos índices climáticos no PEC da soja, estimadas por meio da Inclinação de Sen: Tmaxx (a), VPDx (b), SPI-3 (c), SPEI-3 (d) e CMI-5 (e). As métricas consideradas foram: intensidade máxima (I), acumulado (II), duração máxima (III) e frequência (IV). Células com tendência estatisticamente significativa, com base no teste de Mann-Kendall, estão destacadas.....	71
Figura 21— Distribuição espacial das tendências por décadas das métricas derivadas dos índices climáticos no PAC do trigo, estimadas por meio da Inclinação de Sen: Tmaxx (a), VPDx (b), SPI-3 (c), SPEI-3 (d) e CMI-5 (e). As métricas consideradas foram: intensidade máxima (I), acumulado (II), duração máxima (III) e frequência (IV). Municípios com tendência estatisticamente significativa, com base no teste de Mann-Kendall, estão destacados.....	73
Figura A1— Distribuições decendiais dos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), nas sub-regiões sojícolas: 101, 102 e 103, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.	92
Figura A2— Distribuições decendiais dos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), nas sub-regiões sojícolas: 104, 201 e 202, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.	93
Figura A3— Distribuições decendiais dos índices climáticos: Tmaxx (a–d), VPDx (e–h), SPI-3 (i–l), SPEI-3 (m–p) e CMI-5 (q–t), nas sub-regiões sojícolas: 102*, 103*, 201* e 202*, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.	94
Figura A4— Distribuições decendiais dos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), nas sub-regiões tritícolas: 1, 2 e 3, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.	95
Figura B1— Distribuição espacial do número de eventos extremos por década, associados aos índices climáticos Tmaxx, VPDx, SPI-3, SPEI-3 e CMI-5, na escala mensal do PAC da soja.	96
Figura B2— Distribuição espacial do número de eventos extremos por década, associados aos índices climáticos Tmaxx, VPDx, SPI-3, SPEI-3 e CMI-5, na escala mensal do PEC da soja.	97

Figura B3— Distribuição espacial do número de eventos extremos por década, associados aos índices climáticos Tmaxx, VPDx, SPI-3, SPEI-3 e CMI-5, na escala mensal do PAC do trigo.	98
Figura C1— Distribuições da máxima intensidade, por período (1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023), associadas aos índices climáticos Tmaxx, VPDx, SPI-3, SPEI-3 e CMI-5, nas sub-regiões sojícolas e tritícolas.....	99
Figura C2— Distribuições do acumulado, por período (1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023), associadas aos índices climáticos Tmaxx, VPDx, SPI-3, SPEI-3 e CMI-5, nas sub-regiões sojícolas e tritícolas.	100
Figura C3— Distribuições da máxima duração, por período (1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023), associadas aos índices climáticos Tmaxx, VPDx, SPI-3, SPEI-3 e CMI-5, nas sub-regiões sojícolas e tritícolas.....	101
Figura C4— Distribuições da frequência de ocorrência, por período (1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023), associadas aos índices climáticos Tmaxx, VPDx, SPI-3, SPEI-3 e CMI-5, nas sub-regiões sojícolas e tritícolas.....	102
Figura D1— Distribuição espacial das tendências por décadas das métricas derivadas dos índices climáticos no PAC da soja, estimadas por meio da Regressão Linear: Tmaxx (a), VPDx (b), SPI-3 (c), SPEI-3 (d) e CMI-5 (e). As métricas consideradas foram: intensidade máxima (I), acumulado (II), duração máxima (III) e frequência (IV). Municípios com tendência estatisticamente significativa, com base no teste T de Student, estão destacados.	103
Figura D2— Distribuição espacial das tendências por décadas das métricas derivadas dos índices climáticos no PEC da soja, estimadas por meio da Regressão Linear: Tmaxx (a), VPDx (b), SPI-3 (c), SPEI-3 (d) e CMI-5 (e). As métricas consideradas foram: intensidade máxima (I), acumulado (II), duração máxima (III) e frequência (IV). Células com tendência estatisticamente significativa, com base no teste T de Student, estão destacadas.....	104
Figura D3— Distribuição espacial das tendências por décadas das métricas derivadas dos índices climáticos no PAC do trigo, estimadas por meio da Regressão Linear: Tmaxx (a), VPDx (b), SPI-3 (c), SPEI-3 (d) e CMI-5 (e). As métricas consideradas foram: intensidade máxima (I), acumulado (II), duração máxima (III) e frequência (IV). Municípios com tendência estatisticamente significativa, com base no teste T de Student, estão destacados.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1— Médias anuais de área plantada e percentuais de participação por sub-região, para as culturas de soja e trigo, no período de 2019 a 2023.....	22
Tabela 2— Denominações e definições dos índices climáticos extremos de calor e seca.....	27
Tabela 3— Duração média do ciclo da soja e do trigo, por macrorregião e unidades federativas, com base nos registros de cultivares disponíveis no SISZARC.....	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo geral.....	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3 MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 Área de estudo	20
3.2 Dados climáticos	22
3.3 Período Apto para o Cultivo e Período Efetivo de Cultivo.....	23
3.4 Índices climáticos extremos	27
3.4.1 Índice que expressa o estresse térmico.....	28
3.4.2 Índice que expresse o estresse por déficit de vapor de água	29
3.4.3 Índices que expressam as condições hídricas.....	31
3.4.3.1 Índice Padronizado de Precipitação e Índice Padronizado de Precipitação - Evapotranspiração	31
3.4.3.2 Índice Climático de Umidade.....	34
3.4.4 Métricas derivadas dos índices climáticos	36
3.5 Análise das Tendências Temporais	37
4 RESULTADOS	38
4.1 Períodos de cultivos	38
4.1.1 Zoneamento de Risco Climático	38
4.1.2 Períodos Apto de Cultivo	39
4.1.3 Período Efetivo de Cultivo	41
4.2 Análise das distribuições dos índices climáticos extremos.....	43
4.2.1 Distribuições dos índices climáticos para o PAC da soja	44
4.2.2 Distribuições dos índices climáticos para o PEC da soja.....	47
4.2.3 Distribuições dos índices climáticos para o PAC do trigo	47
4.3 Distribuição espacial do número de eventos extremos	50
4.3.1 Análise espacial da frequência de extremos no PAC da soja.....	51
4.3.2 Análise espacial da frequência de extremos no PEC da soja	52
4.3.3 Análise espacial da frequência de extremos no PAC do trigo	53
4.4 Distribuição espacial das médias da máxima intensidade e acumulado por recorte temporal	55

4.4.1 Análise espacial das médias da máxima intensidade e acumulado no PAC da soja	56
4.4.2 Análise espacial das médias da máxima intensidade e acumulado no PEC da soja	57
4.4.3 Análise espacial das médias da máxima intensidade e acumulado no PAC do trigo.....	59
4.5 Distribuição espacial das médias da máxima duração e frequência de ocorrência por recorte temporal.....	61
4.5.1 Análise espacial das médias da máxima duração e frequência de ocorrência no PAC da soja	61
4.5.2 Análise espacial das médias da máxima duração e frequência de ocorrência no PEC da soja	63
4.5.3 Análise espacial das médias da máxima duração e frequência de ocorrência no PAC do trigo	65
4.6 Tendências temporais das métricas dos índices climáticos extremos	67
4.6.1 Análise das tendências temporais das métricas dos índices no PAC da soja	68
4.6.2 Análise das tendências temporais das métricas dos índices no PEC da soja	70
4.6.3 Análise das tendências temporais das métricas dos índices no PAC do trigo.....	72
5 DISCUSSÃO.....	75
6 CONCLUSÕES.....	80
REFERÊNCIAS	82
APÊNDICE A – Distribuições decendiais dos índices climáticos.....	92
APÊNDICE B – Distribuição espacial do número de eventos extremos associados aos índices climáticos na escala mensal	96
APÊNDICE C – Distribuições das métricas dos índices climáticos em diferentes períodos ...	99
APÊNDICE D – Distribuição espacial das tendências das métricas dos índices climáticos..	103

1 INTRODUÇÃO

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas das Nações Unidas divulgou através do seu sexto relatório (IPCC, 2021) que a temperatura média da superfície terrestre continuará a aumentar, ultrapassando entre 1,5°C e 2°C os níveis pré-industriais até meados do século XXI. Conforme previsto, o ano de 2024 foi o primeiro a exceder a marca de 1,5°C, valor estabelecido como limite pelo Acordo de Paris, devido a uma fase excepcionalmente quente da variabilidade oceânica e ao aquecimento climático acelerado causado antropologicamente (COPERNICUS, 2025).

Nesse cenário de aquecimento sem precedentes, tem crescido a importância dos eventos de ocorrência rara e impactos extremos, conhecidos como eventos climáticos extremos. Entre eles, destacam-se os extremos de calor, na qual frequência e intensidade tem aumentado, assim como os tipos de secas (SENEVIRATNE et al., 2021). A agricultura, setor altamente sensível às alterações climáticas, é particularmente vulnerável a esses eventos, considerando que os extremos climáticos explicam parcela considerável da variabilidade produtiva das culturas (JIANG et al., 2025; VOGEL, 2019).

De modo geral, temperaturas extremas reduzem o acúmulo de biomassa e comprometem o rendimento de grãos (KHANZADA et al., 2025). A baixa umidade atmosférica contribui para elevação do déficit de pressão de vapor atmosférico (VPD), afetando processos fisiológicos essenciais ao crescimento vegetal (OGUNKANMI; MACCARTHY; ADIKU, 2022; YUAN et al., 2019), e impactando negativamente na produtividade (SUN et al., 2023; WU et al., 2025). Situações de seca, incluindo episódios de instalação súbita como as chamadas *flash droughts* (YUAN et al., 2023; LOVINO et al., 2024), quando coincidem com fases críticas do cultivo, resultam em grandes prejuízos econômicos (HUNT, 2021; LIANG; YUAN, 2021; LOVINO et al., 2025).

No cenário global, o Brasil se destaca como principal produtor de soja, representando cerca de 39% da produção mundial, equivalente a 154,50 milhões de toneladas na safra de 2023/2024 (USDA, 2025). No mercado interno, a Região Sul sobressai-se pelo elevado potencial produtivo da cultura (FERREIRA et al., 2024), respondendo por quase um quarto da produção nacional (IBGE, 2024). Ademais, essa mesma região também assume papel ainda mais relevante na produção de trigo, ao concentrar mais de 90% da produção brasileira em (IBGE, 2024).

Contudo, a produtividade tem sofrido flutuações significativas em função de fatores climáticos adversos que impactam diretamente a estabilidade da produção no Sul do Brasil. Por

exemplo, a produção de soja apresentou reduções consideráveis causadas por secas e altas temperaturas (FERREIRA et al., 2024; NÓIA JÚNIOR; CHRISTO; PEZZOPANE, 2025). Por outro lado, o trigo tem sido fortemente influenciado por eventos de secas, bem como excesso de chuvas (NÓIA JÚNIOR et al., 2021).

Diante desse cenário, torna-se essencial o uso de índices climáticos, que possibilitam identificar, quantificar a frequência e a intensidade desses eventos extremos ao longo do ciclo de cultivo dessas culturas. Entre os diversos índices disponíveis na literatura, destacam-se aqueles associam limiares definidos conforme a sensibilidade da cultura agrícola aos fatores climáticos, como, temperaturas extremas e condições hídricas (LI; LEI, 2022; LIU et al., 2021; PAN et al., 2023; QIAN, B. et al. 2023; ZHANG et al., 2022).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este estudo se propõe a analisar a variabilidade temporal e as tendências em séries históricas de extremos de calor e de secas associadas aos cultivos de soja e trigo na Região Sul do Brasil, com base em índices climáticos extremos.

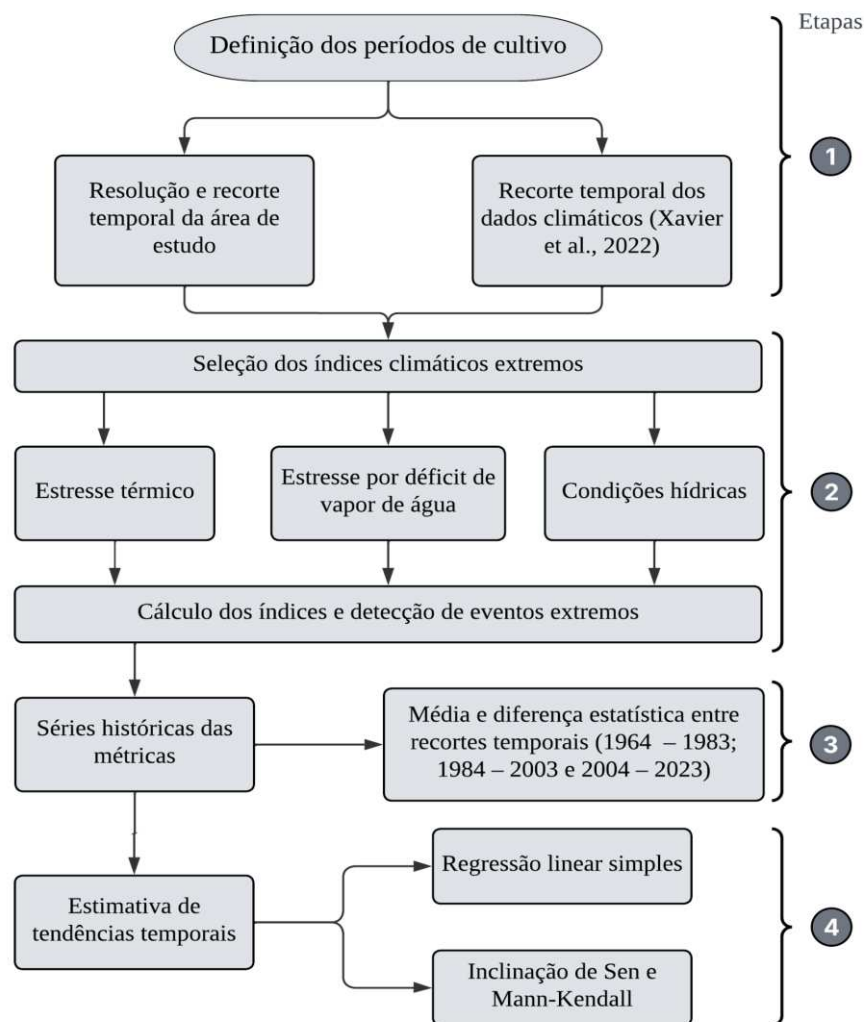
2.2 Objetivos específicos

- (i) Construir séries temporais históricas dos índices climáticos extremos, considerando múltiplas definições de período de cultivo para soja e uma definição para o trigo;
- (ii) Caracterizar a ocorrência de condições extremas por meio de métricas derivadas dos índices climáticos, em distintos recortes temporais;
- (iii) Avaliar a exposição dos cultivos a extremos climáticos, com base nas tendências estimadas de métricas ao longo do tempo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos deste estudo, a metodologia foi desenvolvida em quatro etapas principais, como pode ser observada na Figura 1: (1) definição dos períodos de cultivo das culturas, utilizados tanto como resolução espacial sobre a área de estudo quanto como intervalo de recorte temporal dos dados climáticos; (2) seleção dos índices climáticos extremos e do método empregado para a detecção de eventos adversos; (3) aplicação de métricas associadas aos índices com o intuito de avaliar padrões de alteração climática e, por fim, (4) estimativa de tendências temporais das métricas, considerando os pressupostos exigidos para aplicação dos métodos estatísticos. Os procedimentos adotados em cada etapa foram detalhados nas seções subsequentes.

Figura 1— Fluxograma das etapas metodológicas do estudo.



Fonte: Autor.

3.1 Área de estudo

O estudo abrange a Região Sul do Brasil, situada na porção meridional do território nacional. A região faz fronteira ao sul com o Uruguai, ao oeste com a Argentina e o Paraguai, ao norte com os estados do Mato Grosso do Sul e do São Paulo, e é banhada a leste pelo Oceano Atlântico. Possui uma extensão territorial de 576.736,0 km², distribuída em 1.191 municípios pertencentes aos estados do Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC) e Paraná (PR) (IBGE, 2023).

Conforme a classificação de Köppen, a Região Sul possui predominantemente o clima subtropical úmido sem estação seca (Cfa e Cfb), à exceção de pequenas áreas do extremo norte do Paraná onde o clima tropical com o inverno seco (Aw) e o clima tropical monçônico (Aw) predominam (ALVARES et al., 2013). Em consequência, essa região apresenta chuvas bem distribuídas ao longo do ano e variações de temperatura que definem as quatro estações climáticas. Além disso, a fase do El Niño Oscilação Sul (ENSO) impacta diretamente a ocorrência de eventos extremos, por exemplo, temperaturas extremas e secas, afetando significativamente a agricultura (HAMED et al., 2023; NÓIA JÚNIOR et al., 2020; REBOITA et al., 2021). Entretanto, o estado do ENSO isoladamente é insuficiente para explicar a ocorrência desses extremos, outras oscilações climáticas naturais globais e regionais e ainda suas combinações são relevantes (GRIMM, 2020).

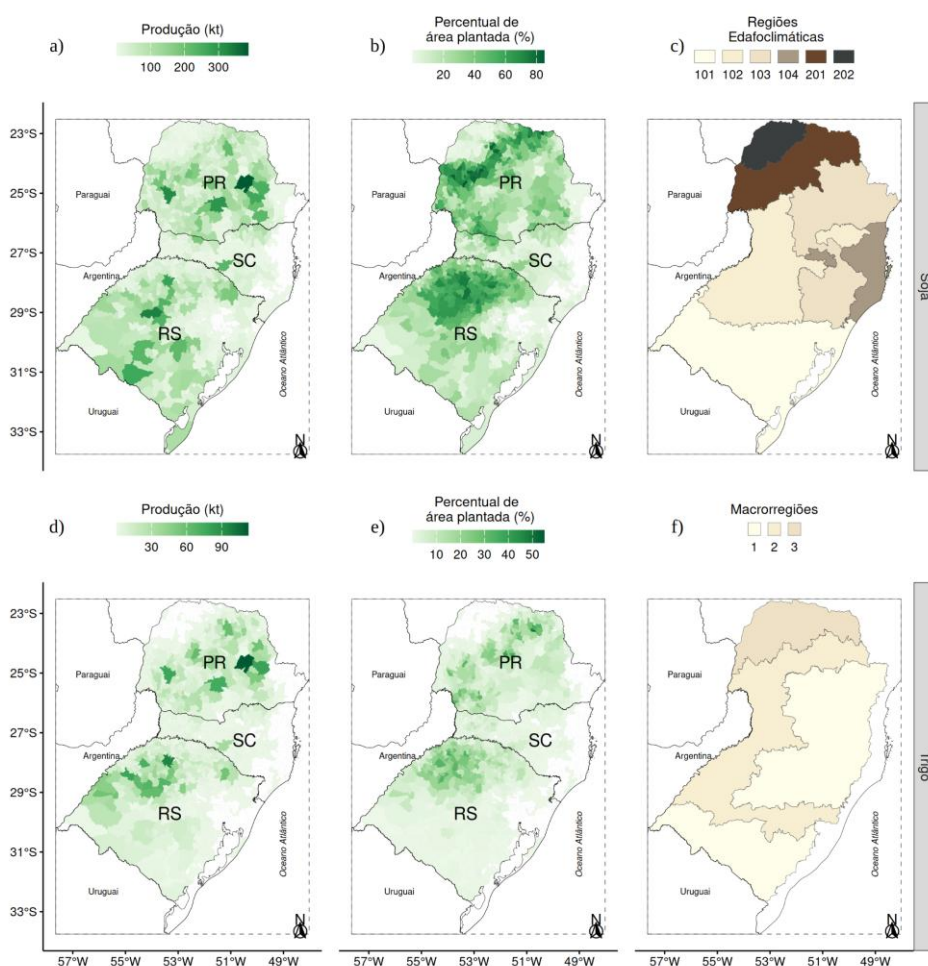
A Região Sul é um importante polo produtor de grãos no Brasil. Entre as culturas de verão, destaca-se a soja, com 37,29 milhões de toneladas colhidas em 2023. No caso das culturas de inverno, o trigo correspondeu à maior parte da produção, totalizando 6,51 milhões de toneladas (IBGE, 2024).

De 2019 a 2023, conforme a Figura 2, a produção média dessas culturas apresentou padrões semelhantes em nível municipal. Os maiores valores foram registrados na porção norte do RS e central do PR, enquanto os menores valores foram registrados nas regiões costeiras e noroeste do PR. Uma distinção importante foi a expressiva produção de soja nos municípios localizados ao sul do RS (Figura 2a e 2c).

Em relação ao grau de uso do solo, os maiores percentuais de área plantada para ambas as culturas ocorreram no norte do RS e em uma faixa vertical que se estende do oeste ao norte do PR. Ainda, a soja apresentou percentuais relativamente altos na porção central do PR, oeste de SC e sul do RS (Figura 2b e 2d).

O Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) define regiões homogêneas de adaptação das culturas com o objetivo de orientar o uso adequado de cultivares pelo produtor rural. No caso da soja, a Região Sul é dividida em seis regiões edafoclimáticas (Figura 2c), classificadas de acordo com as características de solo e clima (101, 102, 103, 104, 201 e 202), provenientes de duas macrorregiões sojícolas (1, 2). Para o trigo, existem três macrorregiões (1, 2 e 3), delimitadas conforme representado na Figura 2f. A distribuição dos municípios por cada divisão está disponível no portal oficial do MAPA (BRASIL, 2025).

Figura 2— Média de produção de grãos e percentual de área plantada para soja (a, b) e trigo (d, e) no período de 2019 a 2023. Localização geográfica das regiões edafoclimáticas da soja (c) e macrorregiões tritícolas (f). Área de estudo compreendendo os estados do Rio Grande do Sul (RS); Santa Catarina (SC) e Paraná (PR).



Fonte: Autor

As regiões edafoclimáticas sojícolas e as macrorregiões tritícolas foram adotadas neste estudo como unidades de referência espacial ao longo das descrições dos resultados. Embora as análises não tenham sido conduzidas diretamente com base nessas divisões, suas

delimitações foram utilizadas como suporte para interpretação espacial e estatísticas dos padrões observados e estruturar comparações regionais. Ainda, o termo “sub-região” acompanhado de sua numeração oficial foi utilizado para se referir, de forma simplificada, tanto às macrorregiões tritícolas quanto às regiões edafoclimáticas da soja.

Foram também considerados os valores de área plantada por sub-região, com o objetivo de quantificar a representatividade espacial das culturas analisadas em cada uma dessas divisões. Como mostra a Tabela 1, com base nos valores médios de 2019 a 2023 (IBGE, 2024), as sub-regiões 201 e 102 concentraram juntas mais de 60% da área total plantada com soja na Região Sul, ao mesmo tempo que as sub-regiões 104 e 202 constaram com menos de 4% do total. Em relação ao trigo, a sub-região 2 apresentou a maior proporção, com mais da metade da área total, seguida pelas sub-regiões 1 e 3.

Tabela 1— Médias anuais de área plantada e percentuais de participação por sub-região, para as culturas de soja e trigo, no período de 2019 a 2023.

Sub-região	Área plantada (ha)	Proporção de área plantada (%)
Soja		
101	2.238.265	17,9
102	4.717.238	37,8
103	1.967.942	15,8
104	71.458	0,57
201	3.069.992	24,6
202	428.869	3,43
Total	12.493.764	100
Trigo		
1	791.602	32,0
2	1.340.734	54,1
3	343.166	13,9
Total	2.475.502	100

Fonte: Autor

3.2 Dados climáticos

O banco de dados climáticos utilizado neste estudo foi o Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD) (XAVIER et al, 2015; XAVIER et al., 2022), atualmente disponível em: <https://sites.google.com/site/alexandreacandidoxavierufes/brazilian-daily-weather-gridded-data?authuser=0>. O BR-DWGD foi desenvolvido por meio de uma parceria entre a University of Texas (Estados Unidos) e a Universidade Federal do Espírito Santo (Brasil), reunindo observações meteorológicas de superfícies realizadas por 1.252 estações meteorológicas e 11.473 pluviômetros, sob o domínio da Agência Nacional de Águas e do Instituto Nacional de Meteorologia. Posteriormente, a base de dados pontuais foi transformada em superfície contínua por meio de dois métodos de interpolação, inverso da distância ponderada e ângulo da distância ponderada, aplicados conforme seu desempenho (XAVIER et al, 2022).

O BR-DWGD oferece séries temporais diária homogêneas e contínuas para todo o território brasileiro, contemplando diversas variáveis meteorológicas, como temperatura máxima (TX), temperatura mínima do ar (TN), precipitação (P), radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa (UR) e evapotranspiração de referência (ET0). A ET0 foi determinada a partir das demais variáveis por meio de Penman-Monteith, método padrão adaptado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (ALLEN; PEREIRA; SMITH, 1998).

Ademais, o BR-DWGD possui resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ ($\approx 11,1 \times 11,1$ km) e abrangência temporal de janeiro de 1961 a 20 de março de 2024 (mais de 63 anos), o que permite análises robustas dos padrões e tendências climáticas. Dessa forma, estudos recentes sobre eventos extremos têm utilizado esse banco como fonte de dados climáticos (BEVACQUA et al. 2021; REIS et al. 2020; TOMASELLA et al., 2023).

Nesta análise, as séries históricas temporais extraídas do BR-DWGD foram das variáveis TX, TN, P, UR e ET0, mantidas a resolução temporal original. Os dados foram espacialmente recortados para a Região Sul, e tanto as resoluções espaciais quanto o período de abrangência dos dados foram ajustados conforme o período de cultivo da soja e do trigo.

3.3 Período Apto para o Cultivo e Período Efetivo de Cultivo

A definição do período de cultivo é uma etapa fundamental em estudos que associam variabilidade climática aos impactos sobre a produção agrícola. No entanto, não há consenso na literatura sobre qual delimitação temporal é mais apropriada para representar o ciclo das

culturas em análises em larga escala, e diferentes estudos utilizam critérios distintos. Portalanza et al. (2024), por exemplo, adotaram uma janela fixa de 150 dias após o dia 15 de agosto para o cultivo da soja nos estados produtores de soja do Brasil. Já Noia Júnior et al. (2025) consideraram o intervalo de outubro a maio para a mesma cultura em escala municipal. Em relação ao trigo, já foi utilizada a definição com base em zonas agroclimatológicas das principais regiões produtoras do Brasil (NÓIA JÚNIOR, 2021).

Com o avanço de tecnologias de sensoriamento remoto, estudos recentes passaram a estimar com maior precisão datas específicas de estágios fenológicos (FONSECA et al., in preparation; LI; LEI, 2022; SANTANA et al., 2024), possibilitando recortes temporais condizentes com a realidade do cultivo.

Considerando essas diferentes abordagens e os avanços metodológicos recentes, neste estudo, os índices climáticos extremos foram calculados com base em duas definições distintas: o Período Apto para o Cultivo (PAC), tanto para soja e quanto para o trigo, e o Período Efetivo de Cultivo (PEC), aplicado apenas à soja.

O PAC corresponde ao intervalo entre a primeira data de plantio recomendada pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) e o término da duração média do ciclo da cultura adicionado ao fim da janela de plantio, simulando uma semeadura realizada no fim do período recomendado. Já o PEC foi delimitado com base nas abrangências espacial e temporal do Calendário Fenológico da Soja (CFS) elaborado por FONSECA et al. (in preparation). Dessa forma, a principal distinção entre os dois recortes temporais está na escala de análise, pois o PAC é abrangente em relação à delimitação espacial e temporal, enquanto o PEC é mais detalhado e específico.

O ZARC é um instrumento de gestão de risco na agricultura que visa mitigar perdas de produtividade causadas por eventos climáticos adversos, elaborado pelo MAPA em cooperação com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), disponível em <https://dados.agricultura.gov.br/dataset/tabua-de-risco-zoneamento-agricola-de-risco-climatico>. Essa ferramenta de política agrícola, fornece a relação de municípios indicados ao plantio e seus respectivos calendários de acordo com o tipo de solo, clima e ciclo das culturas (BRASIL, 2023a).

Conforme o ZARC, as datas recomendadas para o plantio são estruturadas em decêndios, ou seja, cada mês possui três períodos: o primeiro decêndio compreende os dias 1 a 10; o segundo os dias 11 ao dia 21 e o terceiro os dias 21 até o final do mês, totalizando 36 decêndios por ano. Na formulação do PAC, considerou-se apenas a dimensão temporal da janela

de plantio da safra de 2024-2025, desconsiderando o nível de risco climático e calendários específicos por tipo de solo.

Os ciclos das culturas, utilizados para complementar o período final do ZARC, foram determinadas com base nos ciclos das cultivares disponíveis no Sistema de Zoneamento Agrícola e Risco Climático (SISZARC), acessível em: <https://sistemasweb.agricultura.gov.br/siszarc/consultarCultivares.action>. Nesse sistema, as informações estão classificadas por unidade federativa (UF) e safra.

Em vista disso, assim como considerado para o ZARC, a safra 2024/2025 foi utilizada como referência. Como os ciclos das cultivares apresentam diferentes durações, foi adotada a média do número médio de dias da emergência até a maturação das cultivares cadastradas em suas respectivas UFs e macrorregiões. Os valores determinados em dias foram convertidos para decêndios por meio de arredondamento ao inteiro mais próximo.

Diferentemente do trigo, a soja está sujeita ao vazio sanitário, uma medida fitossanitária que visa controlar a ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*). Durante esse intervalo, é estritamente proibido o desenvolvimento de plantas de soja a campo, em qualquer estágio fenológico, por no mínimo 90 dias (BRASIL, 2024b).

Anualmente, o vazio sanitário é estabelecido pelo MAPA por meio de atos normativos, que geralmente é implementado antes do início do calendário de plantio das regiões sojícolas (BRASIL, 2024a). Dessa forma, a extensão do período de cultivo permitido é limitada pelo vazio sanitário, definido conforme o calendário de plantio da safra seguinte.

Nesta análise, com o intuito de padronização, o calendário recomendado de plantio posterior à safra 2024/2025 foi mantido igual ao da safra anterior. Consequentemente, a duração máxima do PAC da soja foi limitada a 27 decêndios, já que nove decêndios foram destinados ao vazio sanitário.

Em relação ao CFS, o período de cultivo é delimitado por meio de ajustes de curvas da fluorescência de clorofila induzida pela radiação solar (SIF), realizados por 16 modelos fenológicos, os quais estimam as datas de emergência e colheita (FONSECA et al., in preparation). A SIF é um sinal eletromagnético fraco, emitido na faixa do vermelho e vermelho distante pela clorofila após a absorção da radiação fotossinteticamente ativa (KÖHLER et al., 2018; LI; XIAO, 2022). Os sinais da SIF foram obtidos pelo Instrumento de Monitoramento da Troposfera (TROPOMI), a bordo do satélite Sentinel-5P (KÖHLER et al., 2018).

Diferentemente do ZARC, o CFS foi definido exclusivamente para as células de grade do TROPOMI ($7 \times 3,5$ km) cuja área apresentava mais de 50% de cobertura por soja, nas safras

de 2018 a 2022. Com base nesses pontos, o CFS delimita, a partir de quartis, os períodos de emergência, florescimento, enchimento de vagens e colheita da soja nas principais regiões produtoras do Brasil. Por fim, os calendários agrícolas estimados foram validados com informações agrônômicas de órgãos públicos e com imagens de sensoriamento remoto de alta resolução espacial (FONSECA et al., in preparation).

Na construção do PEC, considerou-se apenas as datas de início da emergência e data do terceiro quartil da colheita referente aos estados da Região Sul. A adoção da extensão total da emergência teve como objetivo evitar exclusões parciais do crescimento vegetativo das plantas em certas localidades. Além disso, as células de grade utilizadas na construção do CFS foram empregadas como limite espacial do PEC.

O PAC e o PEC possuem resoluções espaciais que diferem do BR-DWGD, por consequência, foi necessário converter os dados meteorológicos para as suas respectivas resoluções. No PAC, os dados do BR-DWGD foram agregados na escala municipal mediante a média ponderada das células dentro dos polígonos dos municípios. Na extração desses valores foi utilizado o formato de dados espaciais dos municípios da Base Cartográfica Vetorial Contínua na escala 1:250.000 (BC250), fornecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html?caminho=cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas. Em relação ao CFS, abordagem semelhante foi realizada, porém alterando a área de amostragem que, neste caso, foi os próprios polígonos do CFS.

Com o intuito de facilitar a análise e a comparação entre as diferentes definições do período de cultivo da soja, os municípios e as células do PAC e do PEC foram agrupados segundo as regiões edafoclimáticas da soja (Figura 2c). Para distingui-los, adotou-se uma nomenclatura diferenciada, por meio da inserção de um asterisco no código identificador para as sub-regiões do PEC. Por exemplo, “102*” refere-se a sub-região 102 do PAC, ou seja, “102*” corresponde à mesma área sob a perspectiva do PEC, o mesmo é válido para as demais sub-regiões.

Os períodos de cultivos definidos foram estendidos para todos os anos cobertos pelo BR-DWGD, formando séries anuais de safras. Em outras palavras, as datas originalmente definidas para o cultivo foram repetidas ao longo da série histórica, com a inclusão apenas do ano correspondente e inserção do dia bissexto caso necessário. O propósito dessa abordagem foi a criação de séries temporais longas para análise climatológica dos índices extremos.

3.4 Índices climáticos extremos

Oito índices foram selecionados para representar os efeitos dos eventos climáticos associados às condições extremas de calor e seca nas culturas da soja e do trigo, a Tabela 2 apresenta um panorama geral desses índices, enquanto, os detalhes são descritos nas seções a posteriori (3.4.1 a 3.4.3). De forma geral, o Tmaxx (Temperatura Máxima Extrema) e o VPDx (Déficit de Pressão de Vapor Extremo), definidos adiante, estão associados às condições de estresses metabólicos na planta. Por sua vez, o CMI-5 (Índice Climático de Umidade na escala de 5 dias), o SPI-3 e o SPEI-3 (Índice Padronizado de Precipitação e Precipitação-Evapotranspiração, ambos na escala de 3 meses) indicam as condições hídricas da área estudada.

Tabela 2— Denominações e definições dos índices climáticos extremos de calor e seca.

ID	Nome do índice	Definição
Índice de estresse térmico		
Tmaxx	Temperatura Máxima Extrema	Diferença entre a TX e o limiar de TX
Índice de estresse por déficit de vapor de água		
VPDx	Déficit de Pressão de Vapor Extremo	Diferença entre a o VPD médio diário e o limiar de VPD
Índice das condições hídricas		
SPI-3	Índice Padronizado de Precipitação de 3 meses	Índice de seca meteorológico baseado no padrão climático de precipitação agregado na escala de 3 meses
SPEI-3	Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração de 3 meses	Índice de seca meteorológico com base no padrão climático do balanço hídrico (P-ET0) agregado na escala de 3 meses
CMI-5	Índice Climático de Umidade na escala de 5 dias	Índice baseado no padrão climático do balanço hídrico (P-ET0) de 5 dias

Fonte: Autor

3.4.1 Índice que expressa o estresse térmico

A temperatura influencia diversos processos fisiológicos da planta: fotossíntese, respiração, transpiração, desenvolvimento vegetativo e reprodutivo (REZAEI et al., 2015). A suscetibilidade às temperaturas extremas depende da resposta de diferentes cultivares ao ambiente (OGUNKANMI; MACCARTHY; ADIKU, 2022; ZHANG et al., 2022) e da etapa fenológica da planta (HATFIELD; PRUEGER, 2015). Independentemente das circunstâncias, as temperaturas acima de um valor ótimo contribuem para a redução da fotossíntese e encurtamento da duração do ciclo da cultura, o que resulta no menor acúmulo de biomassa e queda rendimento de grãos (KHANZADA et al., 2025; REZAEI et al., 2015).

Diversos estudos recentes sobre o efeito de temperaturas extremas em culturas agrícolas utilizaram índices com distintas nomenclaturas, por exemplo, graus-dia de crescimento extremos (JIANG et al., 2025; LI; LEI, 2022; ZHANG et al., 2022) e número de dias quentes (JIANG et al., 2025; QIAN, B. et al., 2023). Nesta análise, a abordagem aplicada foi a do estresse térmico (LIU et al., 2021) diário (T_{maxx}) em que a temperatura máxima diária é comparada com um valor de temperatura crítico da cultura (T_{cri}) conforme descrito pela Equação 1.

$$T_{maxx_x} = \begin{cases} 0, & \text{se } TX < TX_{cri} \\ TX - TX_{cri}, & \text{se } TX \geq TX_{cri} \end{cases} \quad (1)$$

Distintos valores críticos de temperatura são utilizados, devido às diferentes exigências térmicas entre as fases fenológicas da planta (HEYU; YUE; JIANG, 2024; JIANG et al., 2025). No entanto, como o método deste estudo não delimita as fases fenológicas das culturas dentro do período de cultivo por causa da dificuldade de inferir datas de transição fenológica das plantas devido à diversidade de manejo na área de estudo, optou-se por utilizar um limiar representativo para todo o ciclo da planta, baseado em sua fase mais crítica.

As fases mais sensíveis aos extremos de calor, período crítico no que diz respeito à produtividade da soja e do trigo, são o florescimento e o enchimento de grãos (COUËDEL et al., 2021), integrantes da fase reprodutiva da planta. Estudos recentes aplicaram 30°C como limiar de estresse térmico para essa fase do trigo de inverno (HEYU; YUE; JIANG, 2024; LIU et al., 2021; ROGGER et al., 2021). Em relação à soja, Schlenker e Roberts (2009) determinaram o mesmo valor com base em registros de produtividade dos Estados Unidos.

Contudo, trabalhos mais recentes têm empregado o valor de 32°C como limiar para a fase reprodutiva da soja (COUËDEL et al., 2021; ERGO et al. 2018).

Portanto, nesta análise, o valor de TX_{cri} aplicado foi de 32°C para a soja e de 30°C para o trigo. Além disso, um evento extremo de estresse térmico foi identificado como tendo no mínimo 3 dias consecutivos com T_{max} positivo, critério de duração similar ao utilizado na detecção de ondas de calor (RUSSO; DOMEISEN, 2023).

3.4.2 Índice que expresse o estresse por déficit de vapor de água

O VPD mede o quão distante o ar está de sua saturação em relação ao conteúdo de vapor de água presente na atmosfera, o que o torna um indicador da associação entre as condições combinadas de seca e calor e os seus efeitos nas plantas (GROSSIORD et al., 2020). O VPD entre o interior da folha e o ar ao redor determina a taxa de transpiração da planta, um dos principais mecanismos de controle de perda hídrica (SEVERSIKE et al., 2012). Em condições de valores de VPD elevados, a planta limita a taxa de fotossíntese que, por sua vez, reduz a produtividade de culturas agrícolas (SUN et al., 2023; WU et al., 2025).

A ocorrência de estresse por VPD (VPD_x) foi determinada através da comparação entre o valor diário médio de VPD (VPD_m) e o limite máximo de VPD (VPD_{lim}) na qual as condições fisiológicas da planta mantêm-se adequadas (Equação 2). O VPD_m é a diferença entre a média diária de pressão de saturação do vapor de água (e_s) e a média diária de pressão real de vapor de água (e_a) sob uma temperatura específica (Equação 3).

$$VPD_x = \begin{cases} 0, & \text{se } VPD_x < VPD_{lim} \\ VPD_m - VPD_{lim}, & \text{se } VPD_m \geq VPD_{lim} \end{cases} \quad (2)$$

$$VPD_m = e_s - e_a \quad (3)$$

A pressão parcial de saturação do vapor de água, ou pressão de vapor em equilíbrio, é a pressão máxima de vapor de água que pode existir no ar a uma determinada temperatura, quando as taxas de evaporação e condensação se igualam. Essa relação entre temperatura e pressão é descrita pela equação de Clausius-Clapeyron (WALLACE; HOBBS, 2006). No

entanto, fórmulas mais simples, ajustadas para faixas específicas de temperaturas, são precisas e amplamente utilizadas.

Neste estudo, e_s foi estimada como a média entre a pressão parcial de vapor de saturação do ar mínima (e_{smin}) e máxima (e_{smax}) diária (Equação 4). Esses valores em kPa foram obtidos por meio da fórmula de Tetens (Equações 5 e 6), ideal para temperaturas acima de 0°C (MONTEITH; UNSWORTH, 2014).

$$e_s = \frac{e_{smin} + e_{smax}}{2} \quad (4)$$

$$e_{smin} = 610,8 \cdot \exp\left(\frac{17,3 \cdot TN}{TN + 237,3}\right) \quad (5)$$

$$e_{smax} = 610,8 \cdot \exp\left(\frac{17,3 \cdot TX}{TX + 237,3}\right) \quad (6)$$

Como RH é definido como a razão entre e_a e e_s em uma mesma temperatura (MONTEITH; UNSWORTH, 2014), e_a foi obtida através da Equação 7.

$$e_a = e_s \cdot \frac{RH}{100} \quad (7)$$

Em exemplares de culturas agrícolas foram observados a presença de um traço de limitação da taxa máxima (ou constante) de transpiração sob alto VPD (FLETCHER; SINCLAIR; ALLEN JR, 2007; SCHOPPACH; SADOK, 2012). Em condições elevadas de VPD, a presença dessa característica pode resultar numa redução na produtividade, mesmo quando há água disponível, embora essa limitação seja benéfica em áreas com escassez hídrica no final da estação de cultivo (SINCLAIR, et al. 2017).

Estudos que investigaram a variabilidade genética das sensibilidades da taxa de transpiração à demanda evaporativa de cultivares de trigo observaram pouco ou nenhum aumento da transpiração em VPDs na faixa de 2,4 e 3,9 kPa (SCHOPPACH; SADOK, 2012) e, sob temperaturas constantes, em torno de 2 kPa (SCHOPPACH et al., 2017). Para soja, o limiar de VPD encontrado para o genótipo PI 416937 foi superior a 2,1 kPa (DEVI; TALIERCIO; SINCLAIR, 2015; FLETCHER; SINCLAIR; ALLEN JR., 2007). Em outra

análise, envolvendo três genótipos, o valor crítico foi superior a 1,9 kPa (SINCLAIR; ZWIENIECKI; HOLBROOK, 2008).

Os limiares de VPD observados nesses estudos correspondem a valores instantâneos de VPD, diferentemente dos valores médios utilizados em VPD_x que são naturalmente inferiores ao VPD máximo diário. Em vista disso, os valores de VPD_{lim} adotados neste estudo foram definidos como sendo os valores mínimos de VPD associados à redução da taxa de transpiração, 1,9 kPa para soja e 2 kPa para o trigo. Além disso, um evento extremo foi caracterizado pela ocorrência de um único dia com VPD_x positivo, ou seja, VPD_m acima desses limiares.

3.4.3 Índices que expressam as condições hídricas

3.4.3.1 *Índice Padronizado de Precipitação e Índice Padronizado de Precipitação - Evapotranspiração*

Dois índices de seca meteorológica foram utilizados na avaliação das condições hídricas: Índice Padronizado de Precipitação (SPI) (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993) e Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) (VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010), por estarem associados aos efeitos das secas (BACHMAIR; KOHN; STAHL, 2015), especialmente no setor agrícola (ZHANG; LI; QUIRING, 2023). A Organização Meteorológica Mundial considera o SPI como padrão para detecção de secas meteorológicas (HAYES et al., 2011), enquanto o SPEI é amplamente utilizado na análise da relação entre o aporte hídrico e a produtividade de culturas devido à inclusão da evapotranspiração em sua formulação, variável imprescindível ao desenvolvimento das plantas (LU et al., 2020).

Tanto o SPI quanto o SPEI indicam as condições hídricas por meio de valores numéricos extraídos de procedimentos estatísticos. Um aspecto comum entre os índices é a padronização, formulação que permite comparações consistentes entre diferentes regiões e ao longo do tempo.

Adicionalmente, a viabilidade de agregar dados climáticos em diferentes escalas temporais possibilita o diagnóstico do estado hídrico de diferentes reservatórios. Por exemplo, a escala temporal de 3 meses está associada ao armazenamento hídrico do solo, portanto, utilizada em análises de secas agrícolas (FERREIRA et al., 2024; LI; LEI, 2022; LU et al., 2020; PAN et al., 2023; ZHANG; LI; QUIRING, 2023).

Conforme a formulação do SPI, o conjunto de dados de precipitação acumulada, obtido a partir de uma escala de agregação definida, é ajustado à distribuição de probabilidade gamma de dois parâmetros (Equação 8): parâmetro de forma (α) e de escala (β), com base em um período histórico de referência previamente estabelecido. Os parâmetros são estimados por meio do método de máxima verossimilhança, conforme a Equação 9. O termo A, presente nos cálculos desses parâmetros, é determinado pela Equação 10.

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, x > 0 \quad (8)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right), \quad \hat{\beta} = \frac{x}{\hat{\alpha}} \quad (9)$$

$$A = \ln(\underline{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (10)$$

Em seguida, a função de distribuição acumulada gama (G) (Equação 11) é utilizada para obter a probabilidade acumulada de precipitação. Na presença de valores nulos de precipitação, a forma empírica (H) (Equação 12) é utilizada, onde a variável q representa a proporção de valores nulos de precipitação na série temporal. A função acumulada (G ou H) é transformada em valores da distribuição normal padrão, com média 0 e desvio padrão 1, por meio do inverso da distribuição normal. Enfim, os desvios relativos da precipitação em relação à densidade de probabilidade normalmente distribuída obtidos correspondem aos valores do SPI (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993).

$$G(x) = \int_0^x f(t)dt = \frac{\gamma(\alpha, x/\beta)}{\Gamma(\alpha)} \quad (11)$$

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (12)$$

A estrutura matemática do SPEI é similar ao do SPI, com distinções na variável agregada e na distribuição de probabilidade utilizada. Diferentemente do SPI, que considera apenas a precipitação acumulada, o SPEI aplica diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial (VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010).

O balanço hídrico climatológico do SPEI avalia tanto o aporte de água, por meio da precipitação, quanto a perda hídrica mediante a evapotranspiração potencial. Além disso, as séries temporais desse balanço são ajustadas à distribuição de probabilidade log-logística de três parâmetros (Equação 13): parâmetro de forma (β), escala (α) e localização (γ), estimados por meio do procedimento L-momento.

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (13)$$

De acordo com a distribuição log-logística, a função de distribuição acumulada (F) é definida pela Equação 14. Por fim, a padronização da F para a distribuição normal fornece os valores do SPEI (VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010).

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (14)$$

Assim como realizado por Lorenz et al. (2017), o método da janela móvel foi utilizado para obter os valores dos índices de seca em uma escala inferior à mensal, ao mesmo tempo que mantém as escalas de agregação originais. Essa abordagem traz robustez à estimativa dos índices, principalmente para o SPI, pois diminui a ocorrência de precipitação acumulada nula (ZHANG; QUIRING, 2023) que impacta negativamente o ajuste das distribuições de probabilidade (STAGGE et al., 2015).

Na presente análise, o método consistiu em converter as escalas temporais de agregação em seus equivalentes em decêndios e assim atualizar os valores a cada decêndio. Por exemplo, o SPI calculado na escala (t) de três meses (SPI-3) para um decêndio (d) de um ano (i), agregou a precipitação acumulada dos nove decêndios mais recentes, conforme descrito pelas Equações 15 e 16.

$$X_{i,d}^t = \sum_{l=37-3t+d}^{36} Var_{i-1,l} + \sum_{l=1}^d Var_{i,l} \quad d < 3t \quad (15)$$

$$X_{i,d}^t = \sum_{l=d-3t+1}^d Var_{i,l}, \quad d \geq 3t \quad (16)$$

Diante do que foi exposto, os índices SPI e SPEI foram calculados na escala de 3 meses através do pacote SPEI (BEGUERÍA; VICENTE-SERRANO, 2023) em linguagem R. Embora a formulação do SPEI utilize a evapotranspiração potencial no balanço hídrico (B), optou-se pelo uso da ET0 disponibilizada pelo BR-DWGD, conforme a Equação 17.

$$B = P - ET0 \quad (17)$$

Após a determinação da série histórica de P e B, os dados foram agregados utilizando a abordagem de janela móvel. Em seguida, os valores agregados foram recortados para o período de cultivo e, quando necessário, os decêndios parcialmente incluídos foram adequadamente preenchidos. Posteriormente, os dados foram ajustados às distribuições de probabilidade Gama (para o SPI) ou Log-logística (para o SPEI), considerando o período de referência de 1961 a 1990. Nos casos em que ocorreram valores infinitos, geralmente causados pela padronização dos dados, esses foram estimados por meio de interpolação linear.

Após a estimativa dos índices de seca para cada unidade espacial, os valores foram comparados com o limiar de -0,5, visando a detecção de eventos de seca. Em correspondência com o Monitor de Secas Brasileiro, desenvolvido pela Agência Nacional das Águas baseado no Monitor de Secas dos Estados Unidos (MARTINS et al., 2015), na qual valores inferiores a esse limiar sinalizam possíveis impactos à agricultura e à pecuária (ANA, 2023).

Para a identificação de um evento de seca, o critério mínimo de três decêndios consecutivos (equivalente a um mês) foi adotado. Ademais, devido à descontinuidade temporal gerada pelos ciclos das safras, a duração dos eventos atribuída foi restringida ao número de decêndios em que houve ocorrência de seca dentro da respectiva safra, mesmo nos casos em que o evento ultrapassou os limites do período de cultivo.

3.4.3.2 *Índice Climático de Umidade*

Uma outra abordagem de avaliação da disponibilidade hídrica às culturas foi o Índice Climático de Umidade (CMI), que representa o balanço hídrico composto pela precipitação (fluxos de entrada) e evapotranspiração potencial (fluxo de saída de água) (HOGG, 1997; WILLMOTT; FEDDEMA, 1992). O CMI é amplamente empregado em estudos de impactos do déficit hídrico na saúde de ecossistemas florestais (D'ORANGEVILLE et al., 2018; LEE; LEE; LEE, 2025; LEVESQUE; HAMANN, 2022). Além disso, serve como métrica para

analisar a aridez ou a escassez de água associadas às variabilidades e mudanças climáticas (NHAMO et al., 2019; SHIKWAMBANA; MALAZA; SHALE, 2021). No âmbito agrícola, este índice determina simplificadaamente o estado de umidade do solo em termos das necessidades de crescimento das culturas (CHIPANSHI et al., 2021).

Na ocorrência de alto déficit de precipitação e elevação anormal da evapotranspiração, é esperada uma redução da umidade do solo. Quando ocorre uma diminuição abrupta da disponibilidade hídrica, com impactos semelhantes às condições de seca em culturas e ecossistemas, ocorre um evento extremo de *flash drought*. Este fenômeno, ainda recente na literatura, apresenta diversas definições (LISONBEE; WOLOSZYN; SKUMANICH, 2021), assim como diferentes formas de detectá-lo (FORD et al., 2023). Por exemplo, por meio da avaliação do padrão de umidade do solo (PARKER et al., 2021; LOVINO et al., 2024; YUAN, X. et al., 2023) e na aplicação de indicadores baseados na evapotranspiração (LI et al., 2024).

Neste estudo, o CMI foi determinado de maneira semelhante ao balanço hídrico do SPEI (Equação 17), com substituição da evapotranspiração potencial pela ET₀. O índice adaptado foi agregado por média a cada cinco dias (CMI-5). De forma análoga ao realizado com os decêndios, cada mês possui 6 pentadas: 5 pentadas do dia 1 até o dia 25 e mais uma pentada artificial do dia 26 até o final do mês contendo de 3 a 6 dias, resultando em 72 pentadas ano. Além disso, a análise apenas do período de cultivo pode resultar em pentadas incompletas, nesta ocasião estes intervalos foram devidamente completados.

Após a obtenção das séries históricas do CMI-5 por unidade espacial, foram detectados episódios de declínio abrupto das condições hídricas do solo com base na meteorologia elaborada por Yuan X. et al. (2019) sobre *flash droughts*. O método aplicado condiciona o início de um evento extremo à redução de no mínimo 5 pontos percentuais do CMI-5 por pentada, necessariamente partindo de valores acima de 40 até valores iguais ou inferiores ao percentil 20. O término do episódio ocorre quando o CMI-5 ultrapassa novamente o percentil 20.

Em relação ao critério de duração mínima de um evento associado ao CMI-5, alguns trabalhos recentes sobre *flash droughts* utilizaram 20 dias (YUAN, X. et al., 2023), 15 dias (FU; WANG, 2022) e 3 semanas (LI et al., 2024). Nesta análise, a exigência mínima foi de 3 pentadas, em razão da possibilidade de detectar um número maior de eventos, consequentemente oportunizando resultados estatisticamente mais robustos.

As séries históricas dos índices estruturados em percentis, como é o caso dos limiares empregados no CMI-5, apresentam descontinuidades artificiais nas extremidades do período de referência (ZHANG et al., 2005). Para reduzir este efeito, aplicou-se o procedimento bootstrap.

O método bootstrap consiste em dividir o período de referência em dois: o período base e o período fora da base. O período fora da base corresponde ao ano para o qual os percentis serão estimados, enquanto o período base é composto pelos demais anos acrescido da repetição de algum destes anos. A partir do período base, os percentis do ano que compõe o período fora de base são calculados. O mesmo procedimento é repetido sucessivamente até que todos os anos, exceto o que compõe o período base, sejam utilizados como substituição. Por fim, os percentis do ano fora da base são calculados como a média das estimativas obtidas para suas respectivas pentadas. A metodologia utilizada para calcular os valores dos percentis foi a desenvolvida por Hyndman e Fan (1996).

3.4.4 Métricas derivadas dos índices climáticos

As séries temporais de cada índice climático e dos eventos extremos associados, agrupadas por unidade espacial, foram avaliadas sob quatro métricas: máxima intensidade, acumulado, máxima duração e frequência de ocorrência, determinadas por safras. A máxima intensidade corresponde à maior magnitude do índice associado aos estresses ou condições de seca, enquanto o acumulado representa o somatório dos valores do índice. Já a máxima duração refere-se à maior duração dentre os eventos extremos detectados. Por fim, a frequência de ocorrência é definida como a razão entre o número de dias com eventos extremos e a duração total do ciclo de cultivo.

Os valores dos índices climáticos e as métricas derivadas foram avaliados em três recortes temporais de 20 anos, com o intuito de verificar possíveis padrões cíclicos: 1964–1983 (período antigo), 1984–2003 (intermediário) e de 2004–2023 (recente), sendo o intervalo de 1964 a 1983 como amostra de referência para comparação com os demais. Para auxiliar na análise das tendências temporais, a presença de diferenças estatísticas entre essas amostras foi avaliada por testes de comparação entre distribuições amostrais.

Para os agrupamentos de valores dos índices, aplicou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS), devido à sua sensibilidade a diferenças nos extremos da distribuição (cauda). Adicionalmente, para as métricas, foram empregados os testes de Kruskal-Wallis e a Análise de Variância de uma Via (ANOVA). Devido ao fato do ANOVA ser um teste paramétrico, a sua aplicação foi condicionada à verificação prévia da normalidade e à homogeneidade das variâncias, por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente. No caso em que

essas premissas foram violadas, o teste de Kruskal-Wallis foi empregado como alternativa. Todos os testes foram conduzidos ao nível de significância de 5%.

3.5 Análise das Tendências Temporais

Na análise de tendência foram aplicados dois métodos: o método de Regressão Linear Simples (RL) e o método de Inclinação de Sen (IS) em conjunto com o teste de Mann-Kendall (MK). Essas abordagens já foram utilizadas em estudos que investigam tendências de índices climáticos (LI et al., 2022; MAKUYA et al., 2024; SALVADOR; BRITO, 2018; SSEMBAJWE et al., 2025; WU et al., 2025). A aplicação dessas abordagens distintas teve como intuito a validação cruzada dos resultados.

O RL é um modelo paramétrico que assume uma relação linear entre as variáveis, além de outras suposições como a normalidade dos resíduos. Esse modelo estima a tendência por meio do coeficiente angular, que representa o comportamento das séries históricas. Neste estudo, tal parâmetro foi determinado por meio do método dos mínimos quadrados, abordagem presente em estudos recentes (LUCAS et al., 2021; YANG; JIANG; DING, 2023). Por fim, a significância estatística das tendências estimadas foi avaliada pelo teste T de Student.

Por outro lado, o IS (SEN, 1968) e o MK (MANN, 1945; KENDALL, 1955) não são paramétricos e não requerem que os dados sigam uma distribuição específica. No caso do IS, a tendência é estimada a partir da mediana das inclinações das retas que conectam todos os pares distintos de pontos da série temporal (SEN, 1968), o que confere robustez perante a ocorrência de *outliers*. Já as tendências estimadas pelo IS tiveram sua significância estatística avaliada por meio do teste Z padronizado MK.

Os métodos citados foram implementados na linguagem R, sendo o MK e a IS aplicados especificamente por meio do pacote *trend* (POHLERT, 2023). As tendências estimadas das métricas foram consideradas significativas apenas quando os testes rejeitaram a hipótese nula ao nível de confiança de 95%. No entanto, para o RL, devido à exigência de normalidade e heterocedasticidade dos resíduos, o valor-p atribuído ao modelo precisou ser validado. Para isso, essas propriedades estatísticas foram avaliadas por meio dos testes de Anderson-Darling e Breusch-Pagan, respectivamente, ambos com nível de significância de 5%.

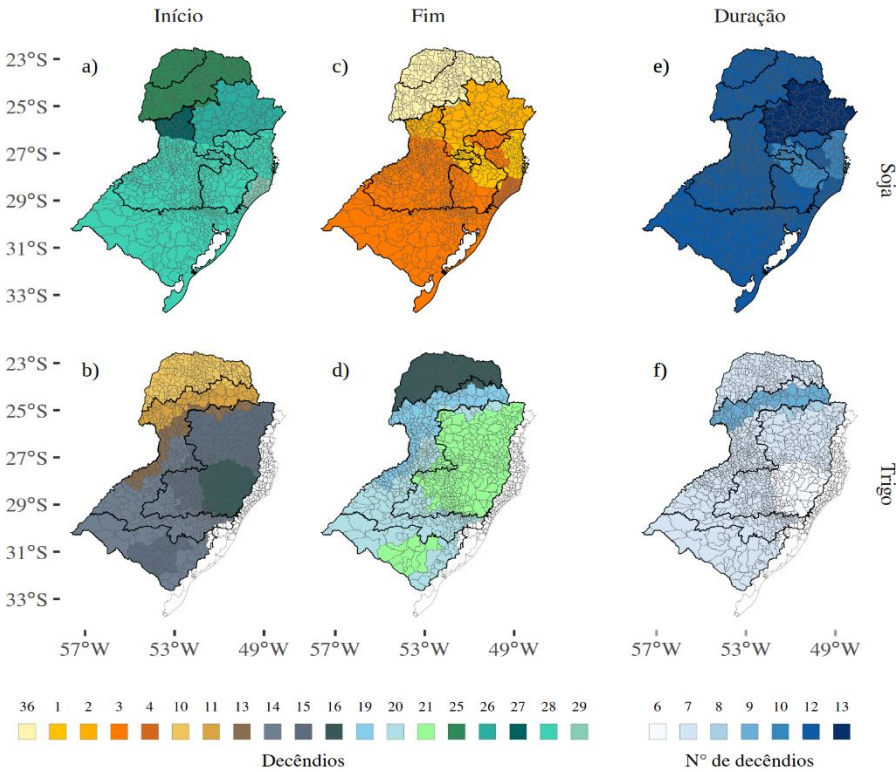
4 RESULTADOS

4.1 Períodos de cultivos

4.1.1 Zoneamento de Risco Climático

O período de plantio da soja recomendado pelo ZARC para a safra 2023/2024 na Região Sul apresenta um nítido comportamento latitudinal (Figura 3a e 3c). Nas sub-regiões 201 e 202, o plantio teve início no primeiro decêndio de setembro (25° decêndio) e se estendeu até o final de dezembro (36° decêndio). Em áreas adjacentes, nas porções setentrionais das sub-regiões 102 e 103, o intervalo recomendado foi do final de setembro (26°-27° decêndios) até o segundo decêndio do ano seguinte. Em latitudes mais elevadas, o calendário de semeadura foi mais tardio, concentrando-se entre outubro e janeiro. A exceção fica por conta de uma pequena porção litorânea da sub-região 104, onde o período de plantio se encerra no primeiro decêndio de fevereiro (4° decêndio).

Figura 3— Calendário de plantio recomendado pelo ZARC para a soja e o trigo, com painéis que informam o início (a, b) e o fim (c, d), e suas respectivas durações dos períodos indicados (e, f).



Fonte: Autor

Conforme as limitações da ZARC da soja, de maneira geral, a duração do período recomendado de plantio na Região Sul foi de 4 meses (12 decêndios, Figura 3e). As exceções foram as sub-regiões 103 e 104, onde o cultivo se prolongou por 10 e 13 decêndios, respectivamente.

Ao contrário da soja, o calendário de plantio do trigo apresentou um padrão distinto, concentrando nos meses de outono e inverno (Figura 3a e 3c). Na sub-região 3, diferente das demais divisões, a janela de plantio foi uniforme, iniciando em abril (10° decêndio) e encerrando no primeiro decêndio de junho (16° decêndio). Já na sub-região 2, o intervalo recomendado foi do 10° ao 20° decêndio, com plantio mais tardio nas áreas ao norte. Na sub-região 1, o início variou de maio até o primeiro decêndio de junho (14° a 16° decêndios) e o término se concentrou nos últimos dois decêndios de julho (20°-21° decêndios).

A partir disso, a duração da janela de plantio do trigo (Figura 3f) foi, em linhas gerais, de 7 decêndios. As exceções ocorreram em duas porções específicas: na sub-região 2, em área localizada na transição entre as demais sub-regiões, onde a duração predominante foi de 3 meses; e na região central da sub-região 3, onde o período foi reduzido para 2 meses.

4.1.2 Períodos Apto de Cultivo

Os PACs da soja e do trigo foram determinados conforme descrito na seção metodológica, com base no ciclo médio das culturas (Tabela 3) e no calendário de plantio recomendado pelo ZARC (Figura 3).

Tabela 3— Duração média do ciclo da soja e do trigo, por macrorregião e unidades federativas, com base nos registros de cultivares disponíveis no SISZARC.

(continua)		
UF	Duração (dias)	Nº de decêndios
Soja - Macrorregião 1 (101, 102, 103, 104)		
RS	133	13
SC	132	13
PR	130	13
Soja - Macrorregião 2 (201, 202)		
PR	124	12

Tabela 3— Duração média do ciclo da soja e do trigo, por macrorregião e unidades federativas, com base nos registros de cultivares disponíveis no SISZARC.

(conclusão)		
UF	Duração (dias)	Nº de decêndios
Trigo - Macrorregião 1		
RS	133	13
SC	132	13
PR	131	13
Trigo - Macrorregião 2		
RS	129	13
SC	128	13
PR	123	12
Trigo - Macrorregião 3		
PR	117	12

Fonte: Autor

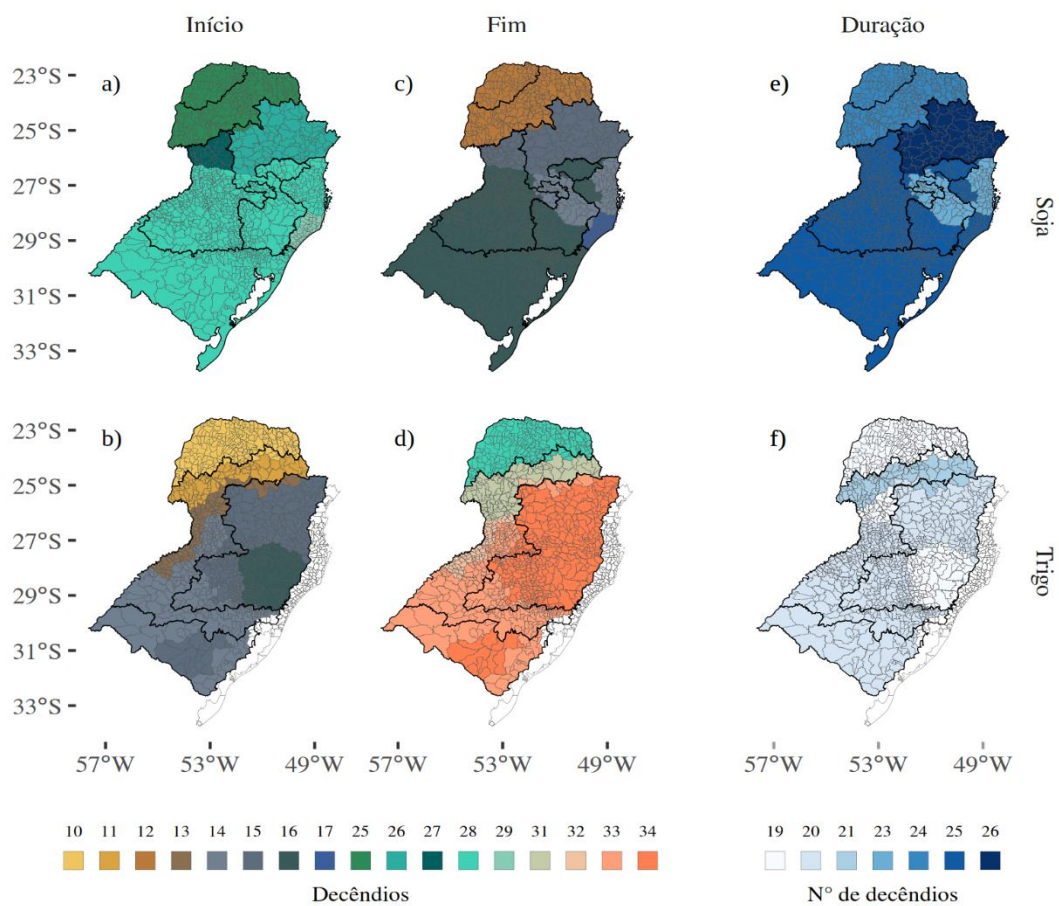
No que se refere ao ciclo médio, observou-se que, de modo geral, as durações foram semelhantes sob a mesma macrorregião, sem grandes distinções entre as unidades federativas. Contudo, os estados localizados mais ao sul da região apresentaram valores (em dias) maiores. Já em decêndios, predominaram durações de 13 decêndios tanto para a soja quanto para o trigo. As exceções ocorreram na macrorregião 2, especificamente no PR, e na macrorregião 3 (exclusiva para o trigo), onde a duração foi de 12 decêndios.

Para o PAC da soja (Figura 4a e 4c), observa-se a recorrência do padrão latitudinal visto no ZARC, em que as sub-regiões localizadas ao norte da região (201 e 202) encerram o PAC mais precocemente, no 12º decêndio do ano. Enquanto nas demais sub-regiões, o término ocorre entre 14º e 17º, com datas mais tardias nas porções meridionais. Assim, o intervalo de cultivo se estendeu entre 23 e 26 decêndios ao longo da região (Figura 4e). Na sub-região 103, observa-se um padrão heterogêneo: maior duração ao norte e menor na porção central. Comportamento semelhante ocorreu nas sub-regiões 102 e 104, com duração entre 23 e 25 decêndios. Já nas sub-regiões 201 e 202, a duração foi homogênea, com 24 decêndios.

Quanto ao encerramento do PAC do trigo (Figura 4b e 4d), a sub-região 3 finalizou o período no primeiro decêndio de outubro (28º decêndio). Na sub-região 2, especialmente nas áreas próximas à sub-região 3, o término ocorreu três decêndios depois, enquanto nas áreas

meridionais da sub-região 2 foi mais tardio, chegando até o 33° decêndio. Ao mesmo tempo, na sub-região 1, o encerramento concentrou-se majoritariamente no segundo decêndio de dezembro (34° decêndio), com exceção de algumas áreas com término antecipado em um decêndio. Em relação à duração (Figura 4e), observa-se um predomínio de 20 decêndios nas sub-regiões 1 e 2, com variações de um decêndio a mais ou a menos em certas porções. Na sub-região 3, por outro lado, a duração foi uniforme, de 19 decêndios.

Figura 4— Período apto de cultivo para a soja e trigo, com painéis que representam o início (a, b) e o fim (c, d) do ciclo, e respectivas durações respectivas durações (e, f).



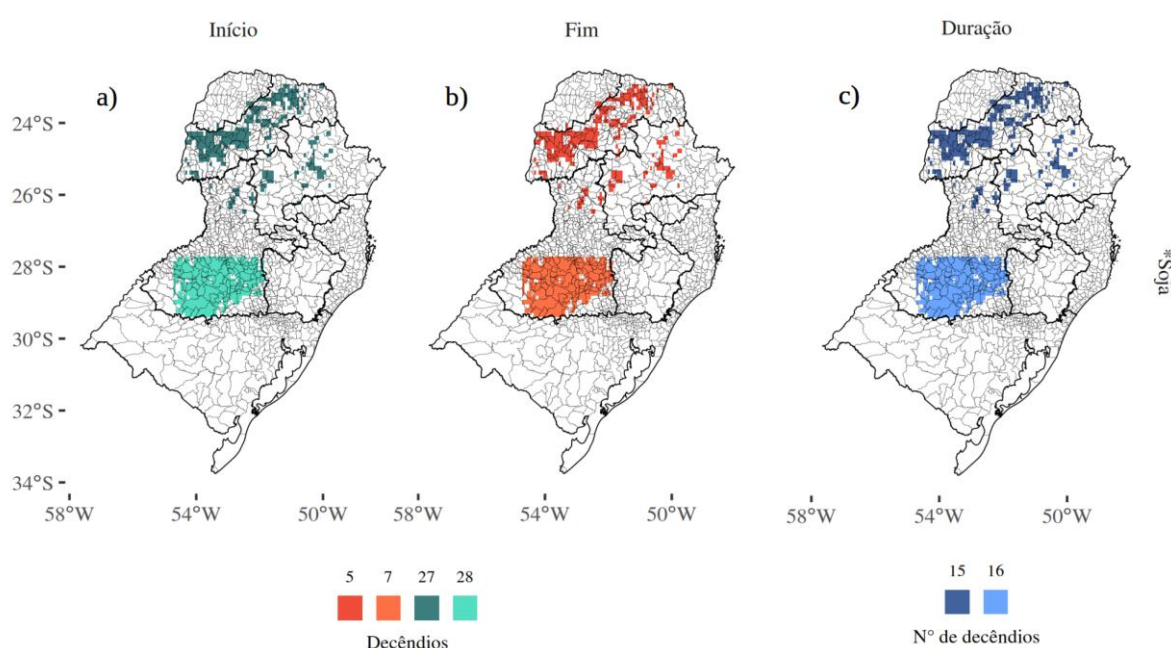
Fonte: Autor

4.1.3 Período Efetivo de Cultivo

No caso do PEC da Região Sul, conforme ilustrado na Figura 5, observa-se a concentração de células em duas grandes áreas: a norte e a central, áreas coincidentes com os municípios de maior percentual de área plantada (Figura 2b e 2e). A área norte abrange

expressivamente a sub-região 201, incluindo também áreas específicas das porções setentrionais das sub-regiões 102 e 103, além de áreas adjacentes da sub-região 202, localizadas nas proximidades da 201. Já na área central, diferentemente da anterior, as células concentram-se em uma única zona contínua, localizada na porção meridional da sub-região 102. Por fim, devido à ausência de células de análise, as sub-regiões 101 e 104 não foram contempladas no PEC.

Figura 5— Período efetivo de cultivo para a soja, com painéis que representam o início (a), o fim (b) e a duração (c) do ciclo.



Fonte: Autor

Em relação à delimitação temporal (Figura 5a e 5b), a área norte apresentou um período de cultivo entre o último decêndio de setembro (27°) e o segundo decêndio de fevereiro (5°). Por sua vez, a área central apresentou um calendário de cultivo mais tardio, com início no primeiro decêndio de outubro (28°) e término no primeiro decêndio de março (7° do ano seguinte).

Em comparação ao PAC da soja, nas células da área norte, a emergência da soja ocorre de 1 a 3 decêndios após o início do PAC (Figura 4a), já a colheita se dá entre 7 a 9 decêndios antes do seu encerramento (Figura 4c). Por outro lado, na área central, o início do PEC ocorre simultaneamente com o PAC, porém se encerra com 3 meses de antecedência.

4.2 Análise das distribuições dos índices climáticos extremos

Conforme as delimitações dos períodos de cultivo (PAC e PEC) e a abrangência temporal do BR-DWGD, os índices climáticos extremos foram calculados para 62 safras de soja e 63 safras de trigo. Os valores dos índices estão apresentados nas Figuras 6 a 9, por meio de diagramas de caixas mensais, organizados em três recortes temporais: 1964–1983 (período antigo), 1984–2003 (intermediário) e de 2004–2023 (recente). Ademais, como mencionado na seção metodológica, o período antigo foi adotado como referência para as comparações estatísticas com os demais períodos, por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) ao nível de significância de 5%. As representações equivalentes em escala decendial, porém sem o teste estatístico, podem ser visualizadas nas Figuras A1 a A4 (Apêndice A).

De modo geral, as distribuições de T_{maxx} e VPD_x apresentaram padrões semelhantes, em função de suas definições, com valores centrados em torno de zero e ocorrências pontuais de valores positivos fora da tendência central. Nesse contexto, a posição do terceiro quartil e a magnitude dos valores extremos se tornam os principais elementos de distinção entre os períodos e os meses analisados, indicando aqueles em que o estresse foi mais frequente e intenso.

Em relação às distribuições dos valores dos índices de seca, observam-se caixas centradas próximas de zero, com pequenas variações em função do recorte temporal e do mês analisado, além da presença de valores extremos positivos e negativos. Na análise da situação hídrica ao longo do tempo, a comparação das posições centrais das distribuições entre os períodos serve como indicador. Por exemplo, períodos com caixas deslocadas para valores negativos sugerem condições mais secas, enquanto caixas deslocadas para valores positivos indicam condições mais úmidas.

De forma semelhante ao observado nos índices de seca, as distribuições mensais do CMI-5 também se concentram em torno de zero, com pequenas variações de posição conforme o mês e a sub-região. No entanto, para o CMI-5, a posição do primeiro quartil mostrou pouca alteração entre os períodos, sugerindo ausência de mudanças significativas nos valores mais baixos.

Além disso, os valores extremos positivos de CMI-5 excederam amplamente o intervalo interquartil, refletindo ocorrências pontuais de excesso hídrico, possivelmente associados a eventos de precipitação intensa. Por outro lado, observa-se a ausência de valores extremos inferiores, sugerindo baixa frequência de estresse hídrico severo em janelas de 5 dias.

4.2.1 Distribuições dos índices climáticos para o PAC da soja

Conforme as distribuições de T_{maxx} (Figuras 6 e 7, subpainéis a a c), o estresse térmico ocorre de forma mais frequente nas sub-regiões 201 e, sobretudo, a 202, em comparação com as demais sub-regiões, especialmente no período recente (2004–2023). Nesse período, os pontos máximos foram levemente mais elevados do que os demais recortes, o que indica uma acentuação, mesmo que branda, da máxima intensidade de T_{maxx}.

Ademais, dois padrões visivelmente distintos evidenciam diferenças de extremos de T_{maxx} entre as macrorregiões. Nas sub-regiões da macrorregião 1, os maiores valores concentram-se na porção central do período de cultivo, próximo a 10 °C, enquanto valores intermediários predominam nas fases iniciais e valores mais baixos nas fases finais. Por outro lado, nas sub-regiões 201 e 202, observa-se uma baixa variabilidade ao longo dos meses, com valores máximos entre 6 e 10 °C em praticamente todo o período de cultivo.

Em relação ao VPD_x (Figuras 6 e 7, subpainéis d a f), as maiores intensidades foram registradas no período recente (2004–2023) em praticamente todas as sub-regiões, atingindo o dobro daquelas registradas nos demais intervalos na maioria dos meses. As exceções foram as sub-regiões 103 e 104, que não demonstraram variações significativas entre os recortes temporais e valores que raramente excederam 0,5 kPa.

De forma semelhante ao observado no T_{maxx}, observa-se padrões distintos dos valores extremos de VPD_x de acordo com a sub-região analisada. As sub-regiões 101 e 102 apresentaram extremos mensais elevados em boa parte do PAC, com picos que atingiram 1,5 kPa na porção central, particularmente no verão. Enquanto as sub-regiões 201 e 202, por sua vez, já iniciaram o ciclo com valores superiores a esse pico, reduzindo gradualmente ao longo dos meses.

No que diz respeito às distribuições dos valores dos índices SPI-3 e SPEI-3 da macrorregião 1 (Figuras 6g a 6l, 7g e 7j), em linhas gerais, o período intermediário (1984–2003) apresentou condições mais úmidas, enquanto o período antigo (1964–1983) apresentou condições mais secas. Já entre 2004 e 2023, observa-se predominância de condições secas, com episódios localizados de excesso hídrico. Em contrapartida, nas sub-regiões 201 e 202, o SPI-3 não indicou prevalência de condições hídricas em nenhum período, enquanto o SPEI-3 apontou um período mais seco entre 2004 e 2023.

Figura 6— Distribuições mensais dos índices climáticos: Tmax (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), nas sub-regiões sojícolas: 101, 102 e 103, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.



Fonte: Autor

Figura 7— Distribuições mensais dos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), nas sub-regiões sojícolas: 104, 201 e 202, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.



Fonte: Autor

4.2.2 Distribuições dos índices climáticos para o PEC da soja

Entre as distribuições mensais de Tmaxx do PEC (Figura 8a a 8c) e do PAC, observa-se semelhança nos máximos valores atípicos entre sub-regiões análogas. No entanto, de maneira geral, os extremos foram levemente inferiores aos observados no PAC, permanecendo entre 6 °C a 10 °C, e inferiores a esse faixa na sub-região 103*. Esta última foi a única a também não apresentar aumento considerável, acima do terceiro quartil, na frequência de estresse, enquanto a sub-região 202* apresentou um aumento nítido.

Quanto ao VPDx (Figura 8e a 8h), os padrões mensais do PEC novamente se assemelham aos do PAC, sugerindo o cultivo da soja tanto em locais quanto em meses de maior suscetibilidade a estresses por VPD. As exceções a esse padrão foram observadas na sub-região 103 e, no mês de setembro, nas sub-regiões 201 e 202*, onde os limites superiores foram inferiores em comparação com as sub-regiões análogas.

Em termos numéricos de VPDx, observou-se um contraste marcante entre as sub-regiões. Enquanto na 103*, os valores extremos permaneceram abaixo de 0,5 kPa nos 60 anos analisados, nas demais sub-regiões, especialmente entre 2004 e 2023 nas 201* e 202*, registraram-se extremos superiores a esse patamar, ainda que com intensidades variáveis ao longo do ciclo.

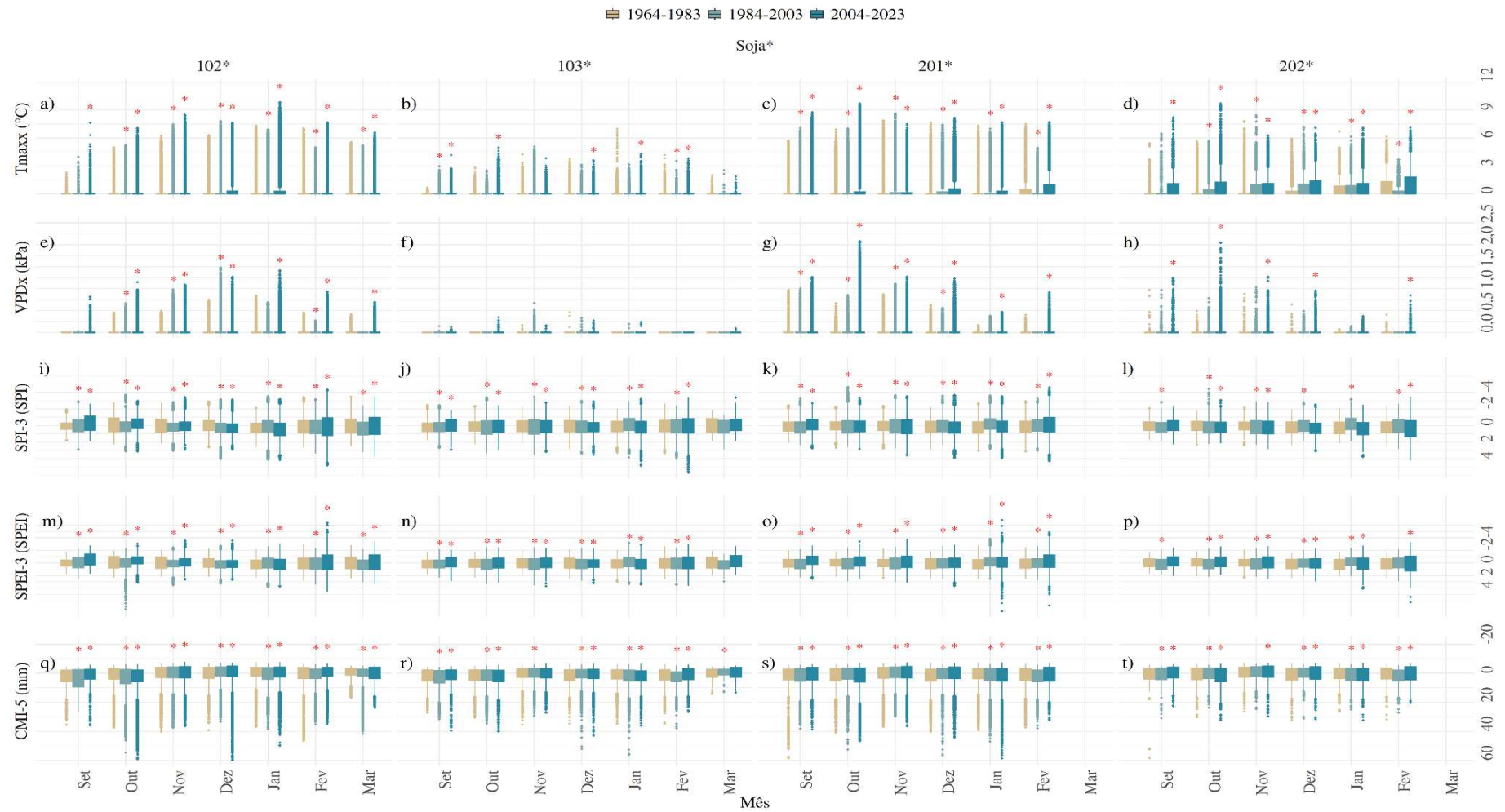
No que diz respeito às distribuições dos valores dos SPI-3 e SPEI-3 do PEC (Figura 5i a 5p), identifica-se um padrão semelhante com as do PAC em relação às condições hídricas de cada período. A principal distinção está em extremos menos intensos, principalmente indicados pelo SPEI-3, em razão da diminuição da extensão dos limites das distribuições.

4.2.3 Distribuições dos índices climáticos para o PAC do trigo

Em relação ao Tmaxx (Figura 9a a 9c), observam-se maiores frequências de estresse térmico nas sub-regiões 2 e 3, principalmente no final do PAC dos recortes temporais mais recentes. Cabe destacar o aumento de ocorrências na sub-região 3 entre os meses de setembro e outubro, visto a diferença marcante entre o período recente (2004–2023) e o antigo (1964–1983), reiterado por diferença significativa entre as amostras.

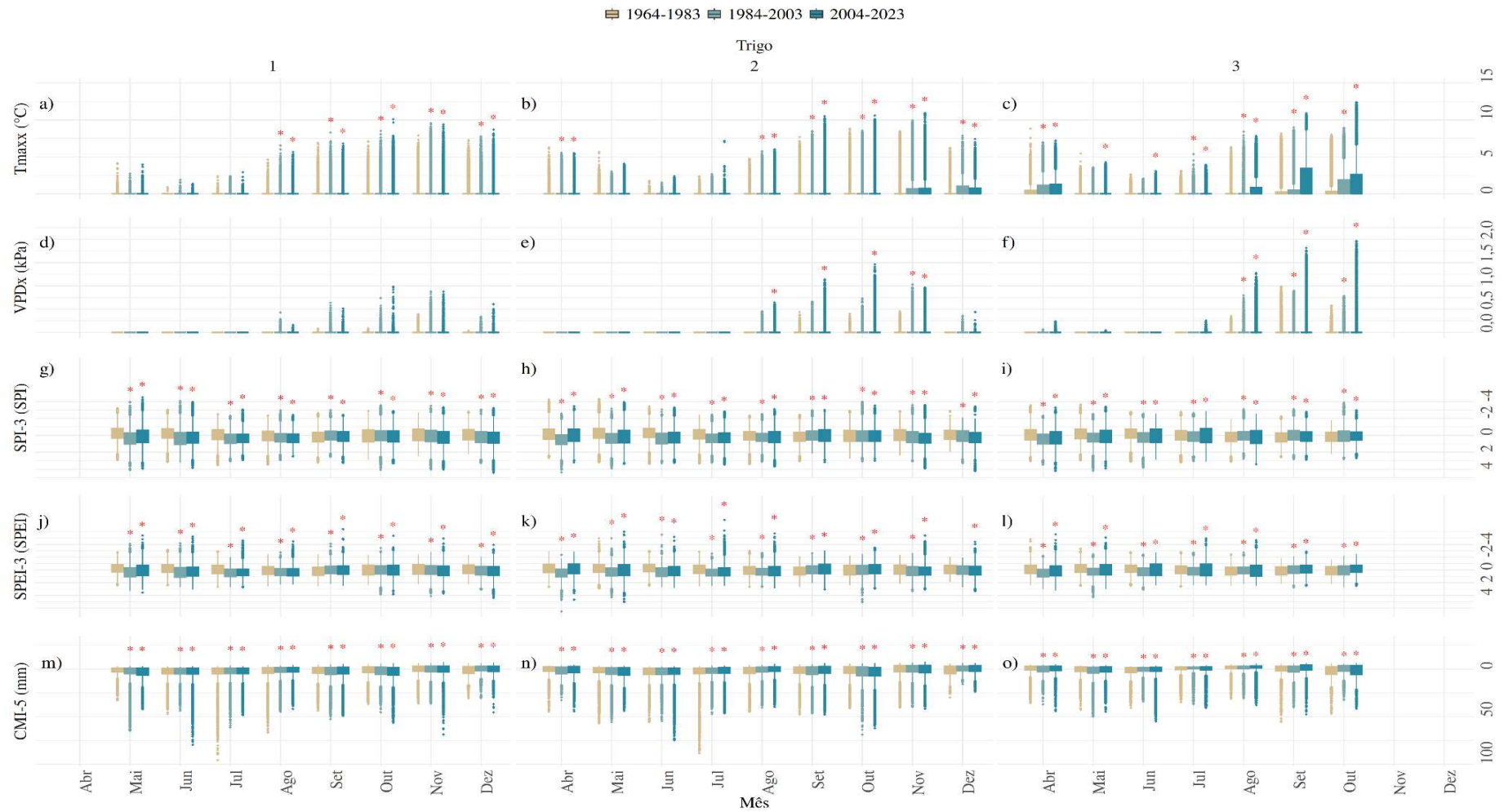
No que se refere às intensidades extremas, os meses de maio a julho apresentaram os menores valores extremos, raramente ultrapassando 5 °C, enquanto os maiores concentraram-se a partir de setembro. Na comparação entre os recortes temporais, o período recente (2004–2023) apresentou extremos levemente maiores, principalmente no terço final do PAC.

Figura 8— Distribuições mensais dos índices climáticos: Tmax (a–d), VPDx (e–h), SPI-3 (i–l), SPEI-3 (m–p) e CMI-5 (q–t), nas sub-regiões sojícolas: 102*, 103*, 201* e 202*, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.



Fonte: Autor

Figura 9— Distribuições mensais dos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), nas sub-regiões tritícolas: 1, 2 e 3, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.



Fonte: Auto

Quanto às distribuições de VPDx (Figura 9d a 9f), os estresses ocorreram predominantemente a partir de agosto em todas as sub-regiões, com maiores intensidades nos meses de setembro e outubro. Nesses meses, observa-se que o período recente (2004–2023) apresentou os maiores extremos em comparação com os demais períodos, sobretudo na sub-região 3 onde o VPDx atingiu o dobro do registrado nos períodos anteriores, próximo a 2 kPa.

No que diz respeito às distribuições dos índices de seca para o trigo (Figura 9g a 9l), foi evidenciado um padrão variável na porção inicial do PAC, na qual o período antigo (1964–1983) apresentou condições mais secas. Já entre 1984 e 2003, prevaleceram sinais de maior umidade. Em contrapartida, o período recente teve um comportamento mais heterogêneo das condições hídricas: mais úmido nas sub-regiões 1 e 2, especialmente entre junho e agosto, enquanto na sub-região 3, observou-se sinais de secagem, sobretudo no SPEI-3.

Na análise dos valores extremos e da extensão dos limites, observa-se um comportamento mais homogêneo ao longo do tempo conforme as distribuições mensais do SPI-3. Contrapondo a isso, o SPEI-3 apresentou maiores discrepâncias, especialmente no período recente (2004–2023), devido à ocorrência de extremos inferiores a –5 em todas as sub-regiões. Tal magnitude não foi observada ao longo do restante da série temporal, tampouco nas distribuições mensais do SPI-3, o que indica ocorrências pontuais de condições de seca intensa.

4.3 Distribuição espacial do número de eventos extremos

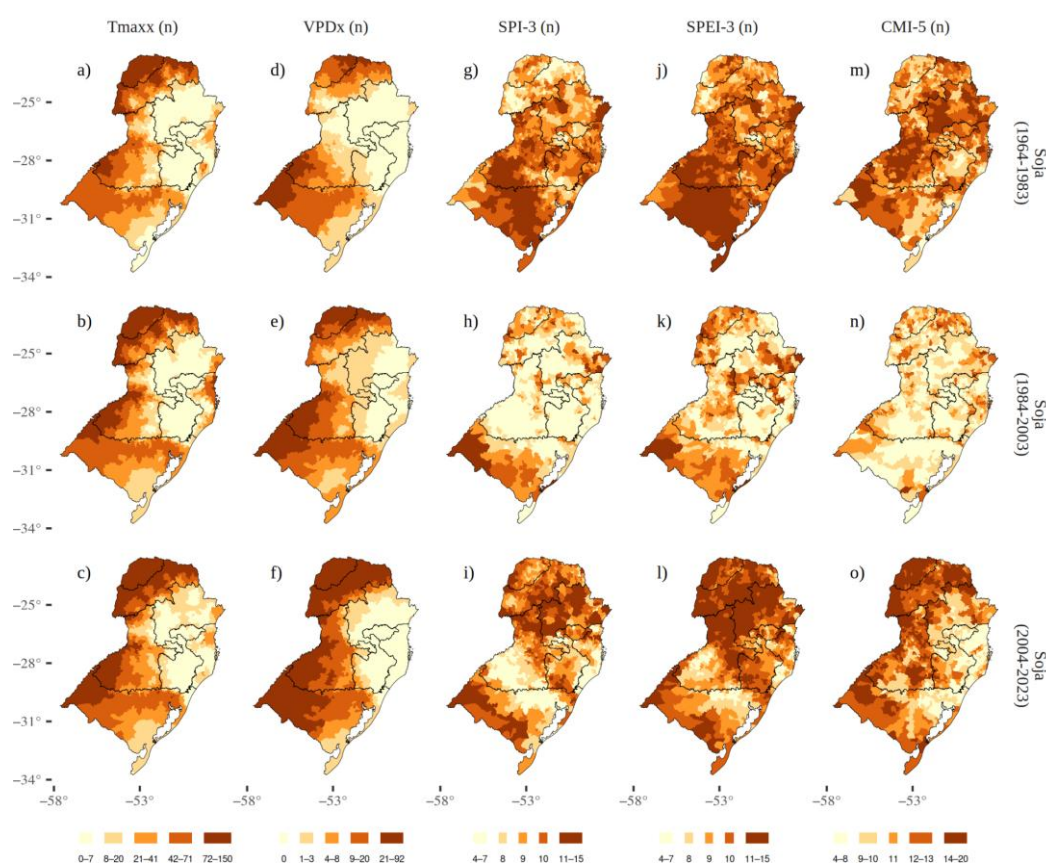
Assim como os valores dos índices, os números de eventos extremos detectados nos diferentes períodos de cultivo também foram demonstrados em diferentes recortes temporais (Figuras 10 a 12). Além disso, a distribuição mensal dos eventos, sem distinção por período, pode ser consultada nas Figuras B1 a B3 (Apêndice B). Vale ressaltar que, para fins de contabilização mensal, eventos que se estenderam por mais de um mês foram registrados em todos os meses em que ocorreram.

Os resultados evidenciaram padrões distintos ao longo do tempo. De modo geral, observou-se um aumento da incidência de eventos de estresse térmico e por VPD em áreas coincidentes ao longo do tempo, com alterações mais acentuadas na frequência de eventos associados ao VPDx. As condições hídricas foram marcadas por contraste temporal e espacial: período intermediário com frequência nitidamente menor em relação aos demais, além de número de ocorrências discrepantes em uma mesma sub-região. Além disso, notou-se que o SPEI-3 detectou mais eventos do que o SPI-3, especialmente na porção setentrional do período recente (2004–2023).

4.3.1 Análise espacial da frequência de extremos no PAC da soja

Quanto à frequência de eventos associados ao Tmaxx e VPDx no PAC da soja (Figura 10a a 10f), observa-se um padrão espacial semelhante ao das classes mínima e máxima, além do aumento progressivo no número de eventos ao longo dos períodos. Contudo, o VPDx apresentou mudanças mais acentuadas entre o período intermediário (1984–2003) e o mais atual (2004–2023).

Figura 10— Distribuição espacial do número de eventos extremos por década, associados aos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), no PAC da soja, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.



Fonte: Autor

No caso da contagem de secas detectadas pelos índices de seca (Figura 10g a 10l), o SPEI-3 apresentou frequência de eventos levemente superior à do SPI-3, especialmente na porção setentrional da região. Esse padrão foi mais evidente entre 2004 e 2023, quando o SPEI-

3 registrou mais de 10 eventos por década, enquanto o SPI-3 mostrou ocorrência da mesma classe de forma mais restrita.

Comum a ambos os índices, o período intermediário (1984–2003) apresentou predomínio de baixas ocorrências em grande parte da região, diferentemente dos demais recortes temporais. A exceção a esse padrão ocorreu em municípios da sub-região 101, localizados na fronteira da região, onde se manteve o intervalo de 9 a 15 eventos por década. Na comparação entre o período recente e o antigo (2004–2023 e 1964–1983), predominou a manutenção ou o aumento no número de eventos. Entretanto, destacou-se uma zona que abrange a porção meridional da sub-região 102 e parte da 101, com redução na contagem.

O contraste entre os recortes temporais também foi encontrado no CMI-5 (Figura 10m a 10o). No período intermediário (1984–2003) predominou a ocorrência de até 8 eventos por década em grande parte da região. Enquanto nos demais períodos, os valores superaram esse patamar, exceto em áreas a leste e na faixa central durante as últimas 20 safras.

4.3.2 Análise espacial da frequência de extremos no PEC da soja

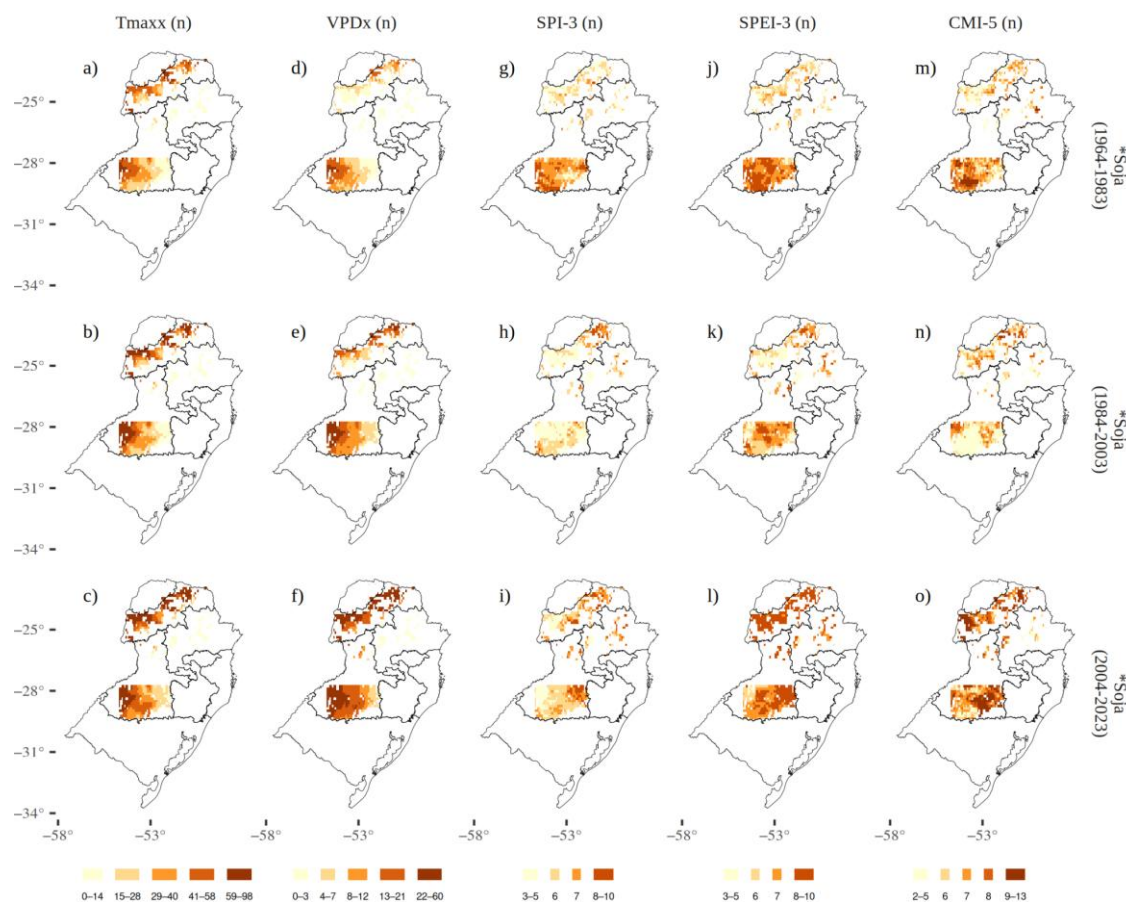
Com base na Figura 11, as classes superiores de frequência no PEC foram inferiores às observadas no PAC, contudo, o comportamento espacial ao longo dos recortes temporais se assemelha. Deve-se ressaltar que o número de ocorrências está diretamente relacionado, entre outros fatores, à duração do período de cultivo, o que pode ter refletido no valor reduzido em comparação ao PAC.

À vista disso, semelhante ao observado na Figura 10, o número de eventos por década detectados por meio de Tmaxx e VPDx aumentou gradativamente ao longo dos períodos (Figura 11a a 11f), variação associada à ampliação das áreas com valores superiores a 59 e 22, respectivamente. A única exceção ocorreu na sub-região 103*, que manteve o limite superior inalterado, com no máximo 14 registros de estresse térmico e apenas 3 associados ao VPD.

Ademais, em relação aos valores mensais (Figura B2), as maiores frequências detectadas de VPDx e Tmaxx se assemelham aos observados na distribuição mensal da soja no PAC (Figura B1). Esse fato ocorre devido à localização espacial do cultivo e a abrangência do PEC, que coincide majoritariamente com os locais e meses de maior incidência.

Quanto às ocorrências de secas (Figura 11g a 11i), o SPEI-3 registrou frequência superior ao SPI-3, sobretudo entre 2004 e 2023 na região setentrional. No leste da sub-região, com diferença acentuada entre os índices, o SPEI-3 registrou o dobro de ocorrências em relação ao SPI-3 nas últimas 20 safras, variando entre 9 e 11 registros por década.

Figura 11— Distribuição espacial do número de eventos extremos por década, associados aos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), no PEC da soja, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.



Fonte: Autor

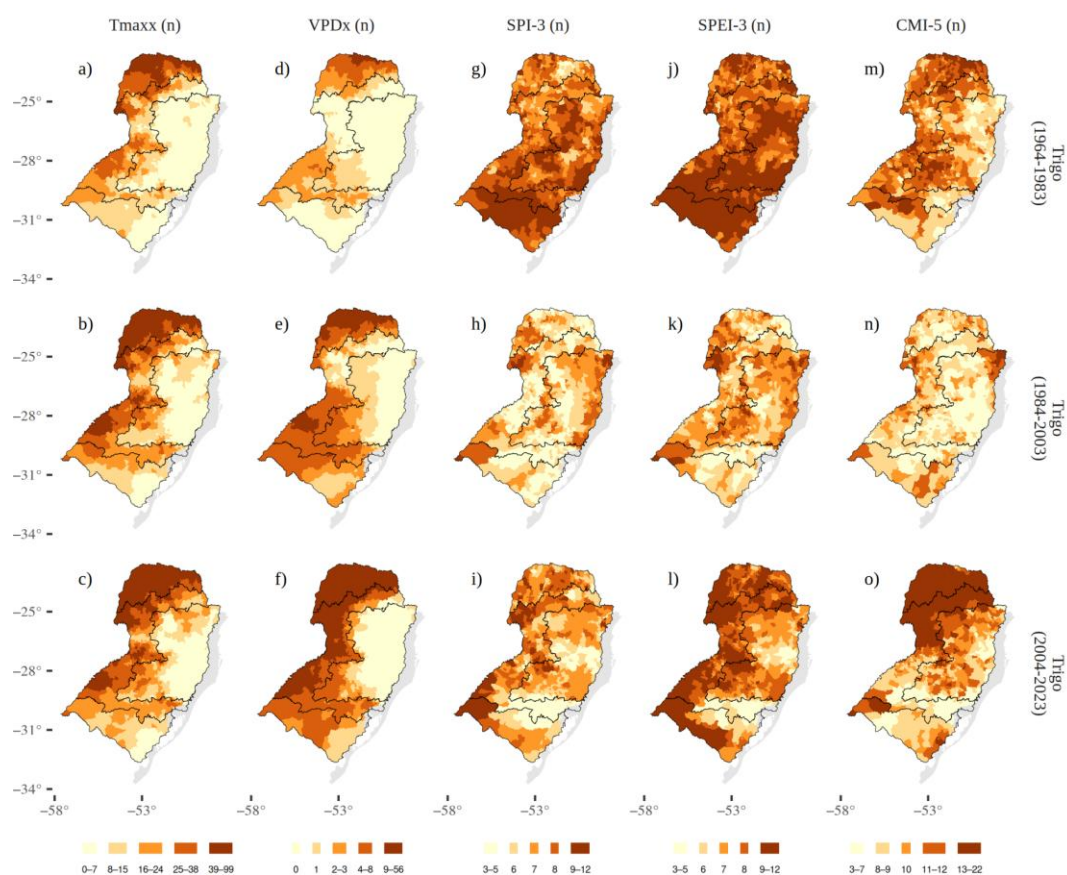
Em relação ao CMI-5 no PEC (Figura 11m a 11o), o padrão de redução da frequência de eventos observado no período intermediário do PAC da soja mostrou-se menos pronunciado. No entanto, no período recente (2004–2023), ampliaram-se as áreas da região com mais de 8 eventos por década em comparação aos demais recortes temporais.

4.3.3 Análise espacial da frequência de extremos no PAC do trigo

No que diz respeito aos eventos associados ao Tmaxx e VPDx no PAC do trigo (Figura 12a a 12f), observa-se um aumento gradual da frequência ao longo dos períodos, refletido na expansão das classes superiores de ocorrência nas sub-regiões 2 e 3. A título de exemplo, entre 1964 e 1983, apenas uma pequena parte da sub-região 3 registrava mais de 8 eventos por década relacionados ao estresse por VPD. Em contraponto, no período recente (2004–2023), a totalidade dessa sub-região e mais da metade da sub-região 2 registraram frequência superior a

esse patamar. No caso do Tmaxx, a ampliação foi mais discreta, porém perceptível, com o crescimento da área com pelo menos 25 eventos por década.

Figura 12— Distribuição espacial do número de eventos extremos por década, associados aos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), no PAC do trigo, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.



Fonte: Autor

Em contraste, a sub-região 1 registrou frequências de eventos próximas de zero para Tmaxx e VPDx, com exceção de áreas adjacentes às demais sub-regiões, onde se verificam frequências intermediárias. Nessas porções, ainda que em menor grau, também se observa um aumento de eventos ao longo do tempo.

Quanto à frequência de secas no trigo (Figura 12g a 12l), como na soja, há um contraste claro entre os recortes temporais, porém mais acentuados. O período intermediário (1984–2003) apresentou os menores números de eventos, com predomínio de até sete ocorrências por década em toda a região, independentemente do índice. No período antigo (1964–1983), ocorreu o oposto, dado pela vasta área com valores acima desse patamar. Já no período recente (2004–2023), observou-se heterogeneidade espacial, sobretudo no SPEI-3: as menores frequências

concentraram-se na porção setentrional da sub-região 1 e em uma faixa da sub-região 2 (entre segmentos da sub-região 1, no centro-leste do RS), com até seis eventos por década, enquanto áreas próximas com valores em torno de 10 no mesmo período.

No que diz respeito ao CMI-5 (Figura 12m a 12o), nota-se um contraste espacial e temporal marcante. O principal responsável por esse fato foi o predomínio de classes superiores de ocorrência nas últimas 20 safras (2004–2023) na porção setentrional da região, indicando um comportamento adverso de incidência de eventos. Semelhante ao observado na soja, esse mesmo período apresentou dicotomia das condições hídricas, enquanto o intermediário (1984–2003) registrou as menores incidências.

4.4 Distribuição espacial das médias da máxima intensidade e acumulado por recorte temporal

Conforme explicitado na seção metodológica, a máxima intensidade e o valor acumulado foram obtidos com base nas séries históricas dos índices climáticos. Os valores médios dessas métricas, por recorte temporal, estão presentes nas Figuras 13 a 15. Adicionalmente, os valores utilizados na obtenção das médias, representadas por diagramas de caixa organizados por sub-região e período, encontram-se nas Figuras C1 e C2 (Apêndice C).

Ademais, aplicaram-se testes estatísticos para comparar as amostras das métricas entre os diferentes períodos, com o intuito de verificar se os contrastes entre as médias foram acompanhados por mudanças nas propriedades estatísticas. Os testes utilizados foram ANOVA ou Kruskal-Wallis, dependendo das características das amostras de cada unidade espacial, ambos ao nível de significância de 5%. Deve-se ressaltar que a ausência de distinção estatística, pode estar associada à alta variabilidade intragrupo, e não necessariamente à inexistência de um efeito real entre os recortes temporais.

As análises indicaram que o período recente (2004–2023) concentrou as maiores médias, tanto para condições de seca quanto para umidade. De modo geral, as métricas de Tmaxx e VPDx apresentaram alterações mais significativas, atingindo seus valores máximos nesse intervalo, corroboradas pelas mudanças nas distribuições dos valores (Figura B1) e pelos testes estatísticos

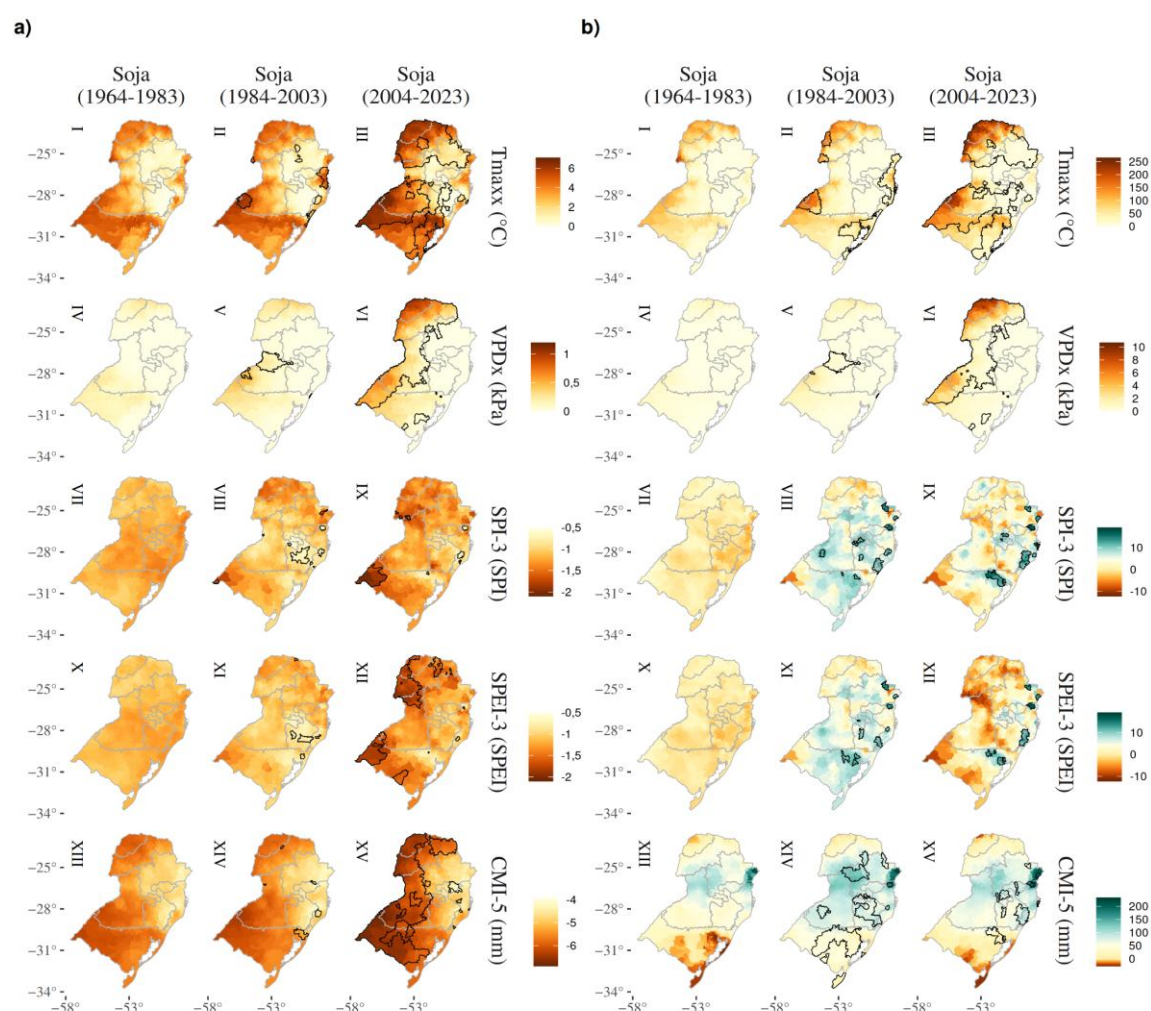
No que se refere ao regime hídrico, em geral, as mudanças foram contrastantes: enquanto a máxima intensidade evidenciou intensificação das condições de seca na porção continental, o acumulado apontou aumento de umidade em áreas litorâneas. Ademais, na

comparação entre os índices de seca, notou-se que o SPEI-3 indicou valores inferiores ao SPI-3, sobretudo na porção setentrional da região.

4.4.1 Análise espacial das médias da máxima intensidade e acumulado no PAC da soja

No que diz respeito às máximas intensidades e acumulado de Tmaxx (Figura 13a e 13b, subpainéis I a III), o período recente (2004–2023) apresentou as maiores médias em comparação aos demais recortes temporais, com predomínio de valores próximos a 6 °C e acima de 50 °C, respectivamente. As exceções a esse padrão foram as sub-regiões 103 e 104 onde os valores médios mantiveram-se em um mesmo patamar, próximos a zero.

Figura 13— Distribuição espacial da máxima intensidade média (a) e acumulado médio (b) associados aos índices climáticos: Tmaxx (I–III), VPDx (IV–VI), SPI-3 (VII–IX), SPEI-3 (X–XII) e CMI-5 (XIII–XV), no PAC da soja, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023. Municípios com amostras estatisticamente distintas em relação ao intervalo de 1964–1983 estão destacados.



Fonte: Autor

Assim como observado no Tmaxx, as médias da máxima intensidade e do acumulado de VPDx apresentaram os maiores valores no período recente, com médias bem superiores aos demais períodos, próximas a 1 kPa e 10 kPa, respectivamente. Esse aumento foi espacialmente mais restrito, localizado nas porções continentais da região, especialmente nas sub-regiões 201 e 202.

Em comparação com os demais índices, os índices de seca foram os que registraram as menores áreas estatisticamente distintas em ambas as métricas (Figura 13a e 13b, subpainéis VII a XII). Quando presentes, essas distinções evidenciaram situações contrastantes: na máxima intensidade, predominaram amostras significativas com médias negativas (condições de seca), próximas a -4, em áreas continentais. Enquanto no acumulado, observam-se médias positivas (condições de umidade) presentes em porções mais litorâneas, com valores acima de 10.

Na análise entre os índices de seca (Figura 13a e 13b, subpainéis VII a XII), destaca-se que o SPEI-3 indicou um padrão de condições mais secas em comparação ao SPI-3, devido à redução dos valores em áreas análogas. Esse comportamento resultou em uma ampliação das áreas estatisticamente distintas de máxima intensidade com médias negativas mais baixas, especialmente nas sub-regiões 201 e 202.

No que se refere às médias do valor mínimo do CMI-5 (Figura 13a, subpainéis IV a VI), os menores valores já observados foram registrados em uma extensa área estatisticamente distinta na porção continental da região entre 2004 e 2023, com valores inferiores a -6 mm. Quanto ao acumulado médio, os menores valores concentram-se nas extremidades latitudinais da região, com totais próximos de 0 mm, aumentando gradualmente em direção à porção central, onde ultrapassam 100 mm.

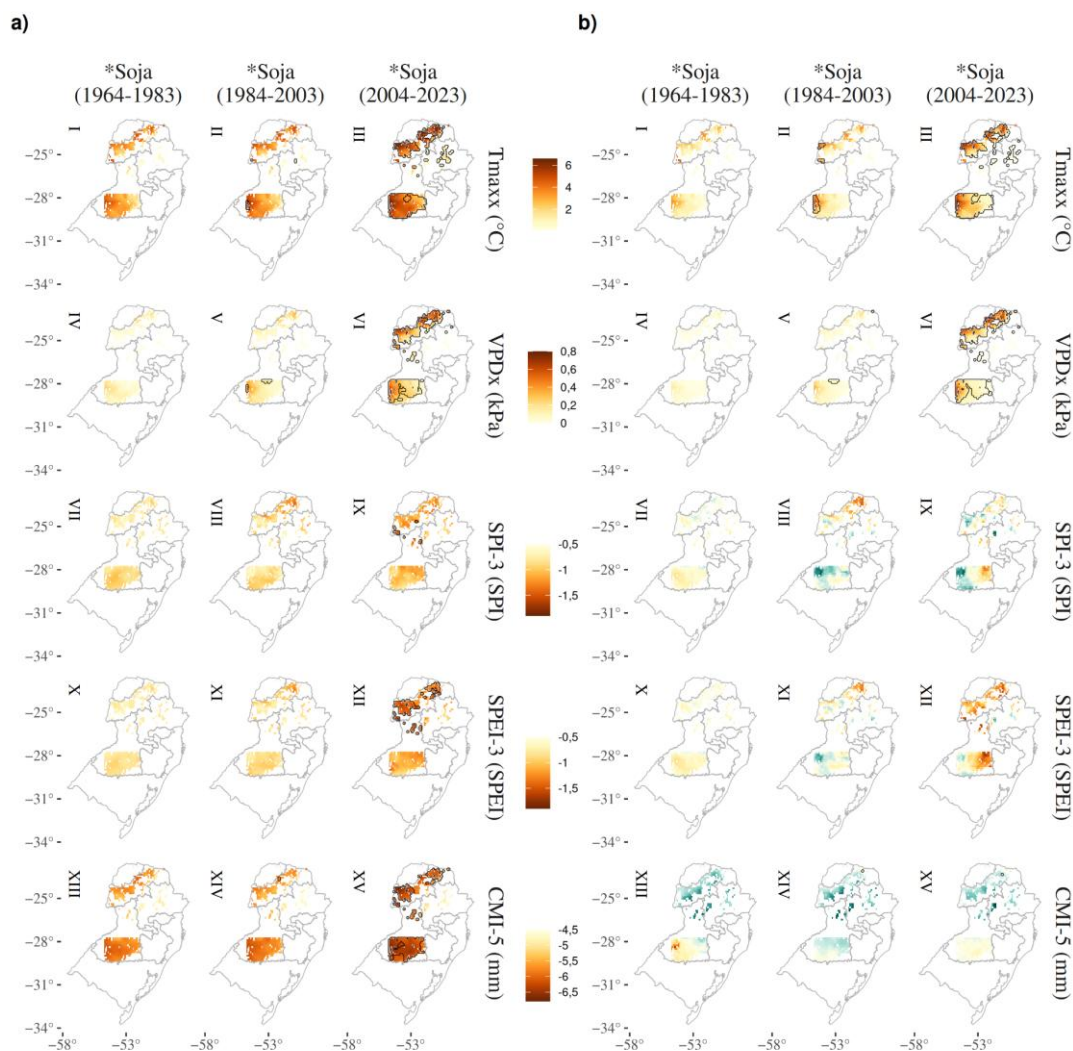
4.4.2 Análise espacial das médias da máxima intensidade e acumulado no PEC da soja

Assim como observado no PAC da soja, tanto para o Tmaxx quanto para o VPDx do PEC (Figura 14a e 14b, subpainéis I a VI), o período recente (2004–2023) deteve as maiores médias da máxima intensidade e do acumulado, assim como a maior abrangência de áreas com distinções estatísticas. Esse efeito não foi observado apenas na sub-região 103*, onde os valores permaneceram próximos a zero.

Ademais, a média da máxima intensidade do estresse térmico e por VPD foram semelhantes aos de áreas análogas ao PAC, sugerindo a coincidência do cultivo da soja em momentos de maior estresse. Em contrapartida, os acumulados foram inferiores, devido, entre

outros fatores, à menor extensão do período de cultivo, registrando valores próximos de 150 °C para T_{maxx} e de 4 kPa para VPD_x.

Figura 14— Distribuição espacial da máxima intensidade média (a) e acumulado médio (b) associados aos índices climáticos: T_{maxx} (I–III), VPD_x (IV–VI), SPI-3 (VII–IX), SPEI-3 (X–XII) e CMI-5 (XIII–XV), no PEC da soja, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023. Municípios com amostras estatisticamente distintas em relação ao intervalo de 1964–1983 estão destacados.



Fonte: Autor

No caso dos índices de seca, observa-se diferença significativa apenas na máxima intensidade, sendo mais abrangente nos valores fornecidos pelo SPEI-3 resultante da inclinação para condições mais secas para o período recente (2004–2023), com valores inferiores a -1,5. Em consonância, conforme a Figura B1, o SPEI-3 também apresentou maior frequência de intensidades extremas, com valores abaixo de -6.

Quanto aos valores acumulados (Figura 14b, subpainel VII a XII) nas últimas 20 safras, embora sem diferenciação estatística, observa-se uma maior abrangência espacial de valores negativos, especialmente nas sub-regiões 201* e 202*. Nesta última, destaca-se um contraste meridional marcante, em que os menores valores dos índices de seca localizam-se na porção leste e os maiores na porção oeste da sub-região.

A máxima intensidade do CMI-5 (Figura 14a, subpainel VII a XII) evidenciou o contraste entre o período recente (2004–2023) e os demais, devido à ampla abrangência de valores inferiores a -6 mm, corroborada pelos testes estatísticos e refletida nas posições dos quartis das distribuições (Figura B1). Em compensação, o acumulado deteve médias com poucas variações e distribuições pouco distintas (Figura B2), o que refletiu na ausência de diferenças significativas.

Complementarmente, observa-se que a intensidade máxima no PEC foi ainda mais negativa do que aquela obtida para a soja do PAC (Figura 13), indicando condições de déficit hídrico mais severas. No entanto, conforme descrito na seção metodológica, o PAC possui resolução espacial mais baixa que a do PEC, o que pode ter contribuído para uma suavização na detecção de extremos hídricos.

4.4.3 Análise espacial das médias da máxima intensidade e acumulado no PAC do trigo

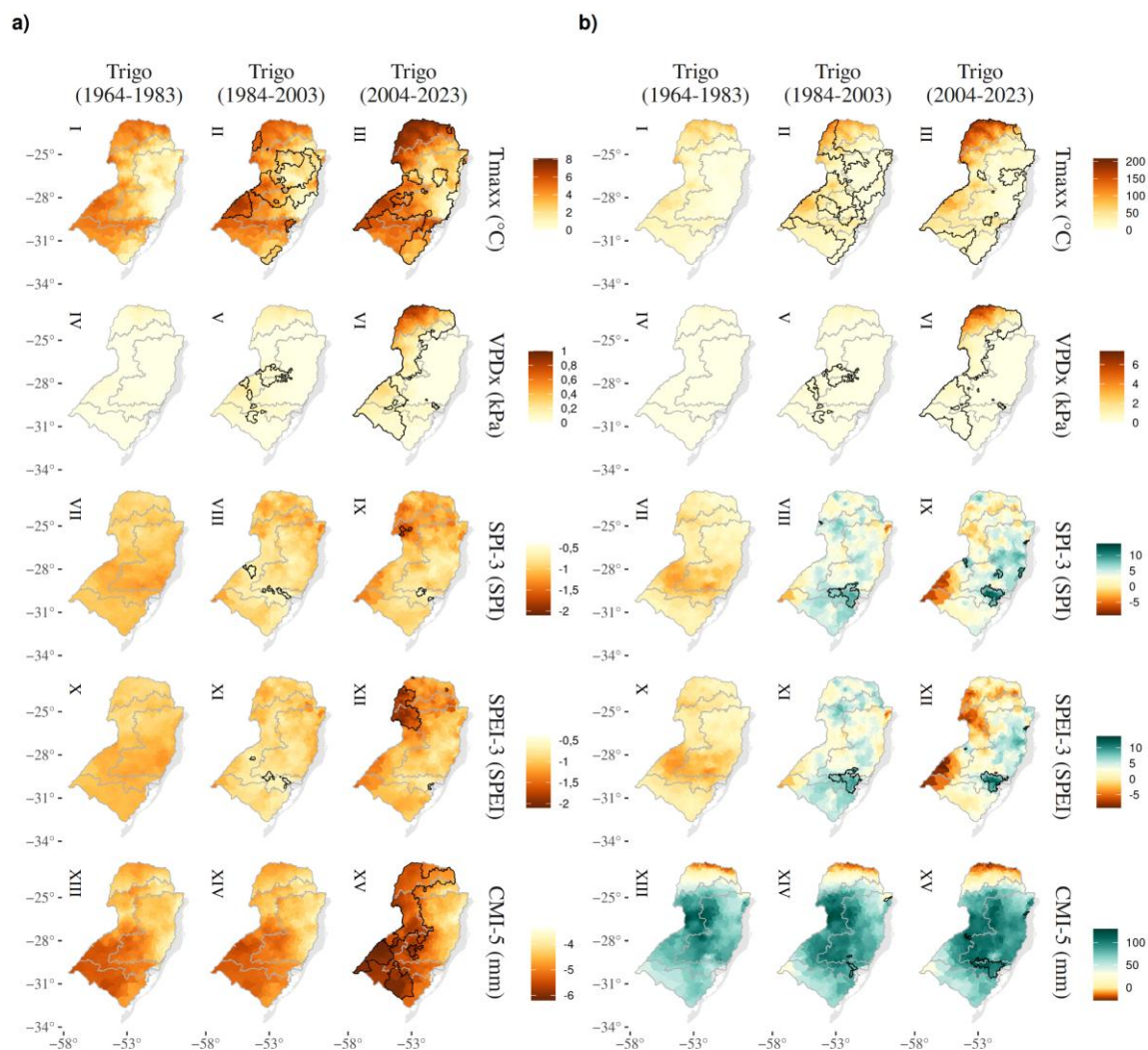
Em relação ao Tmaxx do trigo (Figura 15a e 15b, subpainéis I a III), observa-se um padrão semelhante ao identificado para a soja (Figura 13), com intensificação das médias ao longo dos períodos e ampliação gradual das áreas estatisticamente distintas, abrangendo grande parte da região. Esse comportamento é evidenciado pela predominância de valores próximos a 6 °C para a máxima intensidade e acima de 100 °C para o acumulado nas sub-regiões 2 e 3 entre 2004 e 2023.

As métricas de VPDx (Figura 15a e 15b, subpainéis IV a VI) indicaram intensificação do estresse ao longo do tempo, com médias significativamente mais elevadas no período recente (2004–2023), especialmente nas porções continentais da região. Nesse intervalo, a sub-região 3 apresentou médias superiores a 0,8 kPa e acumulados acima de 6 kPa, em contraste com os valores mais baixos observados nas demais sub-regiões (cerca de 0,5 kPa e 2 kPa). Esse contraste espacial e temporal é reforçado pelas distribuições dos valores (Figuras C1 e C2).

No caso dos índices de seca (Figura 15a e 15b, subpainéis VII a XII), as médias do SPEI-3 foram ligeiramente menores do que as do SPI-3 no período recente (2004–2023). Por exemplo, observam-se médias mais baixas na porção setentrional da região, próximas de -2

para o SPEI-3, com distinção estatística. Esse comportamento foi replicado pontualmente pelo SPI-3.

Figura 15— Distribuição espacial da máxima intensidade média (a) e acumulado médio (b) associados aos índices climáticos: Tmaxx (I–III), VPDx (IV–VI), SPI-3 (VII–IX), SPEI-3 (X–XII) e CMI-5 (XIII–XV), no PAC do trigo, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023. Municípios com amostras estatisticamente distintas em relação ao intervalo de 1964–1983 estão destacados.



Fonte: Autor

Ademais, ao analisar as médias dos valores acumulados dos índices de seca entre os diferentes recortes temporais, verifica-se um padrão bem definido. O período antigo (1964–1983) apresentou médias homogêneas, levemente negativas, enquanto no intervalo intermediário (1984–2003) houve maior predominância de valores positivos. Entre 2004 e 2023, o cenário tornou-se mais heterogêneo, com extremos positivos e negativos coexistindo. A título de exemplo, um forte contraste espacial na porção meridional da sub-região 2: o setor

leste apresentou os maiores acumulados, com valores acima de 10, ao passo que o setor oeste registrou médias inferiores a -5.

Assim como observado no CMI-5 no PAC da soja, no trigo (Figura 15a, subpainel XIII a XV), as médias das máximas intensidades no período recente (2004–2023) apresentaram redução na porção continental da região, com diferenciação estatística, atingindo valores próximos de -5 mm. Por outro lado, os valores acumulados (Figura 15b, subpainel XIII a XV) mantiveram-se em um mesmo patamar, sem variações significativas. A principal exceção ocorreu em uma pequena área no leste da sub-região 2, onde as médias aumentaram ao longo do tempo.

4.5 Distribuição espacial das médias da máxima duração e frequência de ocorrência por recorte temporal

Dando continuidade à análise das métricas, as Figuras 16 a 18 apresentam os valores médios das máximas durações e frequências de ocorrência, calculados a partir dos eventos extremos dos índices climáticos em três recortes temporais distintos. Ressalta-se que as durações médias inferiores ao critério mínimo definido na metodologia decorrem da inclusão de valores zero em safras sem ocorrência de eventos. Complementarmente, as Figuras C3 e C4 ilustram a distribuição dos valores utilizados no cálculo das médias, organizados por sub-região e período.

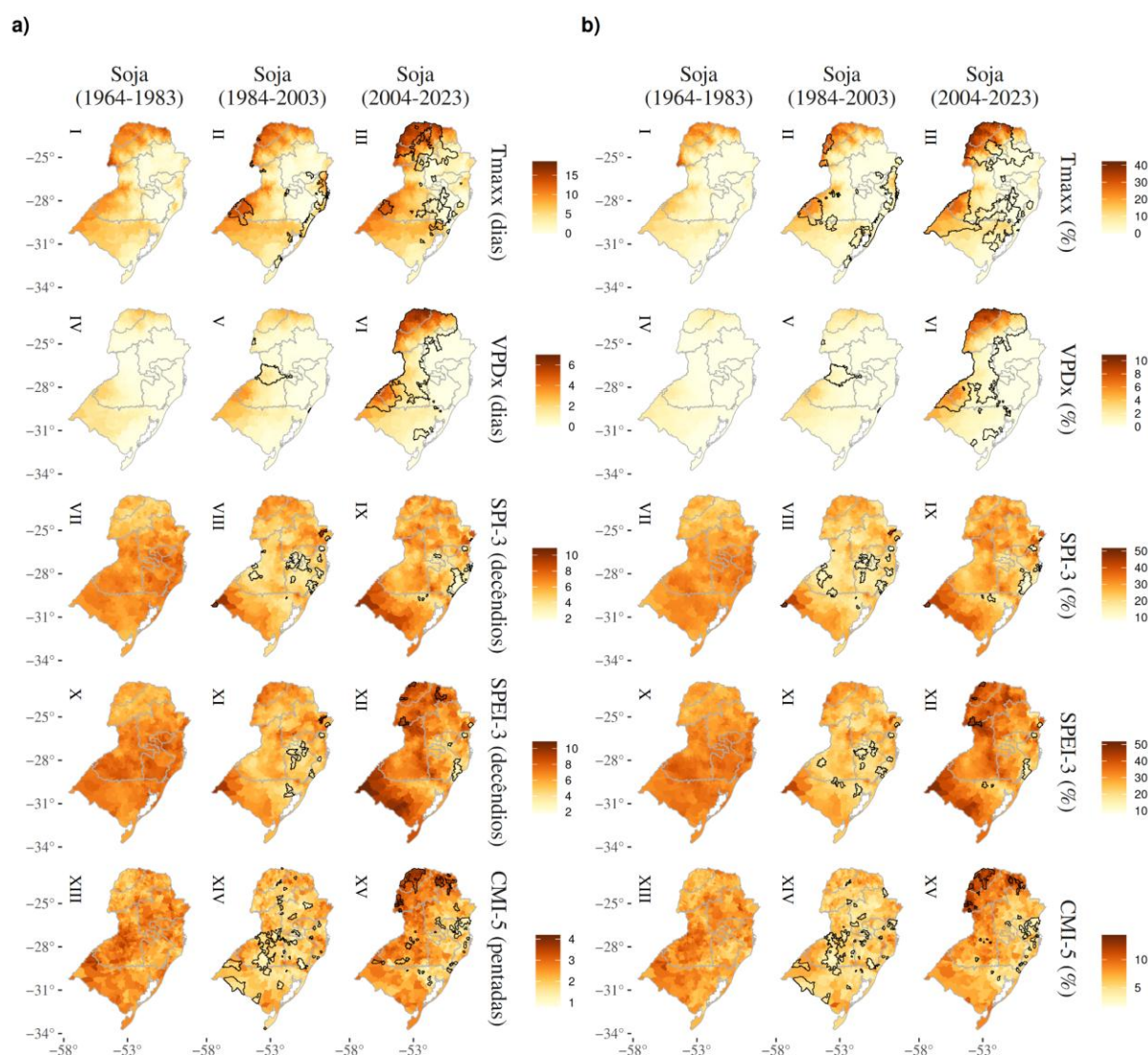
De forma análoga ao adotado para as demais métricas, verificou-se a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os períodos mais recentes (2004–2023 e 1984–2003) e o intervalo de 1964 a 1983. Essas diferenças foram avaliadas por meio dos testes ANOVA ou Kruskal-Wallis, dependendo das propriedades das amostras de cada unidade espacial, considerando um nível de significância de 5%.

Em uma perspectiva geral, a distribuição espacial da média da máxima duração e da frequência de ocorrência corrobora os padrões observados nas demais métricas. Os índices Tmaxx e VPDx apresentaram aumento ao longo do tempo, evidenciando a intensificação do estresse em todas as perspectivas analisadas. Além disso, o contraste espacial das condições hídricas foi reiterado, assim como a maior sensibilidade do SPEI-3 frente ao SPI-3 na indicação de regimes mais secos.

4.5.1 Análise espacial das médias da máxima duração e frequência de ocorrência no PAC da soja

Quanto ao Tmaxx (Figura 16a e 16b, subpainéis I a III), diferentemente do padrão observado nas demais métricas (Figura 13), as diferenças significativas concentraram-se em uma área restrita, abrangendo as sub-regiões 201 e 202 e partes da porção meridional da região. Nessas áreas, entre 2004 e 2023, as médias mais que dobraram em relação aos períodos anteriores, ultrapassando 15 dias para duração máxima e 30% para a frequência de ocorrência.

Figura 16— Distribuição espacial da duração máxima média (a) e frequência de ocorrência média (b) associadas aos índices climáticos: Tmaxx (I–III), VPDx (IV–VI), SPI-3 (VII–IX), SPEI-3 (X–XII) e CMI-5 (XIII–XV), no PAC da soja, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023. Municípios com amostras estatisticamente distintas em relação ao intervalo de 1964–1983 estão destacados.



Fonte: Autor

Em relação ao VPDx (Figura 16a e 16b, subpainéis IV a VI), observa-se uma semelhança espacial entre as áreas estatisticamente distintas e aquelas identificadas nas demais

métricas (Figura 13). Nessas áreas, destaca-se um forte contraste temporal, nas quais as médias do período recente (2004–2023) foram entre duas a três vezes maiores que os demais períodos, com valores próximos de 4 dias para a duração máxima e 6% para a frequência de ocorrência. Nas demais áreas, os valores se mantiveram semelhantes ou ligeiramente acentuados.

No caso dos índices de seca (Figura 16a e 16b, subpainéis VII a XII), observa-se um número reduzido de amostras estatisticamente distintas. Quando presentes, indicaram predominantemente decréscimos nas médias, especialmente no período intermediário (1984–2003). No entanto, entre 2004 e 2023, nota-se o aumento dos valores associados ao SPEI-3 em pequenas áreas esparsas. Nessas áreas, os valores médios atingiram cerca de 10 decêndios de duração máxima e 50% de frequência de ocorrência.

No que diz respeito às métricas do CMI-5 (Figura 16a e 16b, subpainéis XIII a XV), observa-se uma distribuição espacial dispersa de áreas estatisticamente distintas. No período recente (2004–2023), esse comportamento foi acompanhado por ampla variação entre os valores mínimos e máximos, ressaltando a heterogeneidade das condições hídricas nesse intervalo.

4.5.2 Análise espacial das médias da máxima duração e frequência de ocorrência no PEC da soja

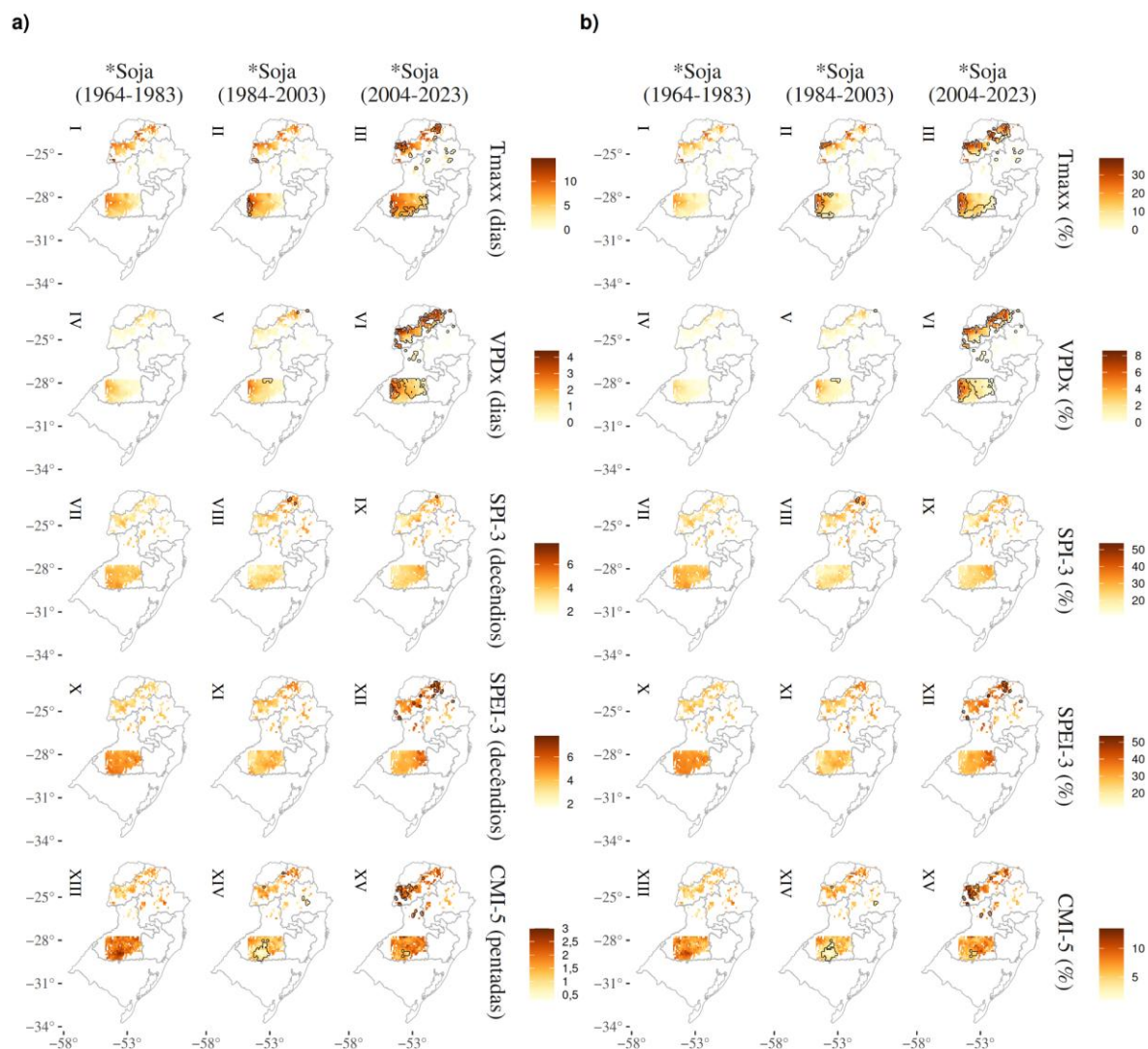
Em relação ao Tmaxx do PEC (Figura 17a e 17b, subpainéis I a III), observa-se um aumento gradual das médias da máxima duração e frequência ao longo dos recortes temporais, evidenciado pela ampliação das áreas estatisticamente distintas. Contudo, essa elevação não reduziu o contraste espacial observado na região.

Nesse contexto, entre 2004 e 2023, destacam-se duas áreas com valores de Tmaxx contrastantes: a primeira, composta pelas sub-regiões 201* e 202*, além da porção oeste da 102*, apresentou as maiores médias; a segunda, correspondente à sub-região 103*, registrou as menores. Para a duração máxima, os valores na primeira área ficaram próximos de 10 dias, enquanto na segunda permaneceram abaixo da metade desse valor. No caso da frequência, o contraste foi ainda mais acentuado, cerca de 30% contra aproximadamente 0%.

Assim como no Tmaxx, as métricas de VPDx demonstraram aumento, porém de forma ainda mais expressiva (Figura 17a e 17b, subpainéis IV a VI). Esse resultado é corroborado pela ampla área com diferenças estatisticamente significativas e pelas mudanças nas distribuições ilustradas nas Figuras C3 e C4. Comportamento semelhante foi identificado nas demais

métricas de VPD (Figura 14), indicando um agravamento do estresse sob todas as perspectivas analisadas.

Figura 17— Distribuição espacial da duração máxima média (a) e frequência de ocorrência média (b) associadas aos índices climáticos: Tmaxx (I–III), VPDx (IV–VI), SPI-3 (VII–IX), SPEI-3 (X–XII) e CMI-5 (XIII–XV), no PEC da soja, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023. Células com amostras estatisticamente distintas em relação ao intervalo de 1964–1983 estão destacadas.



Fonte: Autor

Nesse sentido, apenas a sub-região 103* apresentou valores de VPDx irrisórios para ambas as métricas, atribuídos à baixa incidência de eventos durante o intervalo analisado (Figura 11). Nas demais áreas, registraram-se valores próximos de 4 dias para a máxima duração e cerca de 8% para a frequência.

Entre os índices de seca (Figura 17a e 17b, subpainéis VII a XII), apenas as métricas do SPEI-3 apresentaram diferença estatística significativa, com os maiores valores registrados até

então concentrados na porção setentrional da região. Nessas áreas, as médias das durações máximas e das frequências foram superiores a 6 decêndios e 50%, respectivamente. Adicionalmente, conforme a Figura C4, houve casos de frequência igual a 100%, indicando cultivos de soja inteiramente sob efeito da seca.

Quanto ao CMI-5 (Figura 17a e 17b, subpainéis XIII a XV), semelhante ao padrão observado no PAC da soja, as médias das métricas apresentaram um comportamento espacial fragmentado, decorrente da proximidade de valores discrepantes. Esse padrão sugere variações geograficamente abruptas no balanço hídrico. Contudo, no período recente (2004–2023), observa-se uma concentração de valores com diferença significativa em patamares elevados nas sub-regiões 201 e 202. Nessas áreas, os valores da duração máxima e da frequência atingiram, respectivamente, cerca de 3 decêndios e 10%.

4.5.3 Análise espacial das médias da máxima duração e frequência de ocorrência no PAC do trigo

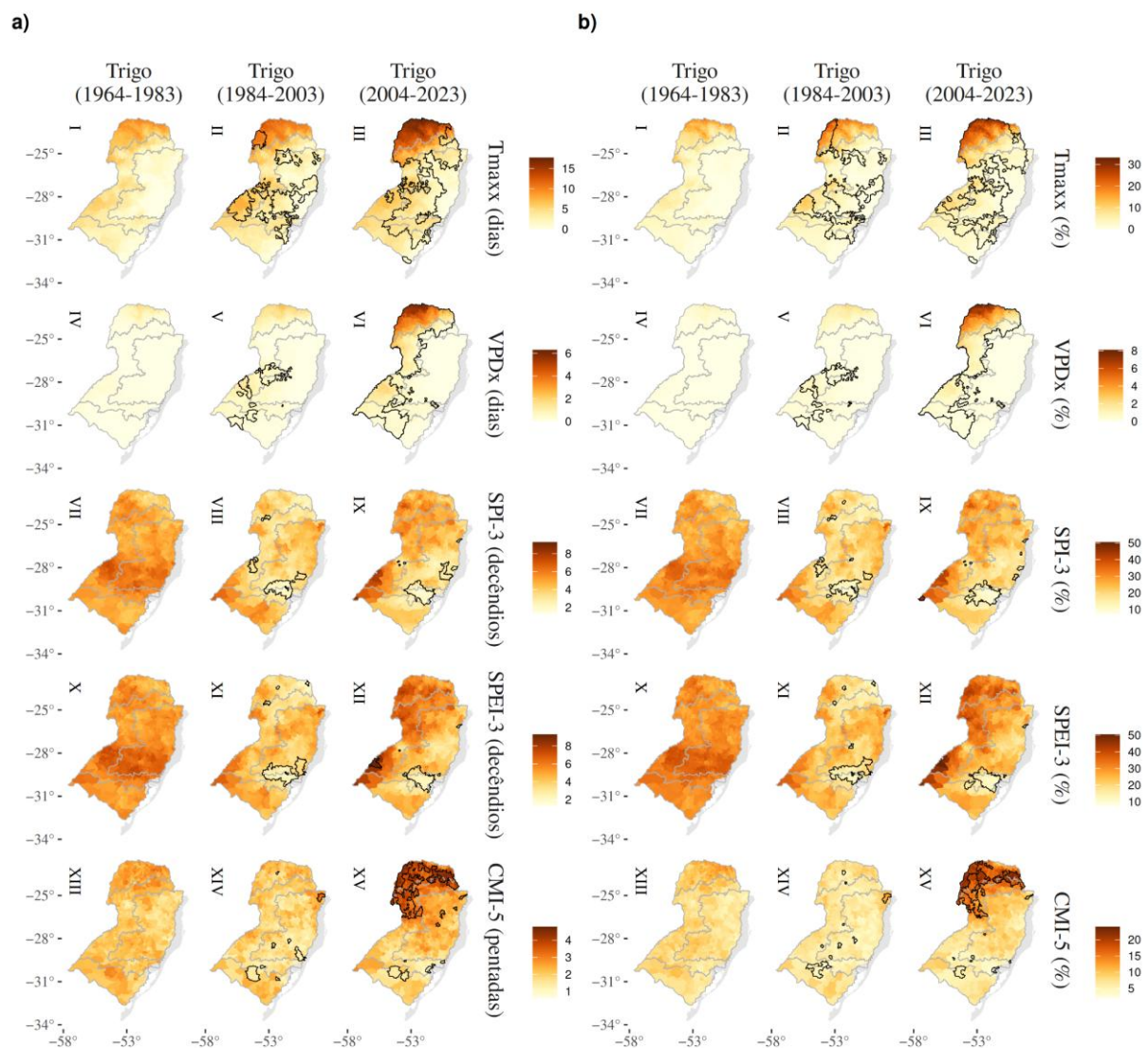
Em relação às métricas T_{max} (Figura 18a e 18b, subpainéis I a III), percebe-se nitidamente a ampliação da distinção estatística ao longo dos recortes temporais, com destaque para a ocorrência dessa intensificação nas mesmas áreas entre as diferentes métricas, cobrindo parte significativa da região. Na sub-região 3 entre 2004 e 2023, observam-se as maiores alterações, com médias da duração máxima e da frequência triplicadas, resultando em valores próximos de 15 dias e 30%, respectivamente. Na sub-região 2, os valores foram reduzidos, embora relevantes para o cultivo. Já a sub-região 1 permaneceu com médias bem inferiores a esse patamar.

Semelhante às demais métricas associadas ao VPD, as maiores médias de máxima duração e frequência de ocorrência (Figura 18a e 18b, subpainéis IV a VI) foram registradas no período recente (2004–2023), especialmente na sub-região 3. Nessa sub-região, os valores atingiram cerca de 6 dias para a máxima duração e 8% para a frequência. Já na sub-região 2, os valores apresentaram redução considerável. Por sua vez, na sub-região 1, as médias permaneceram próximas a zero, devido à baixa incidência de eventos (Figura 12).

No que diz respeito aos índices de seca (Figura 18a e 18b, subpainéis VII a XII), os valores obtidos pelo SPEI-3 foram superiores aos do SPI-3, especialmente no período recente (2004–2023). Ademais, nesse intervalo, observa-se um contraste espacial marcante na porção meridional da região, que se intensificou progressivamente ao longo do tempo. Os maiores valores foram registrados na porção oeste, na divisa entre as sub-regiões 1 e 2, com

aproximadamente 8 decêndios para a máxima duração e 20% para a frequência de ocorrência. Geograficamente próximo, nas áreas a leste da sub-região 2, foram observados valores mínimos de 2 decêndios e 5% para essas mesmas métricas.

Figura 18— Distribuição espacial da duração máxima média (a) e frequência de ocorrência média (b) associadas aos índices climáticos: Tmaxx (I–III), VPDx (IV–VI), SPI-3 (VII–IX), SPEI-3 (X–XII) e CMI-5 (XIII–XV), no PAC do trigo, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023. Municípios com amostras estatisticamente distintas em relação ao intervalo de 1964–1983 estão destacados.



Fonte: Autor

Apesar da aparente homogeneidade espacial e temporal das médias da máxima duração e da frequência do CMI-5 (Figura 18a e 18b, subpainéis XIII a XV), observa-se claramente uma exceção na sub-região 3 e em áreas adjacentes entre 2004 e 2023. Esse contraste também é evidenciado pelas variações nas distribuições ao longo dos períodos (Figuras C3 e C4). Nessa

porção, registraram-se as maiores médias, próximas de 4 pentadas para a máxima duração e 20% para a frequência de ocorrência, pontualmente acompanhadas de diferenciação estatística.

4.6 Tendências temporais das métricas dos índices climáticos extremos

As tendências foram estimadas sobre duas metodologias distintas, conforme explicitado na seção metodológica: Inclinação de Sen (IS), acompanhado da significância determinada pelo teste de Mann Kendall, e a Regressão Linear Simples (RL), com o teste T de Student. Os valores encontrados por década estão presentes nas Figuras 19 a 22.

Nesta seção, no entanto, apenas os resultados provenientes da IS foram analisados, devido à sua robustez frente às distribuições não normais e à presença de valores extremos. As tendências obtidas por meio da RL, por sua vez, foram utilizadas de forma complementar, com o objetivo de reforçar a interpretação dos resultados quando os pressupostos de normalidade e homocedasticidade dos resíduos eram atendidos, seus valores podem ser observados nas Figuras D1 a D3.

De modo geral, independentemente da cultura e de seu respectivo período de cultivo, observa-se a predominância de tendências positivas para o T_{maxx} e o VPD_x, enquanto os índices relacionados às condições hídricas apresentam um padrão espacial mais heterogêneo. Esses resultados estão em conformidade com as variações temporais observadas nas métricas, evidenciadas pelo aumento gradual das médias e pela ampliação das áreas com diferenciação estatística em relação ao intervalo de 1964 a 1983 (Figuras 13 a 18).

Em paralelo, no que se refere à significância estatística das tendências, observa-se que as métricas de máxima intensidade e acumulado, de forma geral, apresentaram maior abrangência espacial de tendências significativas em comparação com a máxima duração e frequência de ocorrência. Esse comportamento era esperado, considerando a maior ocorrência de valores nulos nas séries históricas das últimas duas métricas, uma vez que são diretamente dependentes da presença de eventos extremos, os quais apresentam frequência naturalmente variável ao longo do tempo (Figuras 10 a 12).

Na comparação das tendências estimadas pelos modelos, observa-se semelhanças na magnitude e direção das tendências, sobretudo nas áreas em que IS apresentou significância estatística, o que reforça a confiabilidade dos resultados encontrados. No entanto, o RL apresentou uma extensão reduzida dessas áreas, possivelmente devido aos pressupostos estatísticos exigidos ao modelo.

4.6.1 Análise das tendências temporais das métricas dos índices no PAC da soja

No que diz respeito ao T_{maxx} (Figura 19a), verifica-se a predominância de tendências positivas significativas, concentradas em três núcleos principais e espacialmente distintos: um na porção setentrional da região, outro nas áreas limítrofes das sub-regiões 101 e 102 e, por fim, na porção leste da 101, sendo estes mais amplos nas métricas de máxima intensidade e acumulado. A única exceção foi a sub-região 104, que apresentou um núcleo reduzido de tendência negativa significativa, presente em todas as métricas avaliadas.

Em termos numéricos, a máxima intensidade e a máxima duração de T_{maxx} apresentaram tendências relativamente homogêneas nos núcleos positivos, próximas de 0,5 °C e 1 dia por década, respectivamente. No caso do acumulado e da frequência, observou-se um padrão distinto, com tendências mais acentuadas nas sub-regiões 201 e 202, próximas de 20 °C e 4%, enquanto nas demais áreas os valores permaneceram inferiores.

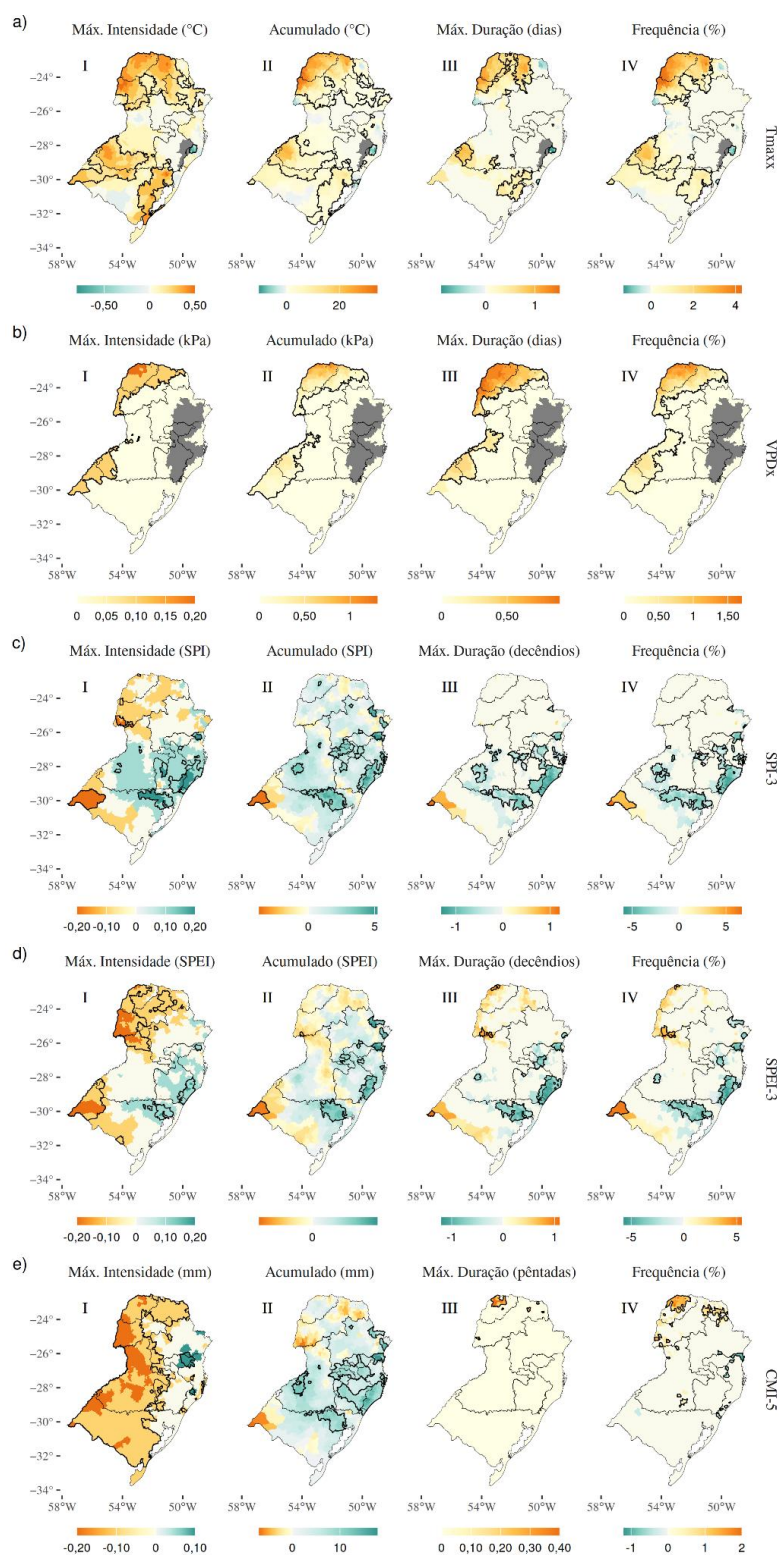
Em relação ao VPD_x (Figura 19b), observa-se a presença apenas de tendências positivas em todas as métricas em áreas correspondentes, evidenciando um agravamento do estresse sobre uma mesma porção da região. Os maiores valores concentram-se na sub-região 202 e, em casos específicos, em áreas adjacentes da 201, duas vezes superiores aos das demais áreas. Nas porções limítrofes a oeste das sub-regiões 101 e 102, as tendências foram menores, exceto para a máxima intensidade que permaneceu constante.

Sobre os índices de seca (Figura 19c e 19d), o padrão evidenciado nas médias das métricas, no qual o SPEI-3 sugere condições mais secas em comparação ao SPI-3, refletiu nas tendências estimadas. Nesse sentido, o SPI-3 indicou condições mais úmidas em áreas dispersas na faixa central da região, enquanto o SPEI-3 restringiu essa condição às porções litorâneas.

Independentemente do índice de seca analisado, destaca-se um contraste espacial acentuado, com tendências significativas em direções opostas para uma mesma métrica. Por exemplo, na faixa central da porção meridional, a porção central registrou sinais de aumento das condições de umidade, enquanto a porção ocidental apresentou redução, ambas com magnitudes elevadas.

Quanto às tendências associadas às condições de seca, a máxima intensidade aumentou (-0,2 por década) em áreas do extremo oeste da sub-região 101, bem como nas sub-regiões 201 e 202, sendo que, neste caso, mais abrangente no SPEI-3. Já a acentuação das demais métricas restringiram-se a pequenas porções dessas áreas, indicando locais específicos em que a situação hídrica apresentou tendência à escassez sob todas as métricas analisadas.

Figura 19— Distribuição espacial das tendências por décadas das métricas derivadas dos índices climáticos no PAC da soja, estimadas por meio da Inclinação de Sen: Tmaxx (a), VPDx (b), SPI-3 (c), SPEI-3 (d) e CMI-5 (e). As métricas consideradas foram: intensidade máxima (I), acumulado (II), duração máxima (III) e frequência (IV). Municípios com tendência estatisticamente significativa, com base no teste de Mann-Kendall, estão destacados.



Fonte: Autor

No caso do CMI-5 (Figura 19e), diferentemente dos demais índices, as tendências da máxima intensidade e do acumulado apresentaram um comportamento contrastante em relação às condições hídricas. A máxima intensidade apresentou predominância de tendências negativas significativas, especialmente na porção continental da região, com valores entre -0,1 e -0,2 mm por década. Já o acumulado, registrou tendências positivas válidas, superando 10 mm por década, sobretudo em áreas litorâneas. Esse mesmo padrão foi corroborado pela RL (Figura A9e, subpainéis I a II), o que fornece robustez aos resultados encontrados.

Além disso, a máxima duração e a frequência associados ao CMI-5 apresentaram tendências positivas e significativas em áreas da porção setentrional, embora bem mais restritas em comparação às demais métricas analisadas. Nessas áreas, o aumento foi menor, com valores próximos de 0,3 pentadas por década e 1% por década para essas métricas, respectivamente.

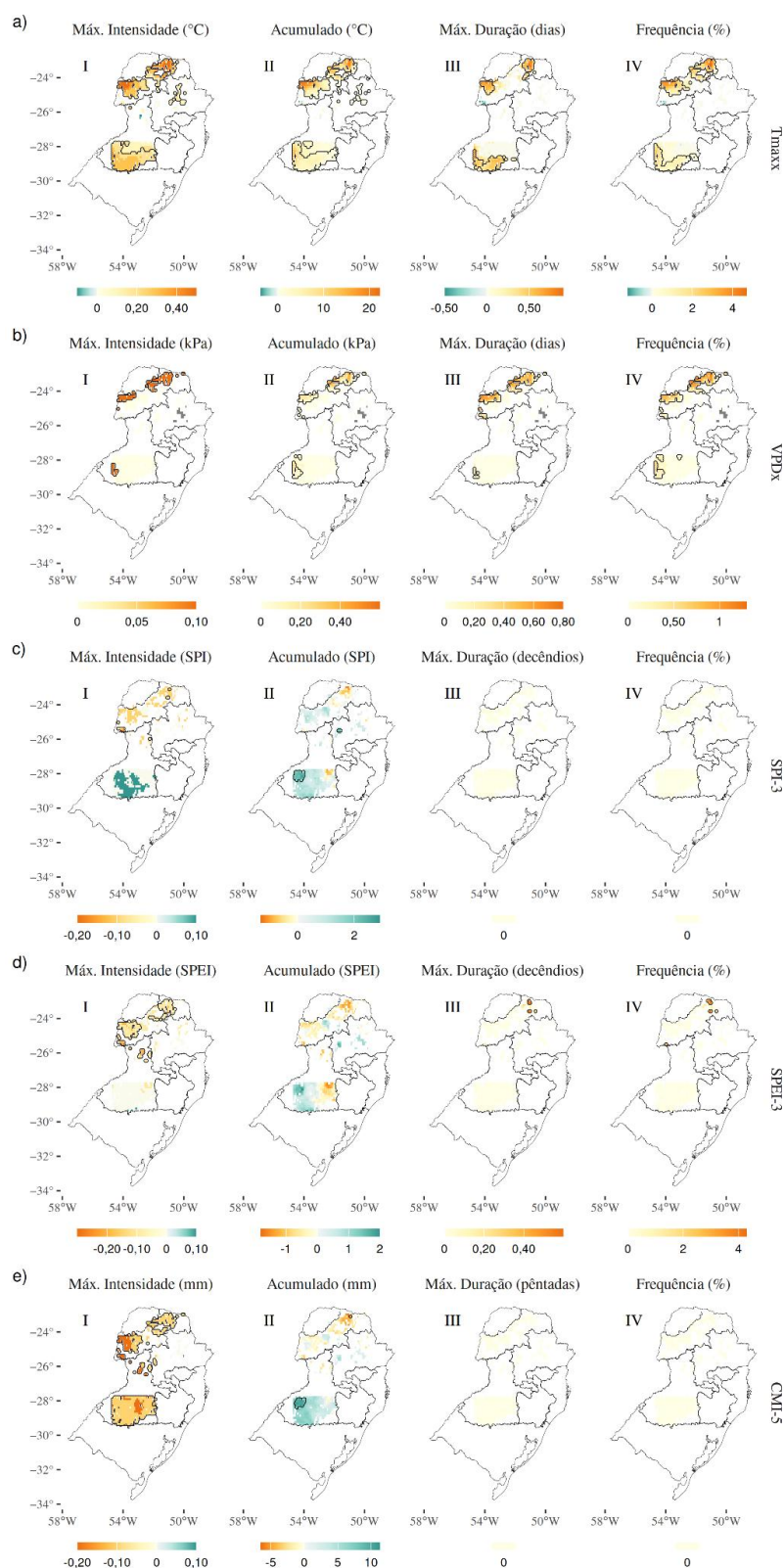
4.6.2 Análise das tendências temporais das métricas dos índices no PEC da soja

Nas tendências determinadas para o PEC da soja (Figura 20), a principal distinção observada em relação aos valores encontrados no PAC foi a presença de zeros nas métricas da máxima duração e frequência para o SPI-3 e o CMI-5. Essas métricas estão associadas a eventos extremos que, nesses índices, apresentaram baixa incidência ao longo do tempo (Figura 11), resultando na predominância de valores nulos nas séries temporais. Assim, esse resultado não indica ausência de tendência real, mas que a tendência estatisticamente não pôde ser detectada devido à baixa variabilidade dos dados.

Sobre o T_{maxx} (Figura 20a), observa-se a predominância de tendências positivas e estatisticamente significativas em todas as métricas, embora com incidência reduzida na máxima duração e frequência. As magnitudes das tendências se assemelham às registradas em áreas análogas do PAC: maiores nas sub-regiões 201* e 202*, intermediárias na porção setentrional da sub-região 102* e próximas a zero nas células restantes. Esse padrão reforça que o plantio da soja tem se concentrado em áreas sujeitas à intensificação do estresse térmico ao longo do tempo.

Em relação ao VPD_x (Figura 20b), observa-se uma concentração de tendências positivas e estatisticamente significativas em células limítrofes das sub-regiões 201* e 202* para todas as métricas, indicando intensificação do estresse por VPD. Comportamento semelhante, embora de menor magnitude, foi verificado em células da porção meridional da sub-região 102*, especialmente nas áreas a oeste. Em termos numéricos, os valores foram similares aos estimados em áreas análogas do PAC.

Figura 20— Distribuição espacial das tendências por décadas das métricas derivadas dos índices climáticos no PEC da soja, estimadas por meio da Inclinação de Sen: Tmaxx (a), VPDx (b), SPI-3 (c), SPEI-3 (d) e CMI-5 (e). As métricas consideradas foram: intensidade máxima (I), acumulado (II), duração máxima (III) e frequência (IV). Células com tendência estatisticamente significativa, com base no teste de Mann-Kendall, estão destacadas.



Fonte: Autor

No caso dos índices de seca (Figura 20c e 20d), as tendências estatisticamente significativas foram pontuais. A maior abrangência ocorreu na máxima intensidade do SPEI-3 na sub-região 201*, indicando agravamento das condições hídricas. Em contraste, o SPI-3 apresentou praticamente nenhum sinal significativo em qualquer das métricas, não corroborando esse comportamento.

Ademais, outro contraste entre os índices de seca foi evidenciado pela presença pontual de aumento significativo da máxima duração e da frequência de ocorrência no SPEI-3, no norte da sub-região 201*, com valores superiores a 0,4 decêndios por década e cerca de 4% por década, respectivamente. Esse comportamento foi reflexo da maior incidência de secas nessa área entre 2004 e 2023, conforme indicado na Figura 11.

De forma semelhante ao observado para a soja no PAC, as tendências da intensidade máxima e do acumulado do CMI-5 (Figura 20e) apresentaram sentidos opostos, aumento da máxima intensidade e redução do acumulado, especialmente na sub-região 102*. Quanto a essas métricas, a máxima intensidade apresentou valores próximos ou inferiores a -0,1 por década. Em contrapartida, o acumulado mostrou maior heterogeneidade nas tendências, com valores superiores a 10 mm por década na sub-região 102* e inferiores a -5 mm por década na 201*.

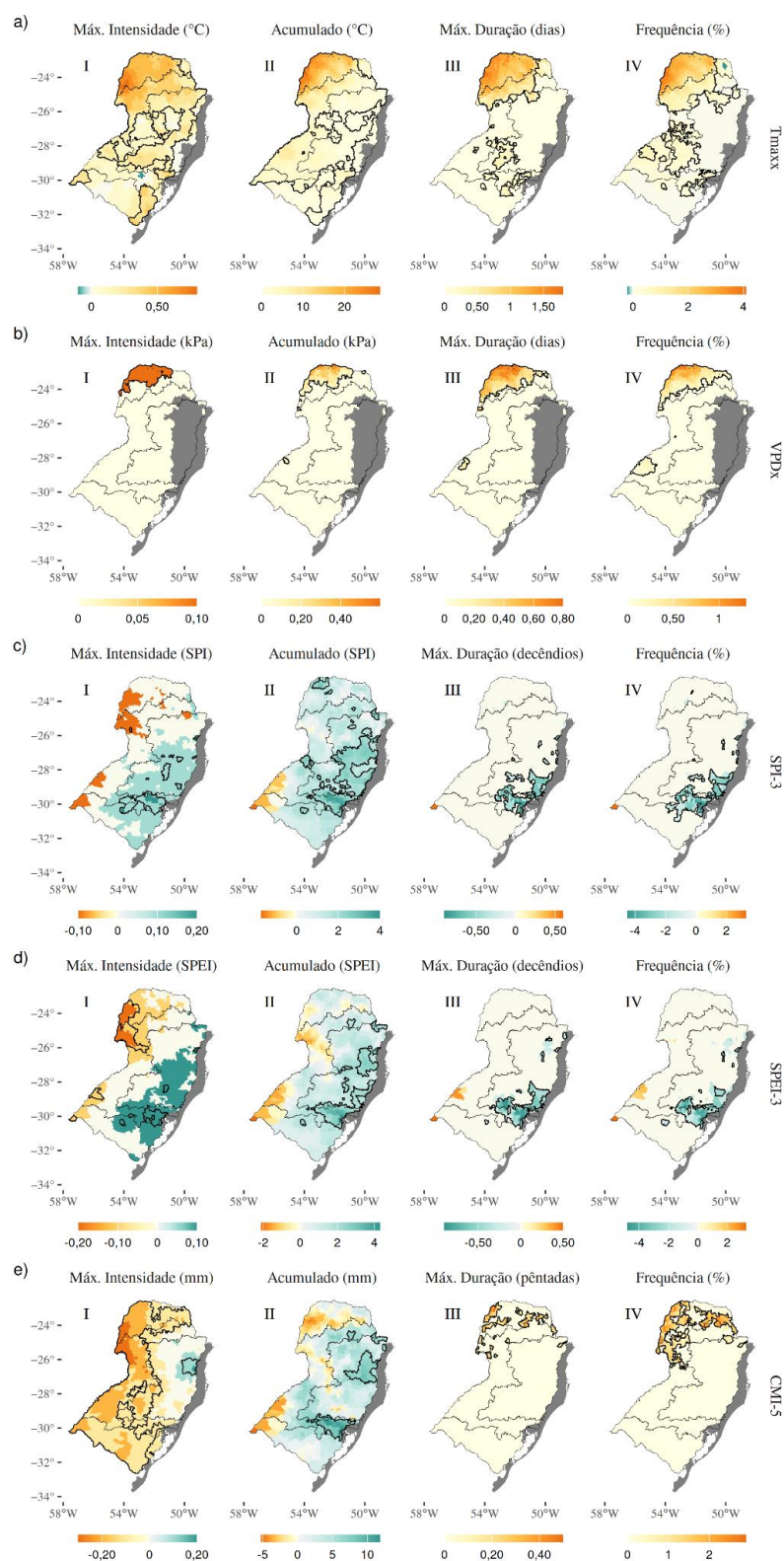
4.6.3 Análise das tendências temporais das métricas dos índices no PAC do trigo

As métricas do Tmaxx no trigo (Figura 21a) apresentaram uma ampliação das áreas com tendências positivas significativas em comparação à soja, com destaque para a intensidade máxima e o acumulado, que abrangeram praticamente toda a região. Nas demais métricas, embora a expansão também tenha ocorrido, o aumento foi mais restrito, concentrando-se na porção setentrional e em áreas esparsas do setor centro-sul.

Em relação às magnitudes das tendências significativas por década do estresse térmico, verifica-se que a sub-região 3 apresentou os maiores valores: superiores a 0,5 °C (intensidade máxima), a 20 °C (acumulado), a 1,5 dias (duração máxima) e a 4% (frequência). Nas demais sub-regiões, por sua vez, as tendências observadas foram menores, exceto para a intensidade máxima, cujos valores manteve-se no patamar similar.

Em relação ao VPDx (Figura 21b), observam-se tendências significativas em todas as métricas analisadas na sub-região 3 e, exceto para intensidade máxima, em uma pequena área no oeste da sub-região 2. Esse comportamento indica uma intensificação das condições de estresse associadas ao VPD no PAC do trigo nessas áreas sob todas as perspectivas analisadas.

Figura 21— Distribuição espacial das tendências por décadas das métricas derivadas dos índices climáticos no PAC do trigo, estimadas por meio da Inclinação de Sen: Tmaxx (a), VPDx (b), SPI-3 (c), SPEI-3 (d) e CMI-5 (e). As métricas consideradas foram: intensidade máxima (I), acumulado (II), duração máxima (III) e frequência (IV). Municípios com tendência estatisticamente significativa, com base no teste de Mann-Kendall, estão destacados.



Fonte: Autor

Em termos numéricos, as maiores tendências concentraram-se nas áreas da sub-região 3, com aumentos graduais em direção às porções setentrionais. Nessas áreas, as tendências por década foram: 0,1 kPa para a intensidade máxima, mais de 0,4 kPa para o acumulado, 0,8 dia para a duração máxima e valores acima de 1% para a frequência. Enquanto na porção oeste da sub-região 2, os valores foram inferiores a esses, indicando aumento moderado, porém estatisticamente significativos.

No caso dos índices de seca (Figura 21c e 21d), o SPEI-3 apresentou tendências de redução mais acentuadas na máxima intensidade, indicando agravamento das condições de seca em comparação ao SPI-3. Tal padrão resultou em valores significativos em áreas limítrofes ao oeste da região, com magnitudes variando entre -0,1 e -0,2 por década.

Ademais, semelhante ao padrão detectado na soja, observa-se um acentuado contraste nas condições hídricas em ambos os índices, nas quais áreas adjacentes apresentam tendências de sentidos opostos. A título de exemplo, áreas ao sul da sub-região 2 apresentaram um sinal claro de aumento da umidade na porção leste e uma diminuição na porção oeste.

Quanto ao CMI-5 (Figura 21e), observa-se um contraste marcante entre a máxima intensidade e o acumulado, que divergem quanto à sinalização das condições hídricas. Na máxima intensidade, predominam tendências negativas significativas, abrangendo grande parte da área de estudo. Por outro lado, o acumulado apresentou majoritariamente tendências com sinal oposto, mesmo em áreas correspondentes, embora com significância mais restrita. Esse comportamento indica um aumento no volume total do balanço hídrico climatológico, ainda que acompanhado por episódios de déficit hídrico cada vez mais intensos

No que se refere às métricas associadas aos eventos detectados pelo CMI-5, as tendências significativas, todas com sinal positivo, concentram-se exclusivamente na porção setentrional da região, especialmente na sub-região 3. Nas demais sub-regiões, não houve alterações significativas ao longo do tempo. Esse padrão foi também evidenciado nas médias dessas métricas (Figura 18), as quais registraram os maiores valores nessa porção da região

5 DISCUSSÃO

Os resultados integrados das distribuições de T_{maxx}, número de eventos extremos e métricas associadas sugerem a intensificação e aumento da frequência do estresse térmico, independentemente da cultura e da definição de período de cultivo. Esse comportamento evidencia um processo de intensificação de temperaturas extremas, sinalizando um agravamento do estresse sobre importantes áreas produtoras do Sul do Brasil. Esse achado está em consonância com investigações de tendências que consideram as médias das temperaturas extremas no cultivo de soja e trigo na mesma área (ZHU; TROY, 2018; NOIA-JUNIOR et al., 2021). Além de estudos que indicam uma possível redução, ou até mesmo inviabilização, do período apto de semeadura do trigo em porções da região, indicando a temperatura como o principal fator limitante (SANTI et al., 2017).

Tais evidências reforçam que as porções setentrionais da Região Sul se destacaram por apresentarem condições térmicas mais agravantes, devido, em parte, à localização em uma faixa transitória entre os domínios climáticos subtropical e o tropical, como documentado por Nascimento et al. (2020) em seu estudo sobre a “tropicalização” do padrão pluviométrico do PR. Em contrapartida, a porção centro-leste apresentou valores relativamente estáveis, associados ao clima predominante (Cfb), influenciado pela altitude, a qual atua como fator moderador na ocorrência de extremos de temperatura (ALVARES, 2013). Em consonância, Noia-Junior (2020) também observou esse contraste espacial térmico em datas distintas de semeadura da soja.

Deve-se salientar que a exposição às altas temperaturas, especialmente na fase reprodutiva comprometem o rendimento final das culturas ao reduzir a eficiência fotossintética, alterar o desenvolvimento do ciclo de vida e comprometer a qualidade dos grãos tanto para soja (HATFIELD et al., 2011; HATFIELD; PRUEGER, 2015) quanto para o trigo (KHANZADA et al., 2025; REZAEI et al., 2015). Uma alternativa analisada por Bigolin e Talamini (2025) de mitigação dos danos nesse período crítico do cultivo da soja envolve atrasar a semeadura, assim expor a planta aos possíveis extremos térmicos apenas na fase vegetativa, na qual o risco de danos por calor é significativamente menor. Já Nóia Júnior et al. (2025) sugerem um conjunto mais abrangente de estratégias de adaptação que envolve desde estratégias de manejo mais adequadas às modificações climáticas, bem como esforços em escala global visando à mitigação das mudanças climáticas.

Em relação ao VPD_x, os resultados sugerem intensificação do estresse em áreas coincidentes ao aumento do estresse térmico. Em parte, esse comportamento deve-se à relação

diretamente proporcional entre a temperatura do ar e o VPD, a qual se manifesta de forma mais acentuada quando o aporte de umidade atmosférica é insuficiente para suprir o incremento da demanda evaporativa (WALLACE; HOBBS, 2006). De acordo com estudos recentes, esse aumento de VPD tem sido atribuído majoritariamente à elevação das temperaturas (YUAN et al., 2019). Nesse contexto, Wu et al. (2025) identificaram um mecanismo de retroalimentação agravante, no qual a temperatura induz o fechamento estomático, reduzindo a transpiração e, consequentemente, elevando ainda mais o VPD.

Em relação ao estresse por VPD, os resultados evidenciam a ocorrência de extremos de VPD em áreas coincidentes com estresse térmico, com destaque para as porções setentrionais da Região Sul. Em parte, esse comportamento deve-se à relação diretamente proporcional entre a temperatura do ar e o VPD (WALLACE; HOBBS, 2006), a qual se manifesta de forma mais acentuada quando o aporte de umidade atmosférica é insuficiente para suprir o incremento da demanda evaporativa. Além disso, Wu et al. (2025) identificaram um mecanismo de retroalimentação que agrava ainda mais tais condições, no qual a temperatura induz o fechamento estomático, reduzindo a transpiração e, consequentemente, diminuindo o fluxo de umidade para atmosfera.

As análises também revelaram maiores valores de VPDx no período mais recente (2004-2023) em comparação aos recortes temporais anteriores. O aumento da demanda atmosférica resultante do aumento da temperatura global e o aporte insuficiente de vapor de água dos oceanos são os principais responsáveis por esse padrão. Tal afirmativa foi atribuída no estudo realizado por Yuan et al. (2019), o qual identificou uma intensificação acentuada a partir do final da década de 1990. Em consonância, Zhu e Troy (2019) analisaram o VPD médio durante o período de cultivo da soja e do trigo nas principais regiões produtoras de soja e trigo no Sul do Brasil e determinaram tendências positivas entre 1981 a 2006.

Em relação aos índices de seca, as análises apontam que o SPEI-3 indicou condições mais secas em comparação ao SPI-3, com valores mais acentuados em todas as métricas avaliadas e no número de ocorrências de seca, principalmente na porção setentrional da região no período mais recente (2004-2023). Uma possível explicação para esse comportamento é as alterações de ETo resultantes das intensificação dos extremos de temperatura e VPD em tais áreas. Em alinhamento com o estudo de Nwayor (2024) que atribui a relação inversa mais forte entre VPD e o SPEI como um dos fatores explicativos. De maneira semelhante, Tomasella et al. (2023) concluiu que as tendências negativas eram mais significativas nas séries do SPEI na região central do Brasil, devido ao aumento da evaporação associada às temperaturas mais elevadas.

As análises das condições hídricas indicaram padrões distintos de umidade de acordo com o recorte temporal: mais secos (1964–1983), mais úmidos (1984–2003) e maior heterogeneidade (2004–2023). Essa variação pode ser atribuída, ao menos parcialmente, às mudanças de fases da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) que modula o clima em ciclos típicos de duas a três décadas. Segundo Reboita et al. (2019), a ODP exerce influência indireta sobre o regime de precipitação ao intensificar ou atenuar os efeitos do ENOS, o que contribui para alternâncias de tendência — de aumento da precipitação entre novembro e abril ao longo do século XX para uma tendência de secagem no início do século XXI no Sudeste da América do Sul (ZHANG et al., 2016). A título de exemplo, durante o episódio de La Niña de triplo mergulho, ocorrido entre 2020 e 2023 (SHI et al., 2023), na qual observou-se os efeitos da fase negativa da ODP, os prejuízos na agricultura da Região Sul superaram 55 bilhões de reais (BRASIL, 2023b), causados essencialmente por secas e estiagens.

No caso das condições hídricas específicas para a soja, observou-se um contraste espacial expressivo na porção meridional da região (sub-regiões 101 e 102), especificamente nas porções localizadas no estado RS. Enquanto as áreas ao nordeste apresentaram condições mais úmidas, as áreas ao sudoeste evidenciaram um padrão contrastante, com maior suscetibilidade à seca. Esse contraste também foi observado em estudos sobre a diferença entre a produtividade potencial e aquela limitada pela disponibilidade hídrica (BATTISTI; SENTELHAS, 2019) e entre os valores máximos e mínimos registrados de produtividade em anos de secas (FERREIRA et al., 2024), o que evidencia a heterogeneidade climática e produtiva do estado. (explicação)

Como apresentado na seção metodológica, embora o sudoeste do RS não apresente um percentual expressivo de área plantada por município, a produção de soja nessa sub-região é expressiva e possui relevância econômica para o estado. Esse contexto reforça a importância de compreender os impactos das secas nesse setor, uma vez que perdas produtivas podem comprometer de forma significativa a estabilidade econômica estadual. Nóia Júnior et al. (2025) recomendam a implementação de estratégias adaptativas no setor agrícola, bem como esforços colaborativos em escala global voltados à mitigação das mudanças climáticas. Complementarmente, os resultados do PEC evidenciam um contraste espacial marcante nas condições hídricas, o que ressalta a exigência de medidas diversificadas voltadas à gestão dos recursos hídricos.

Assim como observado no sudoeste do RS, condições de seca semelhantes foram identificadas na porção setentrional da região (sub-regiões 201 e 202). No entanto, os estudos de Battisti e Sentelhas (2019) e Ferreira et al. (2024) não relataram impactos equiparáveis na

produtividade entre essas duas áreas. Essa diferença pode ser explicada pelo maior acumulado de precipitação nas áreas setentrionais durante o período de cultivo da soja (EMBRAPA, 2012), o que teria minimizado os efeitos da escassez hídrica apontada pelos índices de seca.

Em contraste com a cultura da soja, para o trigo não foram identificados estudos que abordem as condições hídricas atuais e futuras com igual grau de detalhamento metodológico. Contudo, análises recentes preveem perdas futuras na produção de grãos de trigo causados, em partes, por ocorrência de secas durante o início do plantio e na fase reprodutiva, bem como excesso de chuvas no período da colheita (NÓIA JÚNIOR et al., 2021). No presente estudo, observou-se um aumento geral das condições de umidade, exceto por áreas nas bordas oeste da região. Nesse cenário de aumento de umidade acompanhado da intensificação de extremos de temperatura, cenários climáticos futuros ampliam a área vulnerável à brusone do trigo, o que impactará negativamente a produtividade (PEQUENO et al., 2024).

O principal achado associado ao CMI-5 refere-se às tendências positivas na máxima intensidade na porção continental da região, indicando uma intensificação de episódios pontuais de estresse hídrico nessas áreas. Esse padrão espacial apresenta similaridade com a frequência de ocorrência de eventos extremos associados ao estresse térmico e ao VPD, variáveis que contribuem para a redução do balanço hídrico por meio do aumento da ET₀ (ALLEN; PEREIRA; SMITH, 1998). Em consonância, estudos recentes têm apontado para o aumento de eventos compostos envolvendo baixa umidade relativa, temperaturas elevadas e ventos intensos durante o período de cultivo da soja e do trigo na área de estudo (MA et al., 2025; FENG; SUN, 2024).

Apesar dos resultados relevantes, o estudo apresenta algumas limitações, especialmente aquelas atreladas à definição dos limiares. No caso do estresse térmico e por VPD, o emprego de um limiar fixo para todo o ciclo de cultivo desconsidera a sensibilidade das plantas em diferentes estágios fenológicos, ao mesmo tempo que ignora a ocorrência simultânea de outros extremos climáticos ou, até mesmo, formas de manejo que podem intensificar ou minimizar os efeitos sobre a planta. Além disso, como abordado na seção metodológica, a utilização do VPD médio diário, em vez do valor máximo, subestima os excedentes.

Limitação análoga foi observada nos índices de seca, embora agravada por se tratarem de índices padronizados, nos quais os valores representam desvios em relação à climatologia local. Assim, um mesmo limiar pode corresponder a diferentes disponibilidades hídricas. Ademais, os métodos aplicados para o diagnóstico das condições hídricas desconsideram a variabilidade do tipo de solo na região, fator determinante para o armazenamento de água no solo.

Um aspecto limitante das tendências identificadas está relacionado ao desempenho do *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD), o qual depende diretamente da densidade da rede de observações, que, por sua vez, sofreu modificações ao longo do tempo, o que pode induzir a interpretações equivocadas. Ademais, embora os valores estimados sejam estatisticamente significativos, a ausência de validação com dados observacionais de campo limita a capacidade de mensurar os possíveis efeitos sobre as culturas.

6 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo analisar tendências em séries históricas de extremos de calor e secas associadas aos cultivos de soja e trigo na Região Sul do Brasil, com base em índices climáticos extremos. A partir das análises realizadas, conclui-se que grande parte do cultivo de soja e trigo está sujeita a alterações climáticas relacionadas a extremos de calor e secas, embora em níveis distintos.

Em relação ao estresse térmico, observou-se uma intensificação em grande parte das áreas aptas ao plantio tanto da soja quanto do trigo, com valores mais acentuados na porção setentrional da região. Essa área também se destacou pelo aumento do estresse por VPD, o que se soma como mais um fator agravante. Dada a importante participação dessa porção na área plantada regional de ambas as culturas, os resultados obtidos servem como alerta para potenciais impactos na produção. Ademais, as análises evidenciaram que o cultivo efetivo da soja ocorre predominantemente em meses com maior ocorrência de eventos associados a temperaturas e VPD extremos.

No caso das condições hídricas, os resultados indicaram um contraste espacial acentuado nas tendências estimadas para ambas as culturas, com predomínio de tendências de intensificação das secas em áreas limítrofes da região, enquanto se observou redução em porções mais litorâneas. Esse contraste se mostrou evidente no PEC da soja, no qual as métricas dos índices de seca sinalizaram valores mais baixos no cultivo ao norte da região e menores na porção central. Além disso, o balanço hídrico sinalizou episódios de déficit hídrico mais intenso nas porções continentais da região.

Nesse contexto, a heterogeneidade dos padrões climáticos extremos evidenciada na Região Sul reforça a necessidade de estratégias adaptativas diversificadas e práticas de manejo ajustadas às condições climáticas predominantes em cada área de cultivo. Ademais, o detalhamento da ocorrência de extremos de calor e secas ao longo do período apto ao cultivo do trigo e da soja pode embasar ajustes na época de semeadura e, conseqüentemente, nas demais fases fenológicas. Dessa forma, as análises realizadas podem servir de orientação para a adoção dessas medidas, resultando na minimização dos efeitos decorrentes dessas adversidades climáticas e, assim, fortalecendo a estabilidade econômica do setor agrícola da região.

Por fim, destaca-se a necessidade de pesquisas futuras que visem ao detalhamento dos extremos climáticos, especialmente na área abordada na presente pesquisa, diante da complexa caracterização desses fenômenos. Também são recomendados estudos que considerem as

nuances da interação entre planta e atmosfera, especialmente em função da sensibilidade de diferentes culturas agrícolas.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evaporation**: guidelines for computing crop water requirement. Rome: FAO, 1998. *E-book*. ISBN: 92-5-104219-5. Disponível em: <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>. Acesso em: 07 jan 2023.
- ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Monitor de secas do Brasil**: Tabela de classificação de severidade da seca. Brasília: ANA, 2023. Disponível em: <https://monitordesecas.ana.gov.br/tabela-de-classificacao>. Acesso em: 08 jun. 2025.
- BACHMAIR, S.; KOHN, I.; STAHL, K. Exploring the link between drought indicators and impacts. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 15, n. 6, p. 1381-1397, 2015. doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1381-2015>.
- BATTISTI, R. SENTELHAS, P. C. Characterizing Brazilian soybean-growing regions by water deficit patterns. **Field Crops Research**, v. 240, p. 95-105, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.06.007>.
- BEGUERÍA, S.; VICENTE-SERRANO, S. M. SPEI: Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index. Version 1.8.1. **R Foundation**, 2023. doi: <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.SPEI>.
- BEVACQUA, A. G. et al. Spatial and temporal patterns of propagation from meteorological to hydrological drought in Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 603, 126902, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126902>.
- BIGOLIN, T.; TALAMINI, E. Impacts of Climate Change on Late Soybean Cultivation in Subtropical Southern Brazil. **Crops**, v. 5, n. 2, 20, 2025. doi: <https://doi.org/10.3390/crops5020020>.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático**. Brasília: Governo Federal, 2023a. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/zoneamento-agricola>. Acesso em: 15 dezembro 2024.
- BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. **Atlas Digital de Desastres no Brasil**. Brasília: MIDR, 2023b.
- BRASIL. Portaria SDA/MAPA nº 1.111, de 13 de maio de 2024. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2024a. Seção 1, p. 6.
- BRASIL. Portaria SDA/MAPA nº 1.124, de 25 de junho de 2024. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2024b. Seção 1, p. 4.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Portarias: Metodologia de estudos e lista de cultivares indicadas para cada região.** [Brasília]: Ministério da Agricultura e Pecuária, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/portarias>. Acesso em: 07 jun. 2025

CHIPANSHI, A. et al. Agroclimatic indices across the Canadian Prairies under a changing climate and their implications for agriculture. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 4, p. 2351-2367, 2021. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.7369>.

COPERNICUS. **The 2024 annual climate summary: Global Climate Highlights 2024.** Luxemburgo: União Europeia, 2025. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024>. Acesso em: 29 abr. 2025.

COUËDEL, A. et al. Assessing environment types for maize, soybean, and wheat in the United States as determined by spatio-temporal variation in drought and heat stress. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 307, 108513, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108513>.

DEVI, M. J.; TALIERCIO, E. W. SINCLAIR, T. R. Leaf expansion of soybean subjected to high and low atmospheric vapour pressure deficits. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 7, p. 1845-1850, 2015. doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/eru520>.

D'ORANGEVILLE, L. et al. Beneficial effects of climate warnings on boreal tree growth may be transitory. **Natural Communications**, v. 9, 3213, 2018. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05705-4>.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **ATLAS CLIMÁTICO DA REGIÃO SUL DO BRASIL:** Estados do Paraná, Santa Catarina e o Rio Grande do Sul. Brasília: Embrapa, 2012

ERGO, V. V. et al. Heat and Water stressed field-grown soybean: A multivariate study on the relationship between physiological-biochemical traits and yield. **Environmental and Experimental Botany**, v. 148, p. 1-11, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.12.023>.

FENG, Y.; SUN, F. Changes in the severity of compound hot-dry-windy events over global land areas. **Ecological Indicators**, v. 165, 112207, 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112207>.

FERREIRA, R.C. et al. Soybean Yield Losses Related to Drought Events in Brazil: Spatial-Temporal Trends over Five Decades and Management Strategies. **Agriculture**, v. 14, 2144, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture14122144>.

FLETCHER, A. L.; SINCLAIR, T. R.; ALLEN JR., L. H. Transpiration responses to vapour pressure deficit in well watered 'slow-wilting' and commercial soybean. **Environmental and Experimental Botany**, v. 61, p. 145-151, 2007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.004>.

FONSECA, H. P. et al. Potential of Solar-Induced Fluorescence (SIF-TROPOMI) for Developing Phenological Calendars and Predicting Yield in Large-Scale Agriculture. In preparation.

FORD, T. W. et al. Flash Drought Indicator Intercomparison in the United States. **American Meteorological Society**, v. 62, n. 12, p. 1713-1730, 2023. doi: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-23-0081.1>.

FU, K.; WANG, K. Quantifying Flash Droughts Over China From 1980 to 2017. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 127, n. 24, e2022JD037152, 2022. doi: <https://doi.org/10.1029/2022JD037152>.

GRIMM, A. M. et al. The combined effect of climate oscillations in producing extremes: the 2020 drought in southern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, e48, 2020. doi: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020200116>.

GROSSIORD, C. et al. Plant responses to rising vapor pressure deficit. **New Phytologist**, v. 226, n. 6, p. 1550-1566, 2020. doi: <https://doi.org/10.1111/nph.16485>.

HAMED, R. et al. Persistent La Niñas drive joint soybean harvest failures in North and South America. **Earth Syst. Dynam.**, v. 14, p. 255-272, 2023. doi: <https://doi.org/10.5194/esd-14-255-2023>.

HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. **Weather and Climate Extremes**, v. 10, p. 4-10, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>.

HATFIELD, J. L. et al. Climate Impacts on Agriculture: Implications for Crop Production. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 2, p. 351-370, 2011. doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0303>.

HAYES, M. et al. The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 92, n. 4, p. 485-488, 2011. doi: <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3103.1>.

HEYU, C.; YAOJIE, Y.; JIANG, Q. Temporal and spatial patterns of extreme heat on wheat in China under climate change scenarios. **Environmental and Experimental Botany**, v. 226, 105938, 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105938>.

HOGG, E. H. Temporal scaling of moisture and the forest-grassland boundary in western Canada. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 84, p. 115-122, 1997. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(96\)02380-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(96)02380-5).

HUNT, E. et al. Agricultural and food security impacts from the 2010 Russia flash drought. **Weather and Climate Extremes**, v. 34, 100383, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100383>.

HYNDMAN, R. J.; FAN, Y. Sample Quantiles in Statistical Packages. **American Statistical Association**, v. 50, n. 4, p. 361-365, 1996. doi: <https://doi.org/10.2307/2684934>.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **SIDRA - Sistema IBGE de recuperação automática. Tabela 1612 - Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias.** Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: 05 mar. 2025.

IPCC. **Climate change 2021: The physical science basis.** Cambridge University Press, Cambridge, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>. Acesso em: 29 abr. 2025.

JIANG, T. et al. Understanding the impacts of extreme temperature and humidity compounds on winter wheat traits in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 362, 110354, 2025. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110354>.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods.** London: Griffin, 1955.

KHANZADA, A. et al. Heat Stress Response Mechanisms and Resilience Strategies in Wheat. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 211, n. 1, e70023, 2025. doi: <https://doi.org/10.1111/jac.70023>.

KÖHLER, P. et al. Global Retrievals of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence With TROPOMI: First Results and Intersensor Comparison to OCO-2. **Geophys. Res. Lett.**, v. 45, n. 10, p. 10456-10463, 2018. doi: <https://doi.org/10.1029/2018GL079031>.

LEE, H.; LEE, Y.; LEE, C. Tree diversity's impact on coarse woody debris biomass and spatial stability under different moisture stress levels in temperate forests, South Korea. **Ecological Indicators**, v. 172, 113309, 2025. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113309>.

LEVESQUE, K.; HAMANN, A. Identifying Western North American Tree Populations Vulnerable to Drought under Observed and Projected Climate Change. **Climate**, v. 10, n. 8, 114, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/cli10080114>.

LI, J.; LEI, H. Impacts of climate change on winter wheat and summer maize dual-cropping system in the North China Plain. **Environ. Res. Commun.**, v. 4, 075014, 2022, doi: [10.1088/2515-7620/ac814c](https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac814c).

LI, P. et al. A New Evapotranspiration-Based Drought Index for Flash Drought Identification and Monitoring. **Remote Sensing**, v. 16, n. 5, 780, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/rs16050780>.

LI, X.; XIAO, J. TROPOMI observations allow for robust exploration of the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary production. **Remote Sensing of Environment**, v. 268, 112748, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112748>.

LIANG, M.; YUAN, X. Critical Role of Soil Moisture Memory in Predicting the 2012 Central United States Flash Drought. **Front. Earth Sci.**, v. 9, 615969, 2021. doi: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.615969>.

LISONBEE, J.; WOLOSZYN, M.; SKUMANICH, M. Making sense of flash drought: Definitions, indicators, and where we go from here. **J. Appl. Serv. Climatol.** v. 2021, n. 1, p. 1-19, 2021. doi: <https://doi.org/10.46275/JOASC.2021.02.001>

LIU, B. et al. Separation the impacts of heat stress events from rising mean temperatures on winter wheat yields of China. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 12, 124035, 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3870>.

LORENZ, D. J. et al. Predicting U.S. Drought Monitor States Using Precipitation, Soil Moisture, and Evapotranspiration Anomalies. Part I: Development of a Nondiscrete USDM Index. **Journal of Hydrometeorology**, v. 18, n. 7, p. 1943-1962, 2017. doi: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0066.1>.

LOVINO, M. A. et al. The prevalent life cycle of agricultural flash droughts. **Climate and Atmospheric Science**, v. 7, 73, 2024. doi: <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00618-0>.

LOVINO, M. A. et al. Agricultural flash droughts and their impact on crop yields in southeastern South America. **Environmental Research**, v. 20, 054058, 2025. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adcd88>.

LU, J. et al. Mapping the sensitivity of agriculture to drought and estimating the effect of irrigation in the United States, 1950-2016. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 292-293, 108124, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108124>.

LUCAS, E. W. M. et al. Trends in climate extreme indices in the Xingu river basin - Brazilian Amazon. **Weather and Climate Extremes**, v. 31, 100306, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100306>.

MA, Q. et al. Likelihoods of compound dry-hot-windy events are projected to increase under global warming. **Atmospheric Research**, v. 322, 108119, 2025. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108119>.

MAKUYA, V. et al. Assessing the Impact of Agricultural Drought on Yield over Maize Growing Areas, Free State Province, South Africa, Using the SPI and SPEI. **Sustainability**, v. 16, 4703, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/su16114703>.

MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245-259, 1945. doi: <https://doi.org/10.2307/1907187>.

MARTINS, E.S.P.R. et al. **Monitor de secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas**. 1. ed. Brasília: Banco Mundial, 2015. Disponível em: <http://documents1.worldbank.org/curated/en/607701468197373119/pdf/106302-PORTUGUESE-PUB-P146301-ADD-SERIES-AND-ISBN-PUBLIC-Aguas-Brasil-no-10.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2025.

MCKEE, T.B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. **Eighth Conference on Applied Climatology**, p. 179-184, 1993.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere**. 4 ed. Amsterdam: Elsevier, 2014. p. 401.

NASCIMENTO JÚNIOR, L.; SILVESTRE, M. R.; NETO, J. L. S. Trends and rainfall tropicalization in Paraná State, south of Brazil. **Atmosfera**, v. 33, n. 1, 2020. doi: <https://doi.org/10.20937/atm.52441>.

NHAMO, L. et al. Cereal Production Trends under Climate Change: Impacts and Adaptation Strategies in Southern Africa. **Agriculture**, v.9, n. 2, 30, 2019. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture9020030>.

NÓIA JÚNIOR, R. S. et al. Effects of the El Niño Southern Oscillation phenomenon and sowing dates on soybean yield and on the occurrence of extreme weather events in southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 290. 108038, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108038>.

NÓIA JÚNIOR, R. S et al. Extreme lows of wheat production in Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 10, 104025, 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac26f3>.

NÓIA JUNIOR, R. S.; CHRISTO, B. F.; PEZZOPANE, J. E. M. Extreme weather events in southern Brazil warn of agricultural collapse. **Next Research**, v. 2, 100217, 2025. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100217>.

NWAYOR, I.; ROBESON, S. M. Exploring the relationship between SPI and SPEI in warming world. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, p. 2559-2569, 2024. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04764-y>.

OGUNKANMI, L.; MACCARTHY, D. S.; ADIKU, S.G.K. Impact of Extreme Temperature and Soil Water Stress on the Growth and Yield of Soybean. **Agriculture**, v. 12, n.1, 43, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture12010043>.

PAN, Y. et al. Accuracy of agricultural drought indices and analysis of agricultural drought characteristics in China between 2000 and 2019. **Agricultural Water Management**, v. 288, 108305, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108305>.

PARKER, T. et al. Flash drought in Australia and its relationship to evaporative demand. **Environmental Research Letters**, v. 16, 064033, 2021. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfe2c>.

PEQUENO, D. N. et al. Production vulnerability to wheat blast disease under climate change. **Nature Climate Change**, v. 14, p. 178-183, 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01902-2>.

POHLERT, T. trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. Version 1.1.6. **R Foundation**, 2023. doi: <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.trend>.

PORTALANZA, D. et al. Can extreme climatic and bioclimatic indices reproduce soy and maize yields in Latin America? Part 1: an observational and modeling perspective. **Environmental Earth Sciences**, v. 83, 175, 2024. doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11461-0>.

QIAN, B. et al. Climate conditions in the near-term, mid-term and distant future for growing soybeans in Canada. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 103, n. 2, p. 161-174, 2023. doi: <https://doi.org/10.1139/cjps-2022-0233>.

REBOITA, M.S. et al. Impacts of teleconnection patterns on South America Climate. **The New York Academy of Sciences**, v. 1504, n. 1, p. 116-153, 2021. doi: <https://doi.org/10.1111/nyas.14592>.

REIS, L. C. dos. et al. Analysis of Climate Extreme Indices in the MATOPIBA Region, Brazil. **Pure Appl. Geophys**, v. 177, p. 4457-4478, 2020. doi: <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02474-4>.

REZAEI, E. E. et al. Heat stress in cereals: Mechanisms and modelling. **European Journal of Agronomy**, v. 64, p. 98-113, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.10.003>.

ROGGER, J. et al. Can Swiss wheat varieties escape future heat stress?. **European Journal of Agronomy**, v. 131, 126394, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126394>.

RUSSO, E.; DOMEISEN, D.I.V. Increasing intensity of extreme heatwaves: The crucial role of metrics. **Geophysical Research Letters**, v. 50, n. 40, 2023. doi: <https://doi.org/10.1029/2023GL103540>.

SALVADOR, M. A.; BRITO, J. I. B. Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the MATOPIBA region of Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 133, p. 253-261, 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2179-5>.

SANTANA, C. T. C. et al. A Method for Estimating Soybean Sowing, Beginning Seed, and Harvesting Dates in Brazil Using NDVI-MODIS Data. **Remote Sensing**, v. 16, 2520, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/rs16142520>.

SANTI, A. et al. Impacto de cenários futuros de clima no zoneamento agroclimático do trigo na região Sul do Brasil. **Agrometeoros**, v. 25, n. 2, p. 303-311, 2017. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1087350>. Acesso em: 21 de jul. 2025.

SCHLENKER, W.; ROBERTS, M.J. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 106, n. 43, E120, 2009. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.0910618106>.

SCHOPPACH, R.; SADOK, W. Differential sensitivities of transpiration to evaporative demand and soil water deficit among wheat elite cultivars indicate different strategies. **Environmental and Experimental Botany**, v. 84, p. 1-10, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.04.016>.

SCHOPPACH, R. et al. Transpiration Sensitivity to Evaporative Demand Across 120 Years of Breeding of Australian Wheat Cultivars. **J Agro Crop Sci**, v. 2023, p. 219-226, 2017. doi: <https://doi.org/10.1111/jac.12193>.

- SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 342, p. 1379-1389, 1968. doi: <https://doi.org/10.2307/2285891>.
- SENEVIRATNE, S.I. et al. (coord.). Weather and climate extreme events in a changing climate. In: IPCC. **Climate change 2021: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press. p. 1513-1766, 2021. doi: 10.1017/9781009157896.013.
- SEVERSIKE, T. M. et al. Temperature interactions with transpiration response to vapor pressure deficit among cultivated and wild soybean genotypes. **Physologia Plantarum**, v. 148, n. 1, p. 62-73, 2012. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01693.x>.
- SHI, L. et al. Extratropical impacts on the 2020-2023 Triple-Dip La Niña event. **Atmospheric Research**, v. 294, 106937, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106937>.
- SHIKWAMBANA, S.; MALAZA, N.; SHALE, K. Impacts of Rainfall and Temperature Changes on Smallholder Agriculture in the Limpopo Province, South Africa. **Water**, v. 13, n. 20, 2872, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/w13202872>.
- SINCLAIR, T.R.; ZWIENIECKI, M. A.; HOLBROOK, N. M. Low leaf hydraulic conductance associated with drought tolerance in soybean. **Physiologia Plantarum**, v. 132, p. 446-451, 2008. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.01028.x>.
- SINCLAIR, T.R. et al. Limited-transpiration response to high vapor pressure deficit in crop species. **Plant Science**, v. 260, p. 109-118, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.04.007>.
- SORDO-WARD, A. et al. Analysis of Current and Future SPEI Drought in the La Plata Basin Based on Results from the Regional Eta Climate Model. **Water**, v. 9, 857, 2017. doi: <https://doi.org/10.3390/w9110857>.
- SSEMBAJWE, R. et al. Dynamics and associations of selected agrometeorological variables in Robusta growing regions of Uganda. **Agricultural Water Management**, v. 307, 109257, 2025. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109257>.
- STAGGE, J. H. et al. Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI). **International Journal of Climatology**, v. 35, p. 4027-4040, 2015. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.4267>.
- SUN, W. et al. Projected long-term climate trends reveal the critical role of vapor pressure deficit for soybean yields in the US Midwest. **Science of the Total Environment**, v. 878, 162960, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162960>.
- TOMASELLA, J. et al. Assessment of trends, variability and impacts of droughts across Brazil over the period 1980-2019. **Natural Hazards**, v. 116, p. 2173-2190, 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05759-0>.
- USDA. **World Agricultural Production**. Circular Series WAP 8-23; Washington, DC: USDA, 2025.

- VICENTE-SERRANO, S.M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J.I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **American Meteorological Society**, p. 1696-1718, 2010. doi: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.
- VOGEL, E. et al. The effects of climate extremes on global agricultural yields. **Environmental Research**, v. 14, n. 5, 054010, 2019. doi: [10.1088/1748-9326/ab154b](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab154b)
- WALLACE, J.M.; HOBBS, P.V. **Atmospheric Science**: an introductory survey. 2 ed. Amsterdam: Elsevier, 2006. 483 p. (Série International Geophysics Series, 92).
- WILLMOTT, C. J. FEDDEMA, J.J. **The Professional Geographer**, v. 44, n. 1, p. 84-88, 1992. doi: <https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1992.00084.x>.
- WU, R. et al. Complexity and interactions of climatic variables affecting winter wheat photosynthesis in the North China Plain. **European Journal of Agronomy**, v. 166, 127568, 2025. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127568>.
- XAVIER, A.C., et al. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2015. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.4518>.
- XAVIER, A.C. et al. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961-2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390-8404, 2022. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.7731>.
- YANG, Q.; JIANG, C.; DING, T. Impacts of Extreme-High-Temperature Events on Vegetation in North China. **Remote Sensing**, v. 15, n. 18, 4542, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/rs15184542>.
- YUAN, W. et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. **Sci. Adv.**, v. 5, n. 8, eaax1396, 2019. doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1396>.
- YUAN, X. et al. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China. **Nature Communications**, v. 10, 4661, 2019. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12692-7>.
- YUAN, X. et al. A global transition to flash droughts under climate change. **Science**, v. 380, n. 6641, p. 187-191, 2023. doi: <https://doi.org/10.1126/science.abn6301>.
- ZHANG, et al. Detection, Attribution, and Projection of Regional Rainfall Changes on (Multi-) Decadal Times Scales: A Focus on Southeastern South America. **American Meteorological Society**, v. 29, n. 23, p. 8515-8534, 2016. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0287.1>.
- ZHANG, N.; LI, Z.; QUIRING, S. M. Developing Impacts-Based Drought Thresholds for Ohio. **American Meteorological Society**, v. 24, n. 7, p. 1225-1240, 2023. doi: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-22-0054.1>.

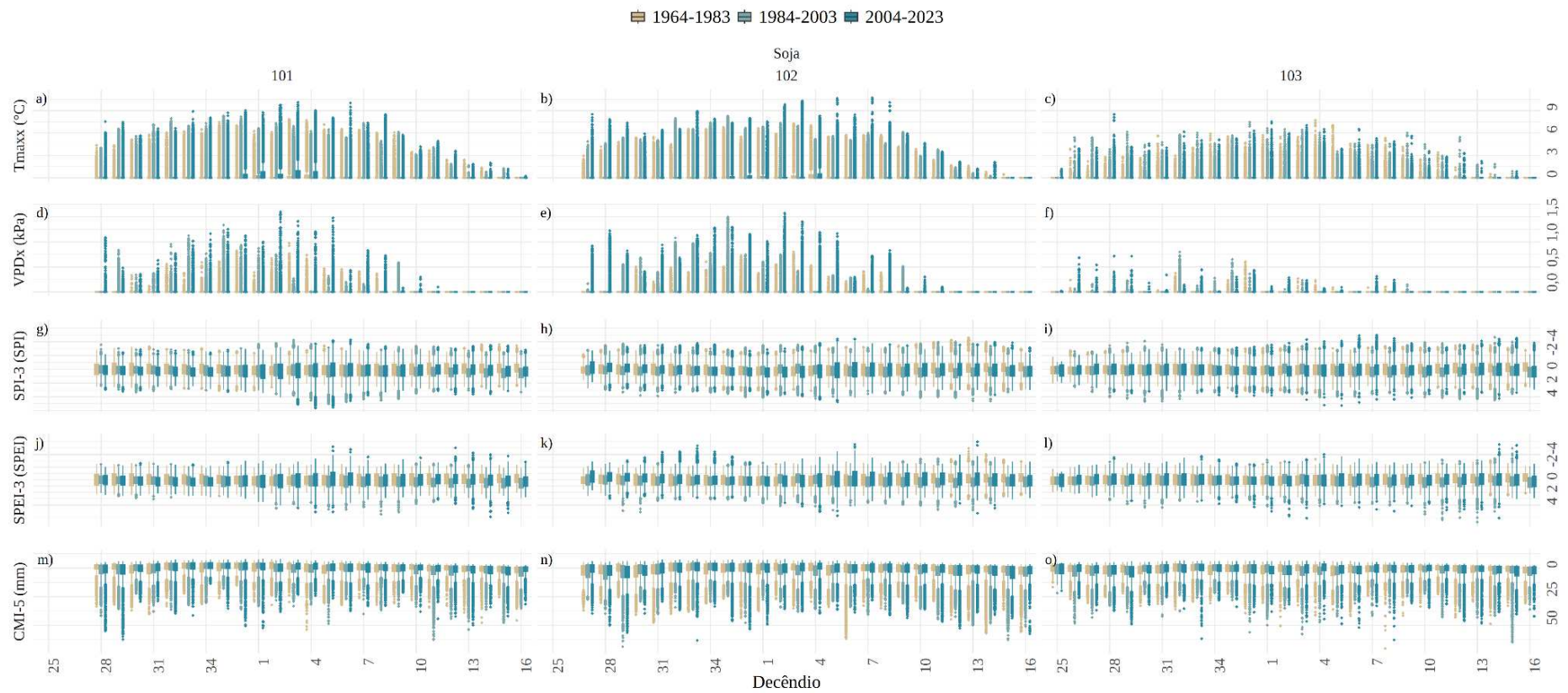
ZHANG, T. et al. Climate change may outpace current wheat breeding yield improvements in North America. **Nature Communications**, v. 13, 5591, 2022. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33265-1>.

ZHANG, X. et al. Avoiding Inhomogeneity in Percentile-Based Indices of Temperature Extremes. **Journal of Climate**, v. 18, n. 11, p. 1641-1651, 2005. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI3366.1>

ZHU, X.; TROY, T. J. Agriculturally Relevant Climate Extremes and Their Trends in the World's Major Growing Regions. **Earth's Future**, v. 6, n. 4, p. 656-672, 2018. doi: <https://doi.org/10.1002/2017EF000687>.

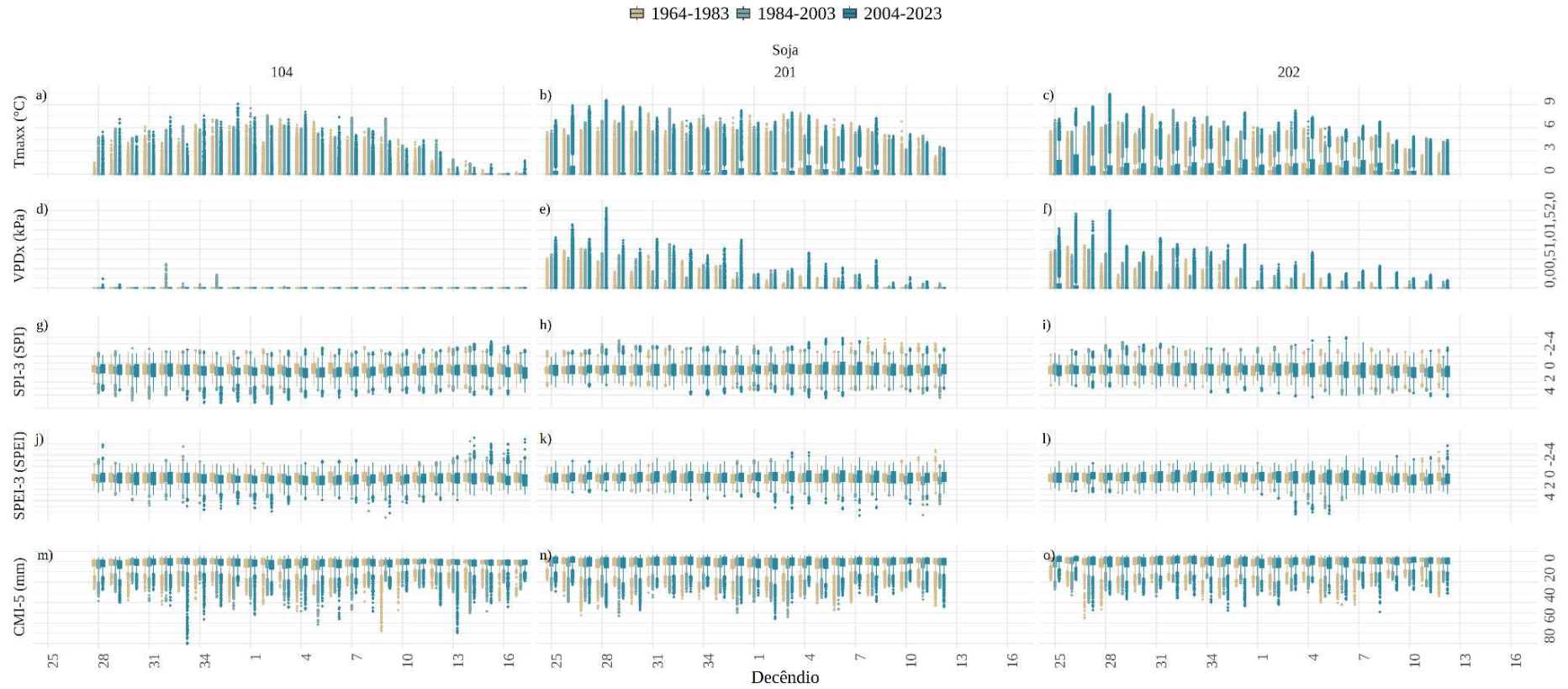
APÊNDICE A – Distribuições decendiais dos índices climáticos

Figura A1— Distribuições decendiais dos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), nas sub-regiões sojícolas: 101, 102 e 103, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.



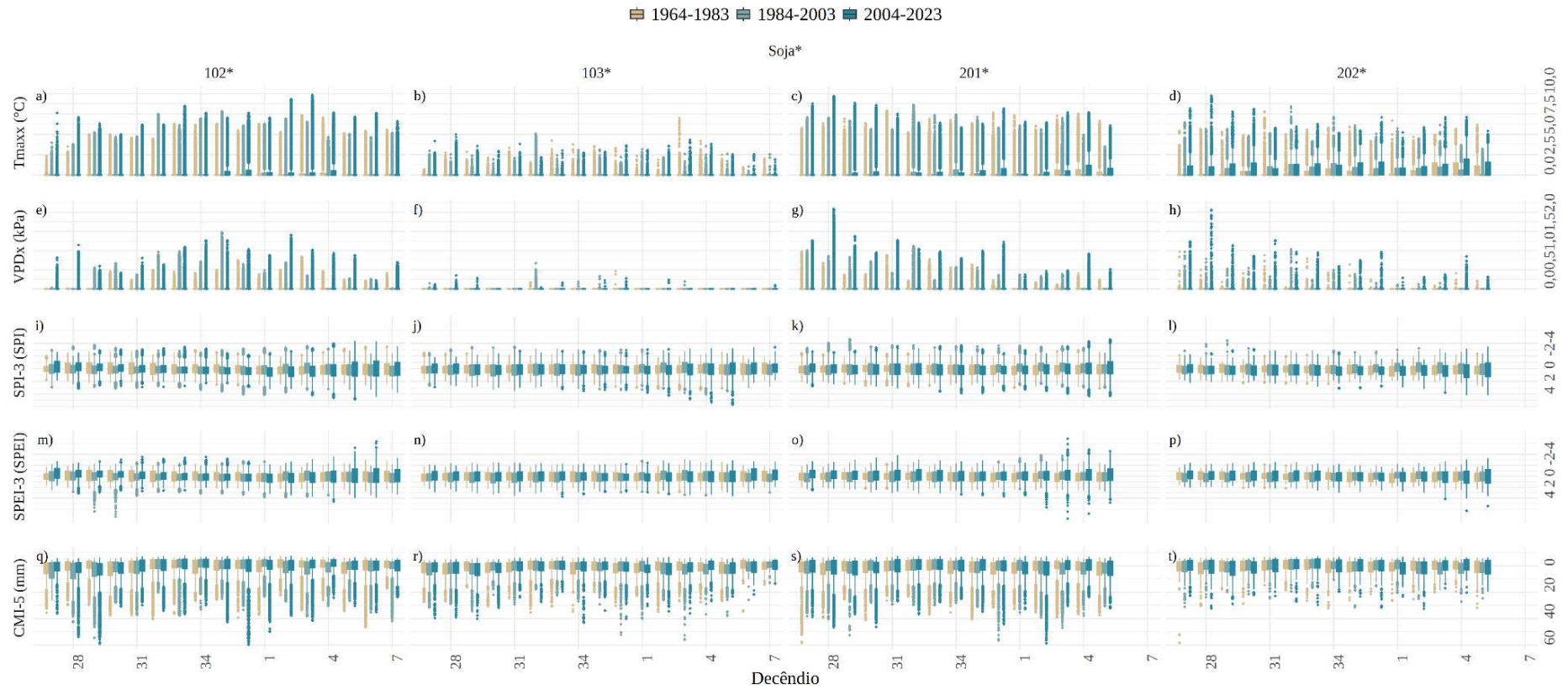
Fonte: Autor

Figura A2— Distribuições decendiais dos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), nas sub-regiões sojícolas: 104, 201 e 202, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.



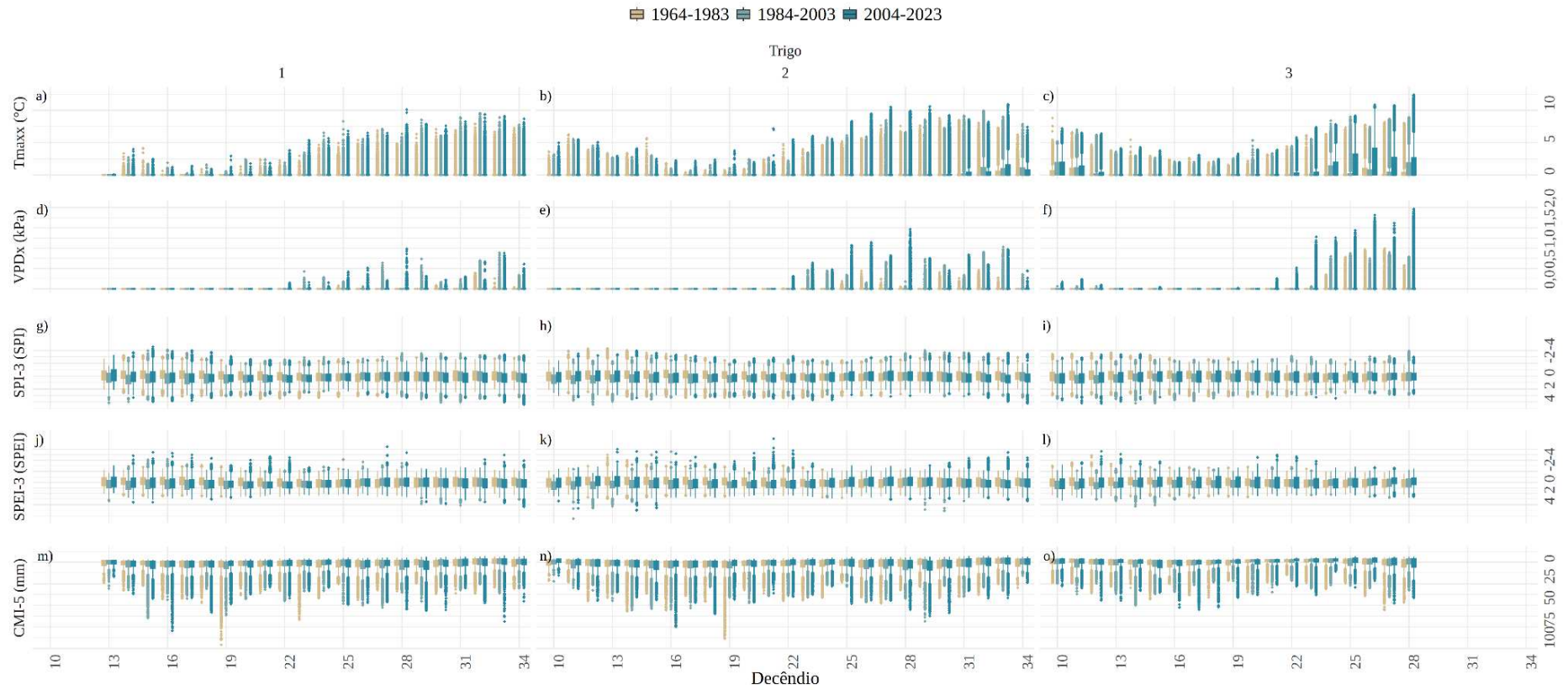
Fonte: Autor

Figura A3— Distribuições decendiais dos índices climáticos: Tmaxx (a–d), VPDx (e–h), SPI-3 (i–l), SPEI-3 (m–p) e CMI-5 (q–t), nas sub-regiões sojícolas: 102*, 103*, 201* e 202*, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.



Fonte: Autor

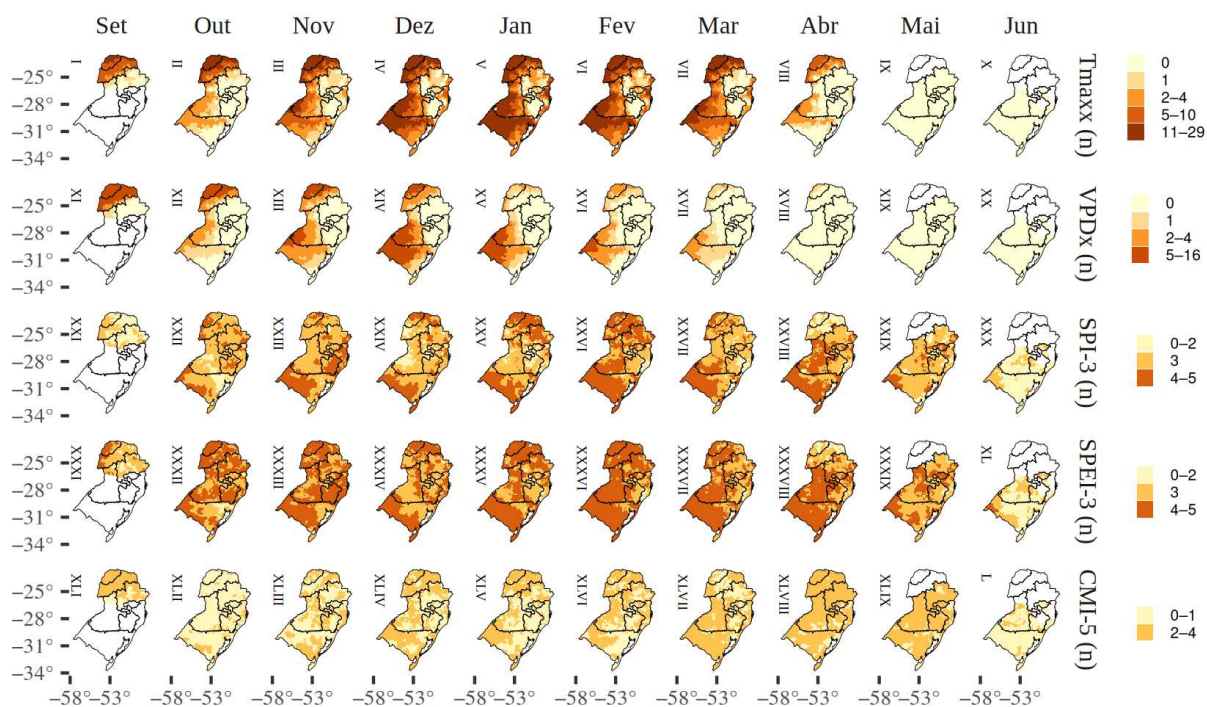
Figura A4— Distribuições decendiais dos índices climáticos: Tmaxx (a–c), VPDx (d–f), SPI-3 (g–i), SPEI-3 (j–l) e CMI-5 (m–o), nas sub-regiões tritícolas: 1, 2 e 3, considerando os períodos: 1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023.



Fonte: Autor

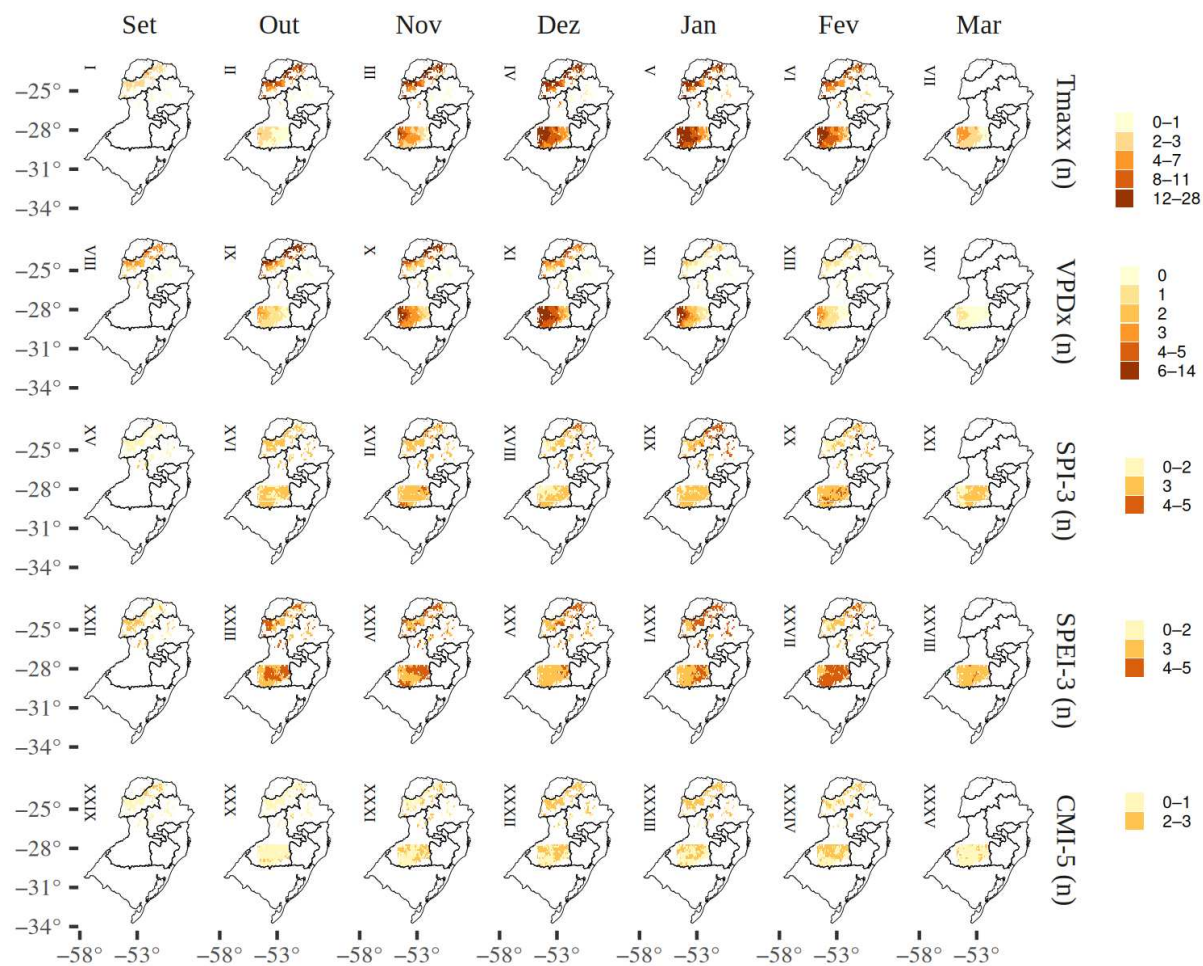
APÊNDICE B – Distribuição espacial do número de eventos extremos associados aos índices climáticos na escala mensal

Figura B1— Distribuição espacial do número de eventos extremos por década, associados aos índices climáticos T_{maxx}, VPD_x, SPI-3, SPEI-3 e CMI-5, na escala mensal do PAC da soja.



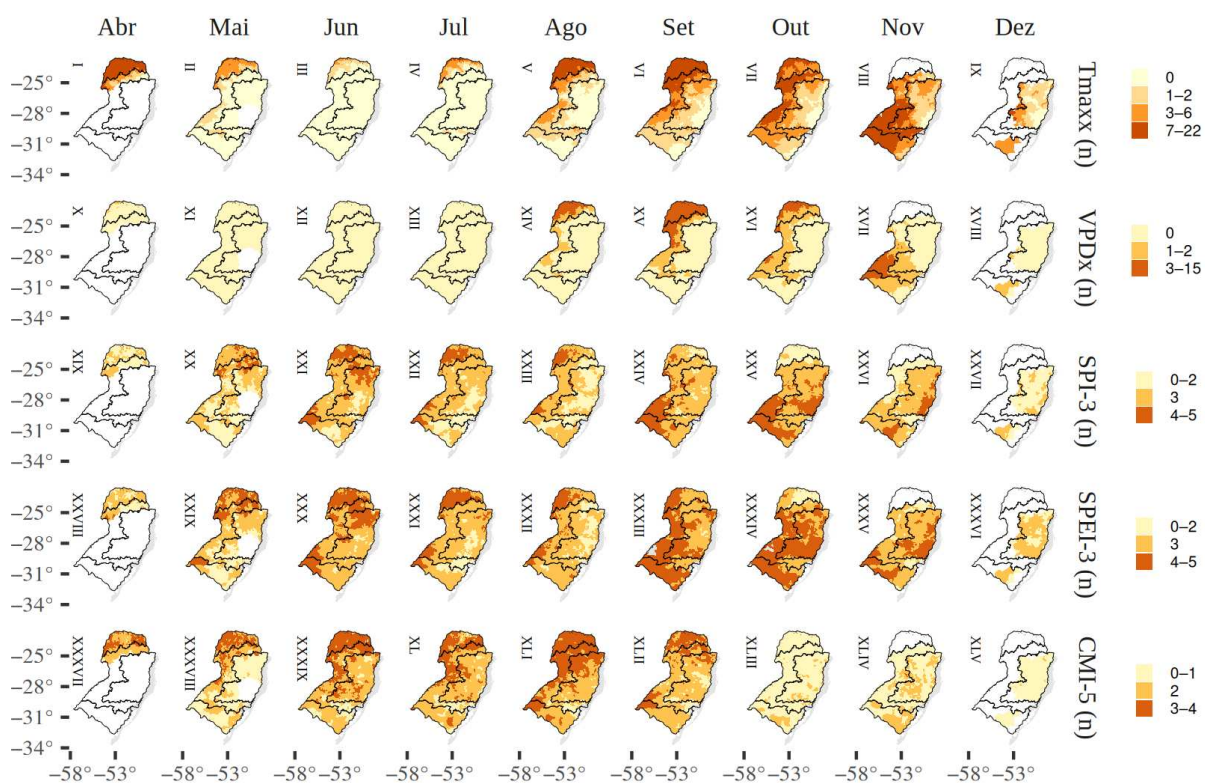
Fonte: Autor

Figura B2— Distribuição espacial do número de eventos extremos por década, associados aos índices climáticos Tmaxx, VPDx, SPI-3, SPEI-3 e CMI-5, na escala mensal do PEC da soja.



Fonte: Autor

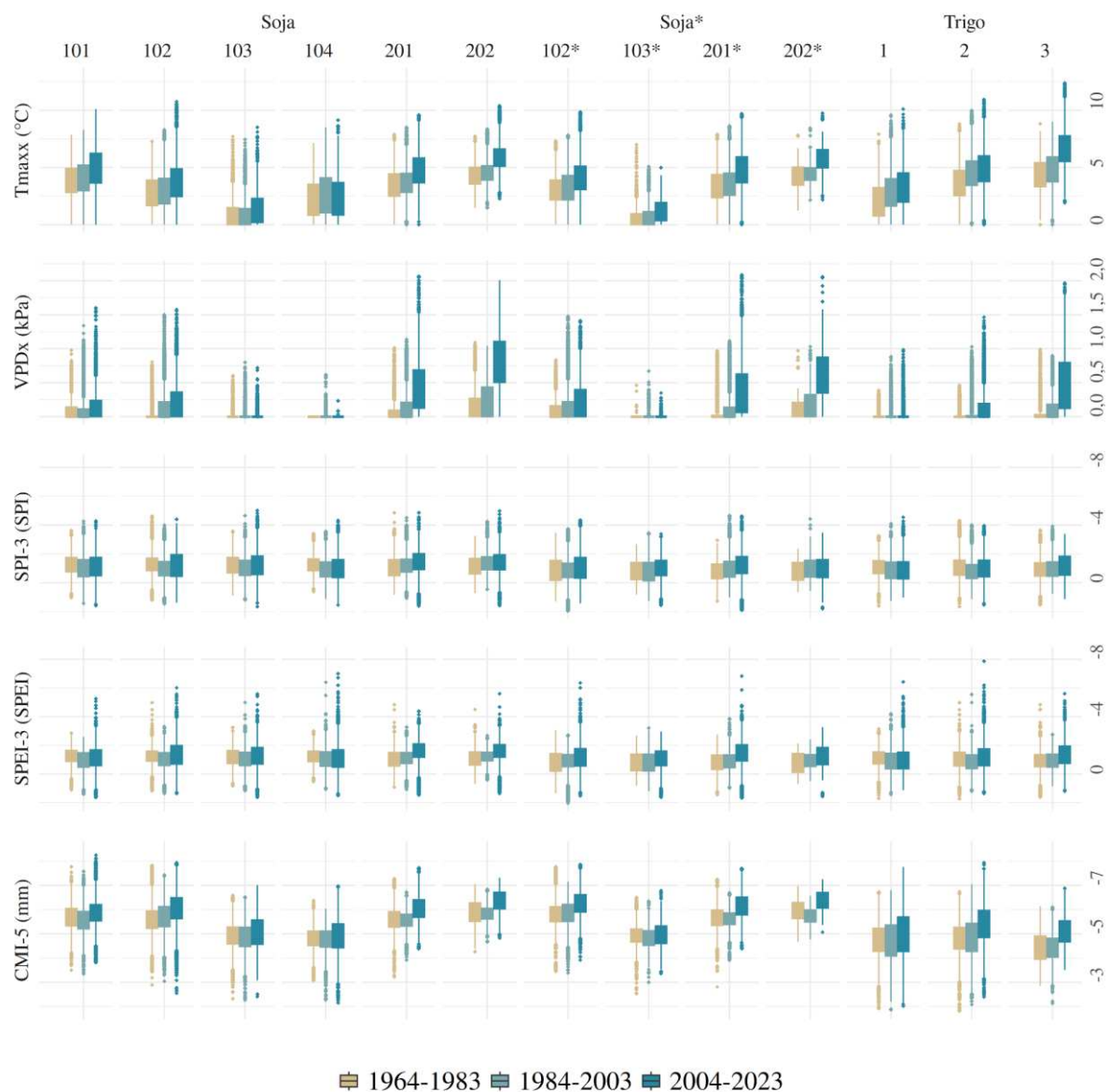
Figura B3— Distribuição espacial do número de eventos extremos por década, associados aos índices climáticos T_{maxx}, VPD_x, SPI-3, SPEI-3 e CMI-5, na escala mensal do PAC do trigo.



Fonte: Autor

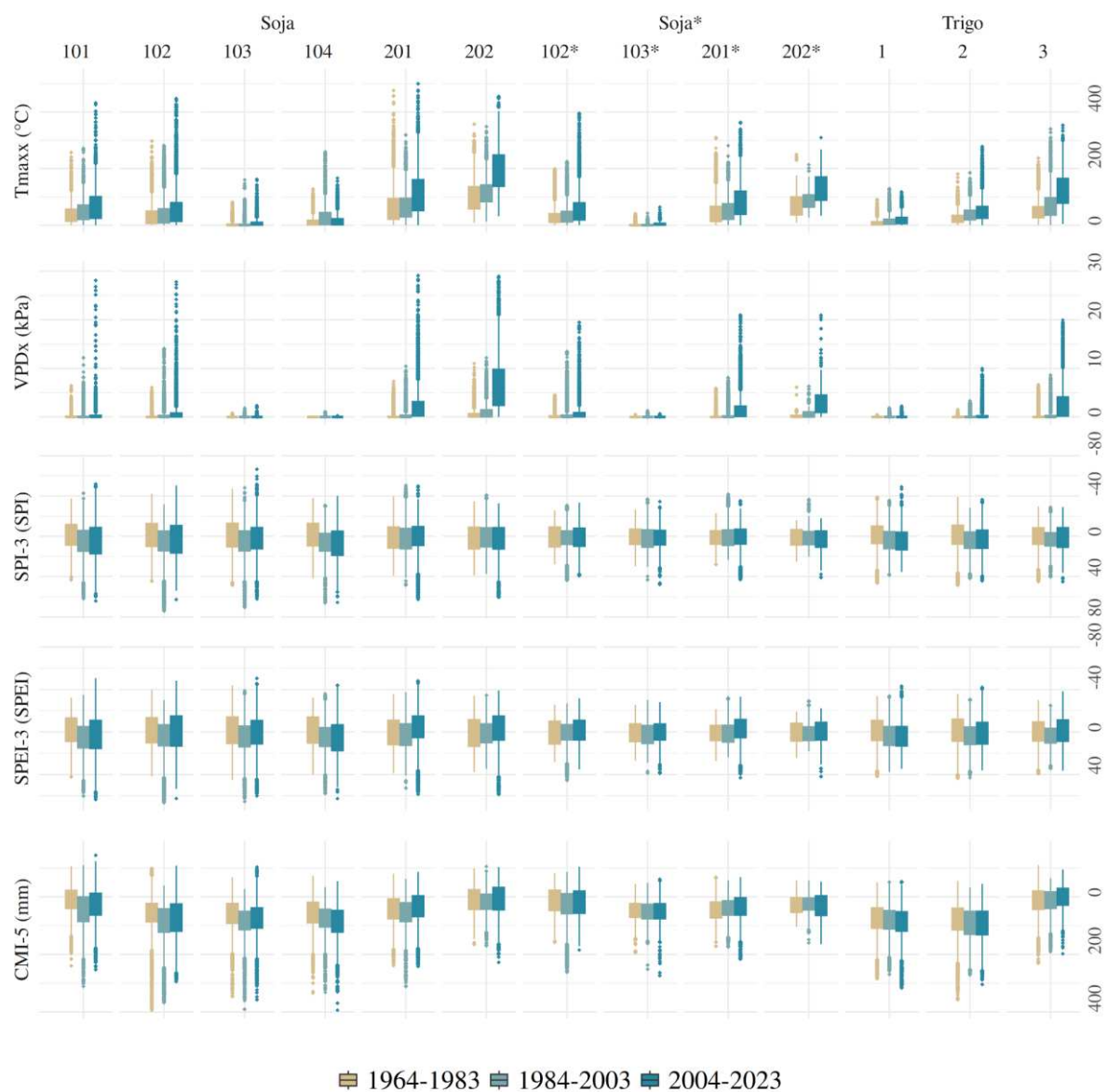
APÊNDICE C – Distribuições das métricas dos índices climáticos em diferentes períodos

Figura C1— Distribuições da máxima intensidade, por período (1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023), associadas aos índices climáticos Tmaxx, VPDx, SPI-3, SPEI-3 e CMI-5, nas sub-regiões sojícolas e tritícolas.



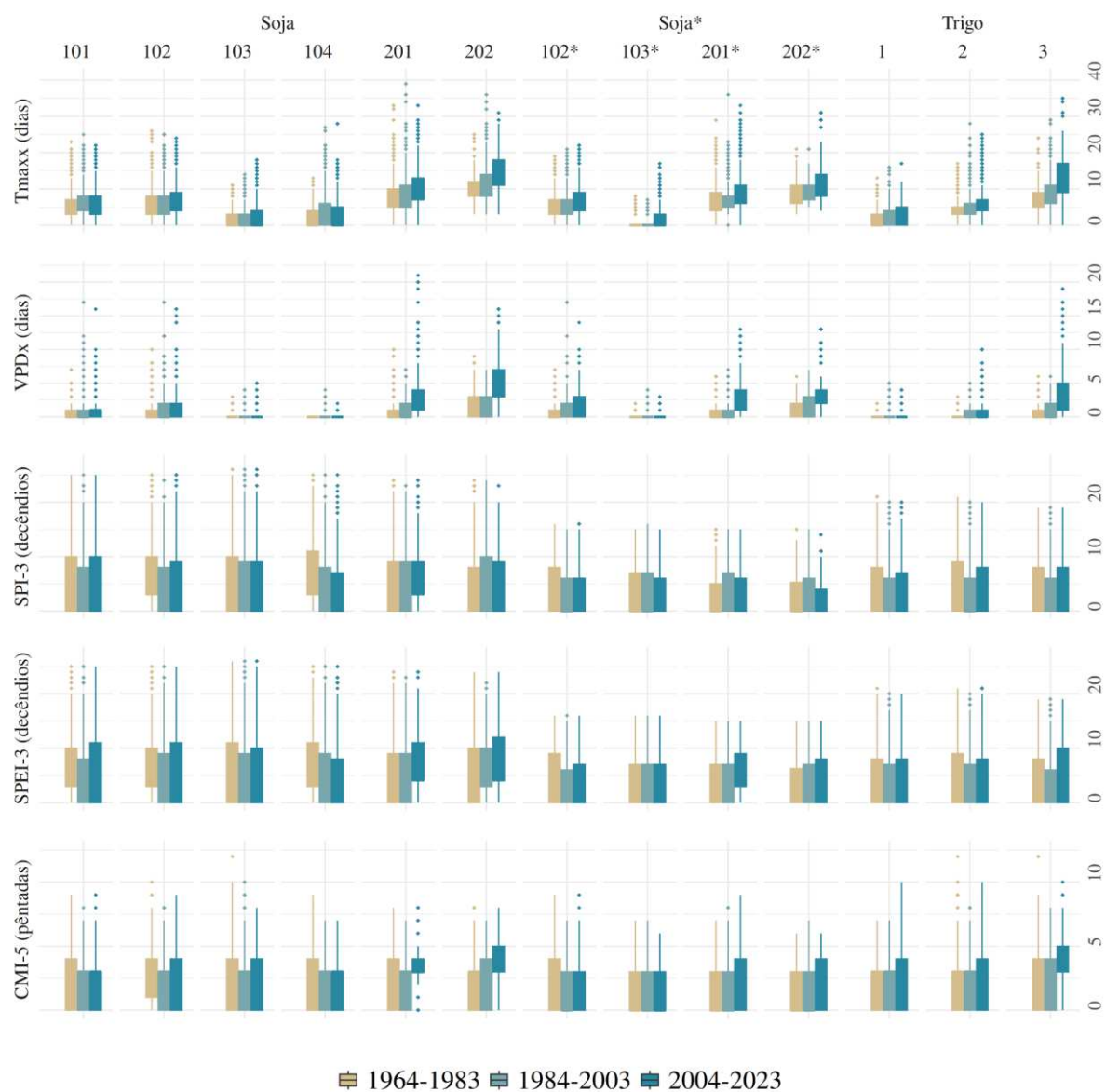
Fonte: Autor

Figura C2— Distribuições do acumulado, por período (1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023), associadas aos índices climáticos Tmaxx, VPDx, SPI-3, SPEI-3 e CMI-5, nas sub-regiões sojícolas e tritícolas.



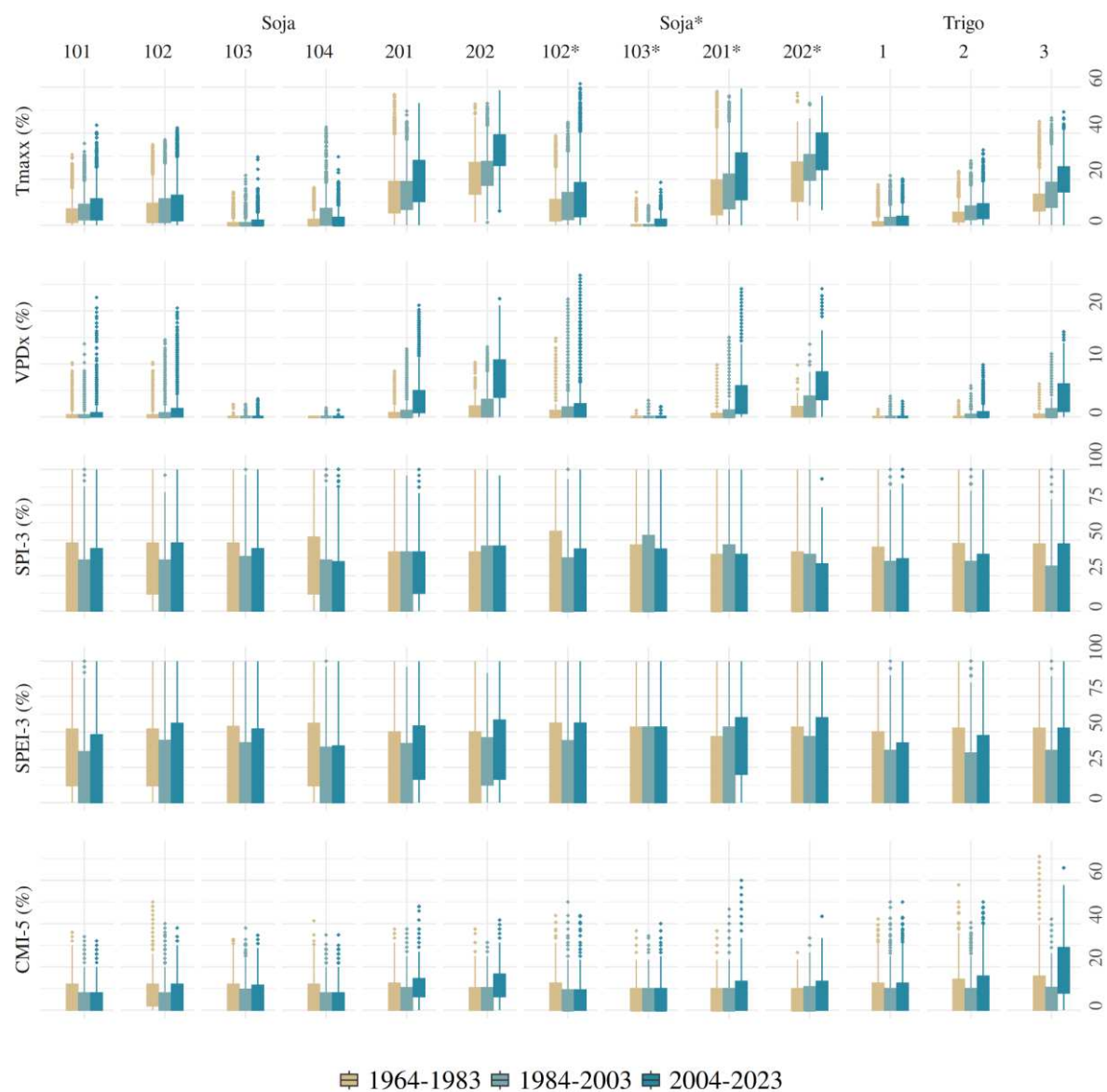
Fonte: Autor

Figura C3— Distribuições da máxima duração, por período (1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023), associadas aos índices climáticos Tmaxx, VPDx, SPI-3, SPEI-3 e CMI-5, nas sub-regiões sojícolas e tritícolas.



Fonte: Autor

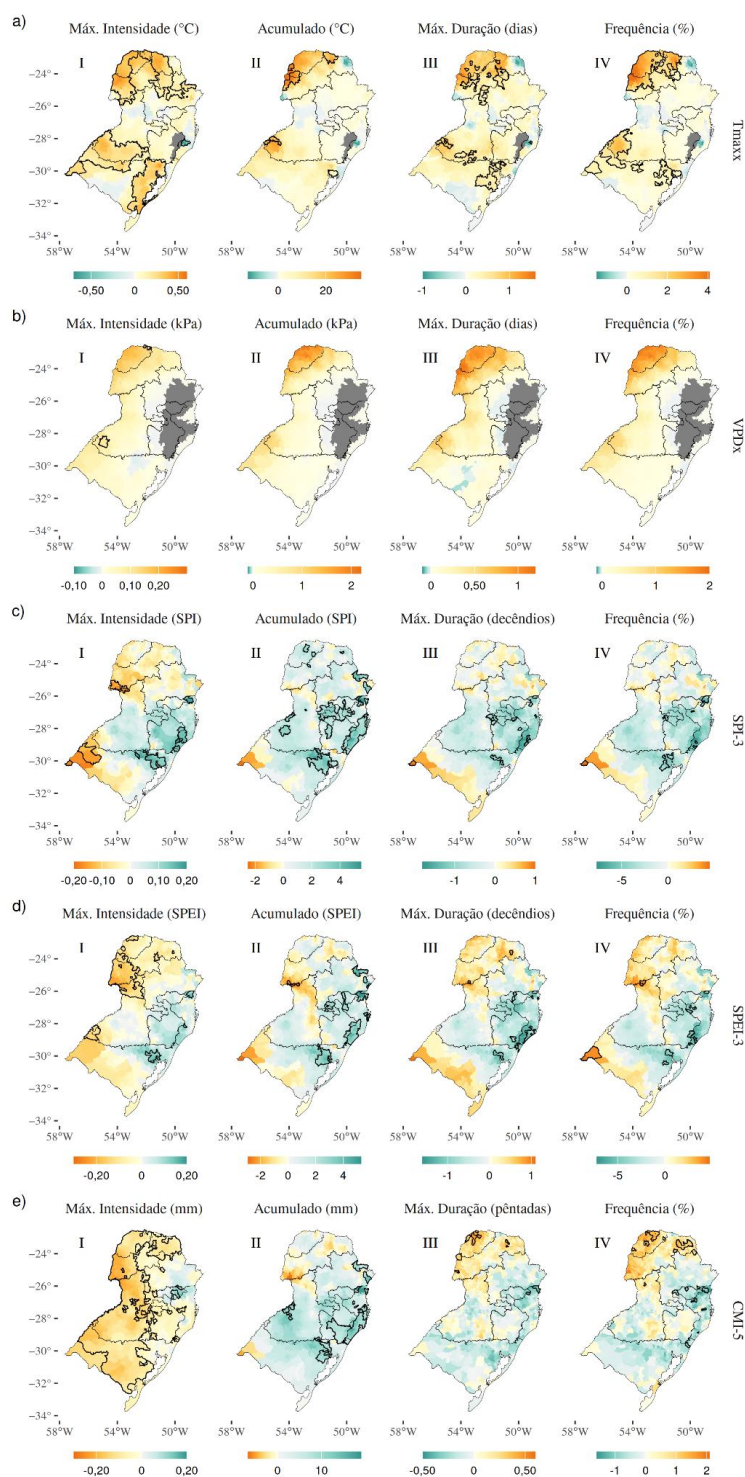
Figura C4— Distribuições da frequência de ocorrência, por período (1964–1983, 1984–2003 e 2004–2023), associadas aos índices climáticos Tmaxx, VPDx, SPI-3, SPEI-3 e CMI-5, nas sub-regiões sojícolas e tritícolas.



Fonte: Autor

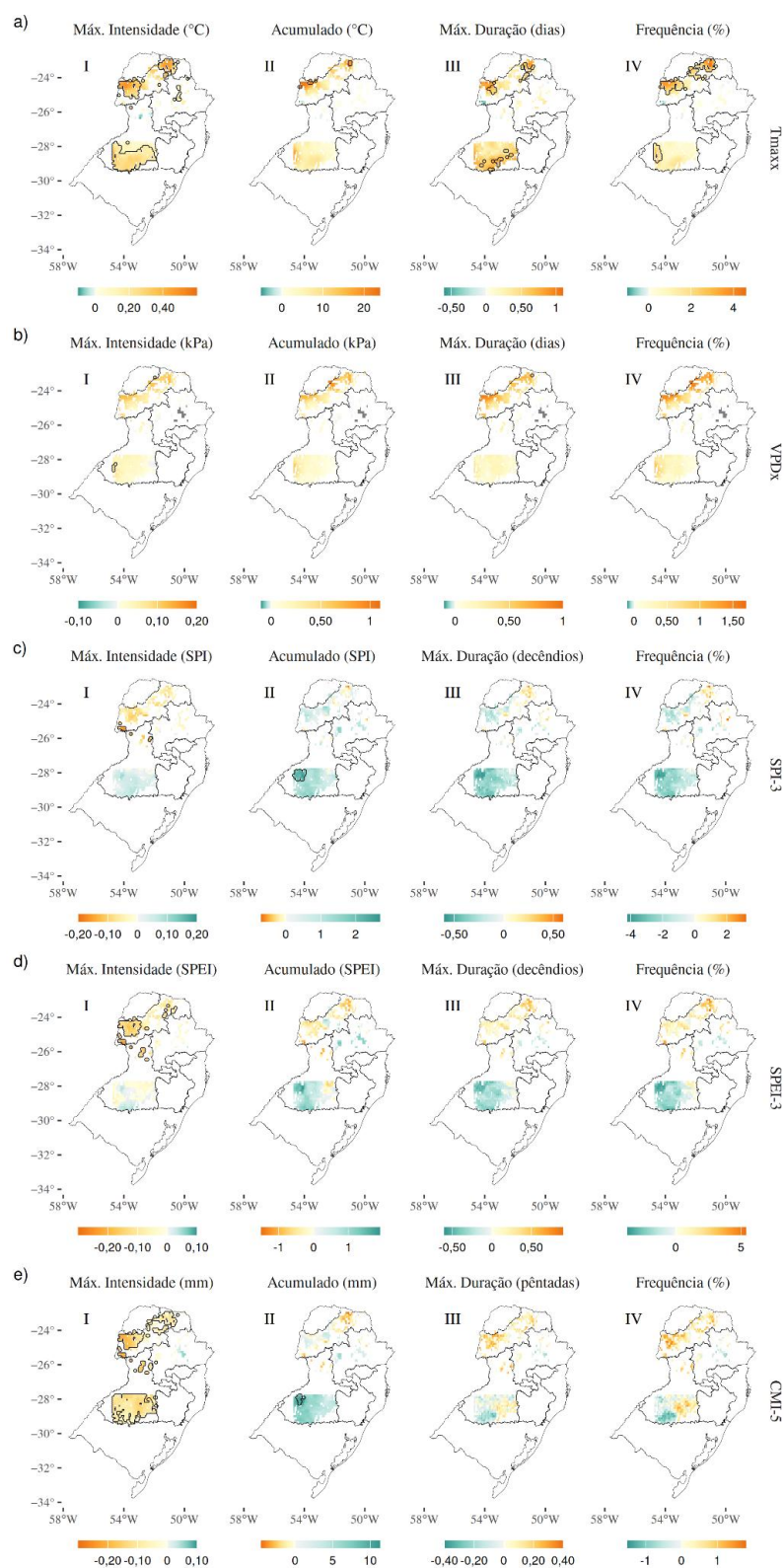
APÊNDICE D – Distribuição espacial das tendências das métricas dos índices climáticos

Figura D1— Distribuição espacial das tendências por décadas das métricas derivadas dos índices climáticos no PAC da soja, estimadas por meio da Regressão Linear: Tmaxx (a), VPDx (b), SPI-3 (c), SPEI-3 (d) e CMI-5 (e). As métricas consideradas foram: intensidade máxima (I), acumulado (II), duração máxima (III) e frequência (IV). Municípios com tendência estatisticamente significativa, com base no teste T de Student, estão destacados.



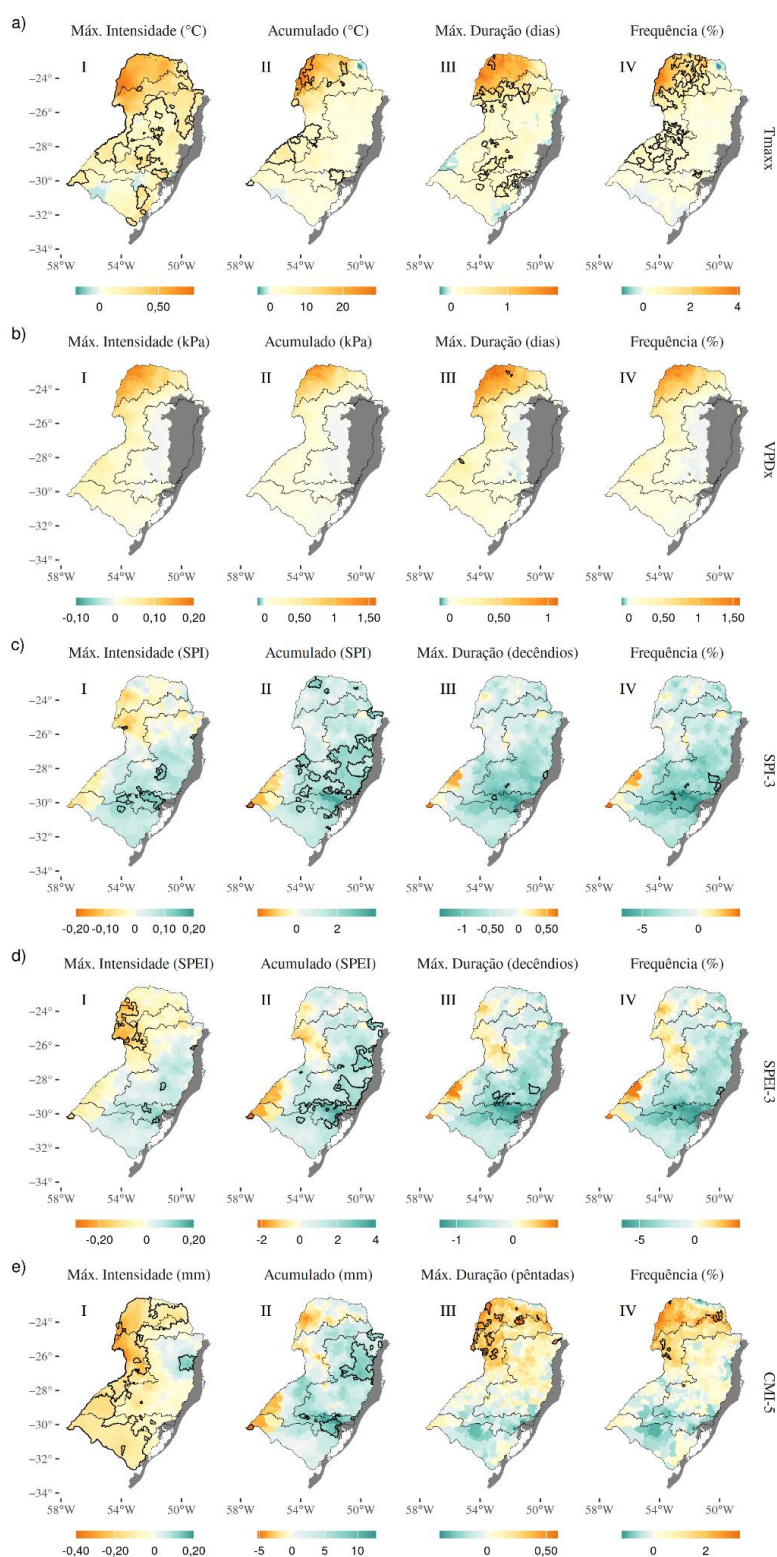
Fonte: Autor

Figura D2— Distribuição espacial das tendências por décadas das métricas derivadas dos índices climáticos no PEC da soja, estimadas por meio da Regressão Linear: Tmaxx (a), VPDx (b), SPI-3 (c), SPEI-3 (d) e CMI-5 (e). As métricas consideradas foram: intensidade máxima (I), acumulado (II), duração máxima (III) e frequência (IV). Células com tendência estatisticamente significativa, com base no teste T de Student, estão destacadas.



Fonte: Autor

Figura D3— Distribuição espacial das tendências por décadas das métricas derivadas dos índices climáticos no PAC do trigo, estimadas por meio da Regressão Linear: Tmaxx (a), VPDx (b), SPI-3 (c), SPEI-3 (d) e CMI-5 (e). As métricas consideradas foram: intensidade máxima (I), acumulado (II), duração máxima (III) e frequência (IV). Municípios com tendência estatisticamente significativa, com base no teste T de Student, estão destacados.



Fonte: Autor