

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ARLESTON PINHEIRO SALDANHA

**ANÁLISE HISTÓRICA E IMPACTO DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA NAS SAFRAS
AGRÍCOLAS NO RIO GRANDE DO SUL**

Alegrete

2026

ARLESTON PINHEIRO SALDANHA

**ANÁLISE HISTÓRICA E IMPACTO DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA NAS SAFRAS
AGRÍCOLAS NO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação Stricto sensu em Engenharia da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Felipe Denardin Costa
Co-orientador: Prof. Vinícius dos Santos Cunha

Alegrete

2026

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S162a Saldanha, Arleston Pinheiro
Análise Histórica e Impacto da Variabilidade Climática nas
Safras Agrícolas do Rio Grande do Sul / Arleston Pinheiro
Saldanha.
193 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2026.
"Orientação: Felipe Denardin Costa".

1. Análise de séries históricas de produtividade de arroz,
soja e trigo no Rio Grande do Sul.. 2. Investigação da
influência das fases do ENOS sobre as safras no Rio Grande do
Sul.. 3. Validação dos dados de reanálise do ERA5-Land com
observações do INMET para o Rio Grande do Sul.. 4. Avaliação
da relação entre produtividade agrícola do Rio Grande do Sul
com parâmetros meteorológicos, em escala estadual e
mesorregional.. I. Título.

ARLESTON PINHEIRO MACHADO

**ANÁLISE HISTÓRICA E IMPACTO DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA NAS SAFRAS
AGRÍCOLAS NO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 10/04/2026.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Felipe Denardin Costa
Orientador
(Unipampa)

Prof. Dr. Vinícius dos Santos Cunha
Coorientador
(Unipampa)

Dra Jossana Ceolin Cera
(IRGA)

Prof. Dr. Luiz Eduardo Medeiros
(Unipampa)



Assinado eletronicamente por **FELIPE DENARDIN COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/04/2026, às 10:33, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Jossana Ceolin Cera, Usuário Externo**, em 12/05/2026, às 11:30, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **VINICIUS DOS SANTOS CUNHA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/05/2026, às 11:54, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIZ EDUARDO MEDEIROS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/05/2026, às 12:08, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2007115** e o código CRC **96C18F7F**.

RESUMO

A variabilidade climática é o principal condicionante da produtividade agrícola no Rio Grande do Sul (RS), afetando culturas estratégicas como soja, arroz e trigo. Este estudo investigou a influência do fenômeno El Niño–Oscilação Sul (ENOS) e de variáveis meteorológicas locais — temperatura do ar, precipitação, umidade do solo e déficit de pressão de vapor (DPV) — sobre o rendimento agrícola em escalas estadual e regional (mesorregiões do IBGE). A metodologia consistiu na análise de séries históricas decenais e na validação da reanálise ERA5-Land frente aos dados observacionais do INMET. Os resultados indicam que o ENOS modula a produção de forma distinta: anos de El Niño favorecem o desempenho da soja, enquanto anos de La Niña mostram-se mais favoráveis ao arroz e ao trigo. Demonstrou-se que a variabilidade produtiva no estado não é explicada isoladamente pela precipitação, mas pelo balanço entre a oferta hídrica e a demanda atmosférica representada pelo DPV. A validação do ERA5-Land confirmou a robustez da base para estudos agroclimáticos espacializados no RS. O trabalho conclui que a quantificação do estresse hídrico real fundamenta o desenvolvimento de modelos de previsão de safra e estratégias de adaptação regional.

Palavras-chave: Variabilidade Climática, Produtividade Agrícola, ERA5-Land, Déficit de Pressão de Vapor

ABSTRACT

Climate variability is the primary driver of agricultural productivity in Rio Grande do Sul (RS), Brazil, significantly affecting strategic crops such as soybean, rice, and wheat. This study investigated the influence of the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) and local meteorological variables — air temperature, precipitation, soil moisture, and vapor pressure deficit (VPD) — on crop yields at both state and regional scales (IBGE mesoregions). The methodology involved the analysis of decadal historical series and the validation of the ERA5-Land reanalysis against INMET observational data. Results indicate that ENSO modulates production distinctively: El Niño years favor soybean performance, while La Niña years are more favorable for rice and wheat. It was demonstrated that productive variability in the state cannot be explained by precipitation alone, but rather by the balance between water supply and atmospheric demand represented by VPD. The validation of ERA5-Land confirmed the reliability of this dataset for spatialized agroclimatic studies in RS. The study concludes that quantifying actual water stress provides a technical basis for developing crop yield forecast models and regional adaptation strategies.

Keywords: Climate Variability, Agricultural Productivity, ERA5-Land, Vapor Pressure Deficit

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Divisão mesorregional do estado do Rio Grande do Sul, destacando as sete mesorregiões utilizadas como base espacial de análise neste estudo: Noroeste Rio-Grandense, Nordeste Rio-Grandense, Centro Ocidental Rio-Grandense, Centro Oriental Rio-Grandense, Metropolitana de Porto Alegre, Sudoeste Rio-Grandense e Sudeste Rio-Grandense.	21
Figura 2 – Anomalias de TSM entre 1970 e 2024, com características de fases do ENOS.	36
Figura 3 – Produtividade média do arroz no RS de 1974 a 2023, com tendência de crescimento ao longo do período e variações interanuais.	37
Figura 4 – Produtividade média da soja no RS de 1974 a 2023, evidenciando crescimento ao longo do período e forte variabilidade interanual.	38
Figura 5 – Produtividade do trigo no RS de 1974 a 2023, evidenciando flutuações ao longo dos anos.	38
Figura 6 – Evolução temporal da produtividade e desvios percentuais para arroz, soja e trigo no Sudeste Rio-Grandense.	40
Figura 7 – Distribuição de frequências dos desvios percentuais de produtividade da cultura do arroz por mesorregião do RS.	42
Figura 8 – Distribuição de frequências dos desvios de produtividade da cultura da soja nas mesorregiões do RS.	43
Figura 9 – Distribuição de frequências dos desvios de produtividade da cultura do trigo nas mesorregiões do RS.	45
Figura 10 – Localização das estações meteorológicas do INMET utilizadas no presente estudo. Os pontos vermelhos indicam a localização de estações convencionais, enquanto que os pontos azuis mostram a localização de estações automáticas. Os contornos cinzas representam os limites das mesorregiões do RS, mostradas na Fig. 1.	47
Figura 11 – Influência do ENOS sobre variação relativa à produtividade média de arroz, soja e trigo no RS. A análise da evolução temporal foi realizada retirando a tendência média dos dados, para cada uma das culturas. Cada ponto triângulo representa um ano de safra, e a orientação representa acima, voltado para cima, ou abaixo, voltado para baixo, da média. As cores vermelho, azul e cinza representam as fases El Niño, La Niña e Neutro, e os percentuais apresentados na legenda são estimados comparando safras que coincidiram com a mesma fase.	54
Figura 12 – Comparação entre a temperatura do ar observada na estação do INMET de Santa Vitória do Palmar/Barra do Chuí (EMA) e a temperatura estimada pelo ERA5-Land, com coeficiente de correlação de Pearson ($r =$	

0,96).	56
Figura 13 – Comparação entre a temperatura do ar observada na estação do INMET de Itaqui (EMC) e a temperatura estimada pelo ERA5-Land, com coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0,91$).	57
Figura 14 – Comparação entre a temperatura do ponto de orvalho observada na estação do INMET de Capão do Leão/Pelotas (EMA) e a temperatura do ponto de orvalho estimada pelo ERA5-Land, com coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0,97$).	58
Figura 15 – Comparação entre a temperatura do ponto de orvalho observada na estação do INMET de Cruz Alta (EMA) e a temperatura do ponto de orvalho estimada pelo ERA5-Land, com coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0,95$).	59
Figura 16 – Comparação entre a precipitação mensal acumulada observada na estação do INMET de Capão do Leão/Pelotas (EMA) e a precipitação mensal estimada pelo ERA5-Land, com coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0,85$).	61
Figura 17 – Comparação entre a precipitação mensal acumulada observada na estação do INMET de São Borja (EMA) e a precipitação mensal estimada pelo ERA5-Land, com coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0,65$).	62
Figura 18 – Média mensal da temperatura do ar a 2 metros no RS para o período de 1970 a 2024.	64
Figura 19 – Precipitação acumulada mensal média no RS para o período de 1970 a 2024.	66
Figura 20 – Média mensal do DPV no RS para o período de 1970 a 2024.	68
Figura 21 – Climatologia da umidade do solo mensal média na camada superficial (até 30 cm) no RS para o período de 1970 a 2024.	70
Figura 22 – Médias trimestrais da temperatura do ar a 2 metros no RS por década, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.	72
Figura 23 – Médias trimestrais da temperatura do ar a 2 metros no RS por década, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.	73
Figura 24 – Médias trimestrais da temperatura do ar a 2 metros no RS por década, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.	74
Figura 25 – Diferença média da temperatura do ar a 2 metros por década com relação à média de todo o período, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.	75
Figura 26 – Diferença média da temperatura do ar a 2 metros por década com relação à média de todo o período, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.	76
Figura 27 – Diferença média da temperatura do ar a 2 metros por década com relação	

à média de todo o período, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.	77
Figura 28 – Médias trimestrais da precipitação total no RS por década, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.	78
Figura 29 – Médias trimestrais da precipitação total no RS por década, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.	79
Figura 30 – Médias trimestrais da precipitação total no RS por década, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.	80
Figura 31 – Diferença da média por década da precipitação total acumulada mensal com relação à média para todo o período, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.	82
Figura 32 – Diferença da média por década da precipitação total acumulada mensal com relação à média para todo o período, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.	83
Figura 33 – Diferença da média por década da precipitação total acumulada mensal com relação à média para todo o período, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.	84
Figura 34 – Médias trimestrais do DPV no RS por década, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.	86
Figura 35 – Médias trimestrais do DPV no RS por década, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.	87
Figura 36 – Médias trimestrais do DPV no RS por década, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.	88
Figura 37 – Diferença entre a média decadal de DPV com relação à média para todo o período, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.	89
Figura 38 – Diferença entre a média decadal de DPV com relação à média para todo o período, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.	90
Figura 39 – Diferença entre a média decadal de DPV com relação à média para todo o período, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.	91
Figura 40 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L1 no RS por década, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.	93
Figura 41 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L1 no RS por década, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.	94
Figura 42 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L1 no RS por década, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.	95
Figura 43 – Diferença da umidade do solo, por década na camada L1 no RS com relação à média de todo o período, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.	97
Figura 44 – Diferença da umidade do solo, por década na camada L1 no RS com	

relação à média de todo o período, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.	98
Figura 45 – Diferença da umidade do solo, por década na camada L1 no RS com relação à média de todo o período, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.	99
Figura 46 – Relação entre o desvio da produtividade do arroz na região Sudoeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	101
Figura 47 – Relação entre o desvio da produtividade da soja na região Noroeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	104
Figura 48 – Relação entre o desvio da produtividade do trigo na região Noroeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	107
Figura 49 – Relação da interação entre a umidade do solo L2 e a precipitação sobre os desvios de produtividade do arroz.	110
Figura 50 – Relação da interação entre a umidade do solo L2 e o DPV sobre os desvios de produtividade do arroz.	112
Figura 51 – Relação da interação entre a temperatura do ar e o DPV sobre os desvios de produtividade do arroz.	113
Figura 52 – Relação da interação entre a precipitação e o DPV sobre os desvios de produtividade do arroz.	115
Figura 53 – Relação da interação entre a umidade do solo L2 e a precipitação sobre os desvios de produtividade da soja.	117
Figura 54 – Relação da interação entre a umidade do solo L2 e o DPV sobre os desvios de produtividade da soja.	119
Figura 55 – Relação da interação entre a temperatura do ar e o DPV sobre os desvios de produtividade da soja.	121
Figura 56 – Relação da interação entre a precipitação e o DPV sobre os desvios de produtividade da soja.	123
Figura 57 – Relação da interação entre a umidade do solo L2 e a precipitação sobre os desvios de produtividade do trigo.	125
Figura 58 – Relação da interação entre a umidade do solo L2 e o DPV sobre os desvios de produtividade do trigo.	127
Figura 59 – Relação da interação entre a temperatura do ar e o DPV sobre os desvios de produtividade do trigo.	129
Figura 60 – Relação da interação entre a precipitação e o DPV sobre os desvios de produtividade do trigo.	131
Figura 61 – Mesmo que Fig. 6, porém para a mesorregião Nordeste do RS.	151

Figura 62 – Mesmo que Fig. 6, porém para a mesorregião Noroeste do RS.	152
Figura 63 – Mesmo que Fig. 6, porém para a mesorregião Sudoeste do RS.	153
Figura 64 – Mesmo que Fig. 6, porém para a mesorregião Centro Oriental do RS. ...	154
Figura 65 – Mesmo que Fig. 6, porém para a mesorregião Centro Ocidental do RS. ...	155
Figura 66 – Mesmo que Fig. 6, porém para a mesorregião Metropolitana de Porto Alegre.	156
Figura 67 – Climatologia da umidade do solo mensal média na camada L2 (7–28 cm) no RS para o período de 1970 a 2024.	157
Figura 68 – Climatologia da umidade do solo mensal média na camada L3 (28–100 cm) no RS para o período de 1970 a 2024.	158
Figura 69 – Climatologia da umidade do solo mensal média na camada L4 (100–289 cm) no RS para o período de 1970 a 2024.	159
Figura 70 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L2 no RS por década, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.	160
Figura 71 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L2 no RS por década, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.	161
Figura 72 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L2 no RS por década, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.	162
Figura 73 – Diferença da umidade do solo na camada L2 no RS com relação à média por década, dos trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.	163
Figura 74 – Diferença da umidade do solo na camada L2 no RS com relação à média por década, dos trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.	164
Figura 75 – Diferença da umidade do solo na camada L2 no RS com relação à média por década, dos trimestres SON, OND, NDJ e DJF.	165
Figura 76 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L3 no RS por década, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.	166
Figura 77 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L3 no RS por década, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.	167
Figura 78 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L3 no RS por década, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.	168
Figura 79 – Diferença da umidade do solo na camada L3 no RS com relação à média por década, dos trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.	169
Figura 80 – Diferença da umidade do solo na camada L3 no RS com relação à média por década, dos MJJ, JJA, JAS e ASO.	170
Figura 81 – Diferença da umidade do solo na camada L3 no RS com relação à média por década, dos SON, OND, NDJ e DJF.	171
Figura 82 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L4 no RS por década, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.	172
Figura 83 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L4 no RS por década,	

abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.	173
Figura 84 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L4 no RS por década, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.	174
Figura 85 – Diferença da umidade do solo na camada L4 no RS com relação à média por década, dos trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.	175
Figura 86 – Diferença da umidade do solo na camada L4 no RS com relação à média por década, dos trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.	176
Figura 87 – Diferença da umidade do solo na camada L4 no RS com relação à média por década, dos trimestres SON, OND, NDJ e DJF.	177
Figura 88 – Relação entre o desvio da produtividade do arroz na região Centro-Occidental do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	178
Figura 89 – Relação entre o desvio da produtividade do arroz na região Centro-Oriental do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	179
Figura 90 – Relação entre o desvio da produtividade do arroz na região Metropolitana de Porto Alegre no RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	180
Figura 91 – Relação entre o desvio da produtividade do arroz na região Nordeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	181
Figura 92 – Relação entre o desvio da produtividade do arroz na região Noroeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	181
Figura 93 – Relação entre o desvio da produtividade do arroz na região Sudeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	182
Figura 94 – Relação entre o desvio da produtividade da soja na região Centro-Occidental do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	183
Figura 95 – Relação entre o desvio da produtividade da soja na região Centro-Oriental do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	184
Figura 96 – Relação entre o desvio da produtividade da soja na região Metropolitana de Porto Alegre no RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	185
Figura 97 – Relação entre o desvio da produtividade da soja na região Nordeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	186

Figura 98 – Relação entre o desvio da produtividade da soja na região Sudeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	186
Figura 99 – Relação entre o desvio da produtividade da soja na região Sudoeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	187
Figura 100 – Relação entre o desvio da produtividade do trigo na região Centro-Occidental do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	188
Figura 101 – Relação entre o desvio da produtividade do trigo na região Centro-Occidental do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	189
Figura 102 – Relação entre o desvio da produtividade do trigo na região Metropolitana de Porto Alegre no RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	190
Figura 103 – Relação entre o desvio da produtividade do trigo na região Nordeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	191
Figura 104 – Relação entre o desvio da produtividade do trigo na região Sudeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	191
Figura 105 – Relação entre o desvio da produtividade do trigo na região Sudoeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).	192

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Estações meteorológicas do INMET no Rio Grande do Sul, utilizadas no estudo. As colunas da esquerda indicam o tipo da estação e o período de operação. 48
- Tabela 2 – Índices estatísticos da validação do ERA5-Land para a temperatura do ar (T). N é o número de pares de dados utilizados. r é o coeficiente de correlação de Pearson. RMSE é a raiz do erro quadrático médio, MBE é o viés médio (ERA5-Land menos observações) e MAE é o erro absoluto médio (todas as métricas em °C). * indica $p < 0,05$ e ** indica $p < 0,01$, calculado a partir de r e N143
- Tabela 3 – Índices estatísticos da validação do ERA5-Land para a temperatura do ponto de orvalho (Td). N é o número de pares de dados utilizados. r é o coeficiente de correlação de Pearson. RMSE é a raiz do erro quadrático médio, MBE é o viés médio (ERA5-Land menos observações) e MAE é o erro absoluto médio (todas as métricas em °C). * indica $p < 0,05$ e ** indica $p < 0,01$, calculado a partir de r e N146
- Tabela 4 – Índices estatísticos da validação do ERA5-Land para a precipitação mensal total. N é o número de pares de dados utilizados. r é o coeficiente de correlação de Pearson. RMSE é a raiz do erro quadrático médio, MBE é o viés médio (ERA5-Land menos observações) e MAE é o erro absoluto médio (todas as métricas em mm). PBIAS (%) é o viés percentual, e * indica $p < 0,05$, ** indica $p < 0,01$ e *** indica $p < 0,001$, calculado a partir de r e N148

LISTA DE SIGLAS

<i>DPV</i>	Déficit de Pressão de Vapor
<i>ENOS</i>	El Niño – Oscilação Sul
<i>FEE</i>	Fundação de Economia e Estatística Siegfried Emanuel Heuser
<i>IBGE</i>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<i>INMET</i>	Instituto Nacional de Meteorologia
<i>IPCC</i>	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
<i>MAPA</i>	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
<i>NOAA</i>	National Oceanic and Atmospheric Administration
<i>ONI</i>	Oceanic Niño Index
<i>PIB</i>	Produto Interno Bruto
<i>RS</i>	Rio Grande do Sul
<i>SSPs</i>	Shared Socioeconomic Pathways
<i>TSM</i>	Temperatura da Superfície do Mar
<i>Cfa</i>	Clima temperado úmido com verão quente
<i>Cfb</i>	Clima temperado úmido com verão ameno

LISTA DE SÍMBOLOS

DPV	Déficit de Pressão de Vapor
T	Temperatura do ar
T_d	Temperatura do ponto de orvalho
e_s	Pressão de vapor de saturação
e_a	Pressão real de vapor d'água
CO_2	Dióxido de carbono
P	Precipitação
$L1$	Profundidade de 0 a 7 cm
$L2$	Profundidade de 7 a 28 cm
$L3$	Profundidade de 28 a 100 cm
$L4$	Profundidade de 100 a 289 cm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	Contexto Agroeconômico do RS.....	20
2.2	Clima e Posição Geográfica do RS.....	21
2.3	Teleconexões e o El Niño - Oscilação Sul (ENOS).....	22
2.3.1	Impactos observados na Precipitação do RS durante eventos de ENOS...	25
2.3.2	Impactos observados na Temperatura do RS durante eventos de ENOS ..	26
2.4	Déficit de Pressão de Vapor (DPV)	27
2.5	Reanálises atmosféricas	30
2.6	Fenologia e desenvolvimento radicular de arroz, soja e trigo no RS.....	32
3	METODOLOGIA.....	35
3.1	Classificação dos eventos de ENOS	35
3.2	Dados observacionais e de reanálise meteorológica	36
3.2.1	Produtividade agrícola do RS	36
3.2.1.1	Estimativa dos Desvios de produtividade no RS	38
3.2.2	Estações do INMET.....	45
3.2.3	ERA5-Land	50
3.3	Estimativa do Deficit de Pressão de Vapor	51
4	RESULTADOS	53
4.1	Influência do ENOS sobre a Produtividade agrícola no RS.....	53
4.1.1	Validação dados Era5–Land	55
4.1.2	Temperatura do ar	55
4.1.3	Temperatura do ponto de orvalho.....	57
4.1.4	Precipitação acumulada mensal	60
4.2	Climatologia	62
4.2.1	Temperatura a 2 metros (T2m).....	71
4.2.2	Precipitação Total acumulada (TP).....	77
4.2.3	Déficit de Pressão de Vapor (VPD)	84
4.2.4	Umidade Volumétrica do Solo (SWVL1)	91
4.3	Relação entre variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo com o desvio da produtividade do Arroz por mesorregiões do RS	101
4.4	Relação entre variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo com o desvio da produtividade da Soja por mesorregiões do RS.....	104
4.5	Relação entre variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo com o desvio da produtividade do Trigo por mesorregiões do RS.....	107

4.5.1	Análise do impacto das Variáveis Meteorológicas nos desvios das safras no RS	110
5	CONCLUSÃO	133
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135
	Apêndice A – Validação dados Era5–Land.....	143
A.1	Temperatura do ar.....	143
A.2	Temperatura do ponto do orvalho	146
A.3	Precipitação	148
	Apêndice B – Evolução temporal e desvios percentuais das Safras no RS.....	151
	Apêndice C – Climatologia de Umidade do Solo (L2, L3 e L4).....	157
C.1	Umidade Volumétrica do Solo - Camada L2	160
C.2	Umidade Volumétrica do Solo - Camada L3	166
C.3	Umidade Volumétrica do Solo - Camada L4	172
	Apêndice D – Desvio da produtividade das culturas de Arroz, Soja e Trigo no RS	178
D.1	Relação entre variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo com o desvio da produtividade do Arroz por mesorregiões do RS	178
D.2	Relação entre variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo com o desvio da produtividade da Soja por mesorregiões do RS.....	183
D.3	Relação entre variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo com o desvio da produtividade da Trigo por mesorregiões do RS	188

1 INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul (RS), estado mais meridional do Brasil, possui área de 281.707 km² e é composto por 497 municípios (IBGE, 2023). Localizado em zona de transição climática entre as latitudes médias e os trópicos, o estado apresenta elevada sensibilidade a sistemas atmosféricos de diferentes origens, como frentes frias, massas de ar tropicais e teleconexões climáticas globais (BERLATO et al., 2024). Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo subtropical úmido (Cfa e Cfb), caracterizado por precipitação bem distribuída ao longo do ano, variando de 1.299 mm a 1.800 mm, com verões quentes e ausência de estação seca definida (KUINCHTNER; BURIOL, 2001) (ALVARES et al., 2013). Esse conjunto de condições favorece tanto o cultivo de uma ampla variedade de culturas agrícolas quanto a atividade pecuária, que possuem expressiva contribuição na economia do RS.

A produção agrícola gaúcha é diversificada e tem destaque nacional, sobretudo com soja (*Glycine max* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.) e arroz (*Oryza sativa* L.), que ocupam papel central no PIB estadual e nas exportações brasileiras (BERTÊ et al., 2021; SPGG, 2025). Entretanto, essas culturas são muito sensíveis à variabilidade interanual e sazonal, que é expressiva no RS. Devido a variabilidade climática regional é frequente a ocorrência de eventos hidrometeorológicos extremos, como secas e inundações, que impactam diretamente a produção. Nesse contexto, a soja apresenta perdas recorrentes em verões marcados por estiagens, enquanto o trigo sofre com déficit hídrico no plantio e na colheita, além do risco de geadas. Já o arroz irrigado, embora menos dependente da chuva, é prejudicado por enchentes e atrasos logísticos (DEVI; SINCLAIR; TALIERCIO, 2015; FAKHET et al., 2021; FAOOFTHUN., 2021).

Entre os principais fenômenos climáticos de grande escala que modulam a variabilidade no RS, destaca-se o El Niño–Oscilação Sul (ENOS). Esse fenômeno é resultante da interação entre oceano e atmosfera no Pacífico equatorial. O El Niño, associado ao aquecimento anômalo das águas centrais e orientais do Pacífico, geralmente intensifica as chuvas no RS, sobretudo na primavera, enquanto a La Niña, caracterizada por resfriamento dessas águas, reduz a precipitação e favorece secas severas no estado (GRIMM; FERRAZ; GOMES, 1998; BERLATO; FONTANA, 2011; VALENTE et al., 2023). Essas anomalias impactam a produtividade agrícola de forma distinta entre culturas, podendo tanto favorecer rendimentos quanto intensificar perdas.

Outros fatores atmosféricos também exercem influência direta sobre os processos fisiológicos das plantas. A temperatura do ar e a disponibilidade de vapor d'água na atmosfera controlam a transpiração e a regulação estomática, sendo fundamentais para o balanço hídrico dos ecossistemas agrícolas. Assim, o déficit de pressão de vapor (DPV), definido como a diferença entre a pressão de saturação e a pressão real de vapor d'água, representa uma medida do potencial de secagem da atmosfera. Valores elevados de DPV

indicam maior demanda evaporativa, afetando a condutância estomática e o potencial hídrico das plantas (GREEN et al., 2017). Cada cultura possui faixas críticas de tolerância ao DPV, e desvios persistentes nessas faixas comprometem o desenvolvimento e a produtividade. O arroz irrigado, por exemplo, apresenta elevada sensibilidade ao DPV, sobretudo nas fases de floração e enchimento de grãos (ARSEGO et al., 2020).

Compreender os impactos da variabilidade climática sobre a produção agrícola no RS exige uma abordagem que ultrapasse a análise isolada da precipitação e incorpore variáveis atmosféricas capazes de representar, com maior fidelidade, os mecanismos de estresse impostos às culturas. Além disso, a forte heterogeneidade espacial do território gaúcho, associada às diferenças climáticas e produtivas entre mesorregiões, reforça a necessidade de análises em múltiplas escalas, permitindo avaliar não apenas os padrões médios de resposta das safras às fases do ENOS, mas também os contrastes agroclimáticos internos que modulam a produtividade de arroz, soja e trigo no estado.

Dessa forma, o presente estudo propõe uma abordagem integrada para avaliar o impacto da variabilidade climática sobre a produtividade agrícola gaúcha nas últimas cinco décadas. Para superar as limitações impostas pela distribuição irregular das estações meteorológicas, também são utilizados dados de reanálise meteorológica, especificamente a ERA5-Land, validada criteriosamente com registros observacionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Através dessa análise o trabalho busca oferecer uma compreensão dos riscos climáticos, para que no futuro possam ser desenvolvidos modelos mais assertivos, e assim, fornecer subsídios técnicos para o planejamento agrícola e estratégias de adaptação no estado.

O presente texto está estruturado em cinco capítulos, além desta Introdução (Cap. 1), onde se apresentam a contextualização e os objetivos. O Capítulo 2 reúne a fundamentação teórica sobre variabilidade climática e fisiologia de safras; o Capítulo 3 detalha as bases de dados e os métodos estatísticos aplicados; o Capítulo 4 expõe e discute os resultados obtidos; e o Capítulo 5, onde são apresentadas as considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentada a fundamentação teórica que subsidia a análise do impacto da variabilidade climática sobre a produtividade agrícola no Rio Grande do Sul. A revisão abrange desde o panorama agroeconômico e geográfico do estado até os mecanismos meteorológicos e biofísicos que influenciam o desempenho das culturas da soja, do arroz e do trigo.

2.1 Contexto Agroeconômico do RS

A Fig. 1 apresenta a divisão do Rio Grande do Sul em sete mesorregiões geográficas, que são: Noroeste Rio-Grandense, Nordeste Rio-Grandense, Centro Ocidental Rio-Grandense, Centro Oriental Rio-Grandense, Metropolitana de Porto Alegre, Sudoeste Rio-Grandense e Sudeste Rio-Grandense. Essa compartimentação espacial constitui a base regional adotada neste estudo, pois permite analisar a variabilidade climática e produtiva em diferentes porções do estado, que apresentam características ambientais e sistemas agrícolas distintos.

No contexto econômico estadual, essa diferenciação regional é especialmente relevante, uma vez que a agropecuária desempenha papel central na estrutura produtiva do RS, com forte contribuição para a geração de renda, emprego e exportações. Entre as principais culturas de relevância econômica destacam-se a soja, o trigo e o arroz, que ocupam extensas áreas cultivadas e apresentam importância estratégica na dinâmica agroeconômica gaúcha (BERTÊ et al., 2021).

Figura 1 – Divisão mesorregional do estado do Rio Grande do Sul, destacando as sete mesorregiões utilizadas como base espacial de análise neste estudo: Noroeste Rio-Grandense, Nordeste Rio-Grandense, Centro Ocidental Rio-Grandense, Centro Oriental Rio-Grandense, Metropolitana de Porto Alegre, Sudoeste Rio-Grandense e Sudeste Rio-Grandense.



Fonte: Adaptado de IBGE (2019) (mapa gerado através de <<https://www.baixarmapas.com.br/mapa-do-rio-grande-do-sul-mesorregioes/>>).

2.2 Clima e Posição Geográfica do RS

O clima do RS é majoritariamente classificado como Temperado do tipo Subtropical, enquadrando-se na categoria de clima Mesotérmico Úmido segundo a classificação de Köppen, predominam no estado os tipos climáticos Cfa e Cfb (KUINCHTNER; BURIOL, 2001; ALVARES et al., 2013).

O tipo Cfa, clima subtropical úmido com verões quentes, abrange grande parte do território, incluindo a região fisiográfica da Fronteira Oeste. Já o tipo Cfb ocorre nas áreas de maior altitude, sendo caracterizado por verões amenos e ausência de estação seca definida. Cidades como Passo Fundo estão situadas próximas à transição entre os dois tipos, mas ainda são classificadas como Cfa (KUINCHTNER; BURIOL, 2001; ALVARES et al., 2013).

A variabilidade sazonal de temperatura do RS apresenta significativas características de seu regime climático. O verão é geralmente quente, enquanto o inverno pode ser bastante rigoroso, com ocorrência frequente de geadas e, em situações excepcionais, episódios de neve. As temperaturas médias anuais situam-se entre 15°C e 18°C, com registros extremos que variam de mínimas em torno de -10°C a máximas que podem atingir

40°C (BERTÊ et al., 2021).

O regime pluviométrico do RS apresenta distribuição relativamente uniforme ao longo do ano, com baixa sazonalidade e ausência de estação seca bem definida. Essa regularidade é condicionada, sobretudo, pela atuação recorrente de sistemas atmosféricos de origem oceânica, como frentes frias e massas de ar úmido. No entanto, observa-se considerável heterogeneidade espacial nos totais anuais de precipitação. A metade sul do estado registra volumes médios anuais entre os valores de 1.299 mm a 1.500 mm, enquanto a porção norte apresenta valores mais elevados, variando de 1.500 mm a 1.800 mm. As maiores concentrações pluviométricas ocorrem no nordeste do território gaúcho, particularmente nas encostas do Planalto, onde os efeitos orográficos potencializam a precipitação (BERTÊ et al., 2021).

A posição geográfica do RS, situado entre as latitudes 27°03'42" e 33°45'09" Sul, aliada à diversidade de seu relevo, exerce influência significativa sobre a dinâmica climática regional e, favorece a incidência de diferentes sistemas atmosféricos que atuam sobre o estado, favorecendo a atuação alternada de massas de ar distintas de origens polar, tropical continental e atlântica, cujos deslocamentos e interações são determinantes para a variabilidade climática observada na região (KUINCHTNER; BURIOL, 2001; ALVARES et al., 2013; BERTÊ et al., 2021).

O relevo do RS é caracterizado por sua diversidade, apresentando variações altimétricas significativas ao longo do território. As altitudes no estado podem alcançar até 1.398 metros acima do nível do mar, refletindo a presença de diferentes unidades geomorfológicas, como planícies, depressões e áreas de planalto, que influenciam diretamente os padrões climáticos e o uso do solo (BERTÊ et al., 2021).

2.3 Teleconexões e o El Niño - Oscilação Sul (ENOS)

As teleconexões climáticas são anomalias atmosféricas e oceânicas de grande escala que se propagam por longas distâncias, influenciando de forma significativa e complexa o clima de regiões distantes. Como consequência das teleconexões destaca-se o ENOS por afetares diretamente o clima do RS, especialmente em sua variabilidade de precipitação e temperatura. Essas influências são moduladas por diversos fenômenos climáticos de grande escala, que atuam em diferentes escalas temporais (BERLATO et al., 2024; ARRUDA; CENTENO; NUNES, 2025).

O ENOS é o principal mecanismo de variabilidade climática interanual, e ocorre devido a interação do oceano com a atmosfera no Oceano Pacífico equatorial. Sendo caracterizado por anomalias na Temperatura da Superfície do Mar (TSM), ora com águas quentes (El Niño), ora com águas frias (La Niña), em associação com grandes oscilações barométrica, Oscilação Sul (OS) entre Taiti (Polinésia Francesa) e Darwin (Austrália), assim influenciando o clima no RS (MATZENAUER; RADIN; MALUF, 2017; BERLATO et al., 2024; CRESPO; FONTANA; SCHIRMBECK, 2024).

Em condições normais, os ventos alísios de sudeste, que sopram de leste a oeste ao longo do Oceano Pacífico, deslocam as águas superficiais quentes da costa da América do Sul em direção ao Pacífico ocidental. Esse transporte contínuo de águas quentes provoca o acúmulo de calor na região oeste do oceano, enquanto favorece o fenômeno de ressurgência na costa oeste da América do Sul, especialmente nas proximidades do Peru e do Equador. Nessa região, águas profundas, frias e ricas em nutrientes emergem para a superfície, alimentando ecossistemas marinhos e mantendo as temperaturas locais mais baixas (BERLATO; FONTANA, 2011; BERLATO et al., 2024).

Simultaneamente, esse padrão oceânico influencia a circulação atmosférica, estabelecendo a célula de Walker. Essa circulação é caracterizada pela elevação de ar quente e úmido sobre o Pacífico ocidental, onde as águas estão mais aquecidas, e pela descida de ar frio e seco sobre o Pacífico oriental, onde predomina a água fria. Como resultado, mantém-se um gradiente de temperatura da superfície do mar (TSM) entre o leste e o oeste do Pacífico, o qual regula a dinâmica climática da região (BERLATO; FONTANA, 2011).

Durante o fenômeno El Niño que corresponde a fase quente, observa-se um enfraquecimento dos ventos alísios, que em determinadas situações podem até inverter sua direção. Esse enfraquecimento compromete o transporte de águas quentes para o Pacífico ocidental e reduz a ressurgência de águas frias e ricas em nutrientes no Pacífico oriental (BERLATO; FONTANA, 2011; BERLATO et al., 2024; CRESPO; FONTANA; SCHIRMBECK, 2024).

Como resultado, ocorre o aquecimento anormal da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nas porções central e oriental do Pacífico, que passam a registrar valores acima da média climatológica. Esse aquecimento modifica o equilíbrio atmosférico e oceânico da região, podendo desencadear diversos impactos climáticos em escala global (BERLATO; FONTANA, 2011; RADONS et al., 2021; BERLATO et al., 2024; CRESPO; FONTANA; SCHIRMBECK, 2024).

Durante esse fenômeno, a Célula de Walker sofre um enfraquecimento e é deslocada em direção ao leste. Nesse contexto, o movimento ascendente do ar ocorre sobre a região central do Oceano Pacífico, enquanto o ar desce sobre o Pacífico ocidental e parte do norte da América do Sul. Esse deslocamento da zona de convecção profunda, associado ao aumento das precipitações intensas, favorece a liberação de calor latente na troposfera, que, por sua vez, atua como um dos principais mecanismos de intensificação e modulação da circulação atmosférica global (BERLATO; FONTANA, 2011; BERLATO et al., 2024).

A intensificação da Célula de Hadley, principal componente da circulação meridional da atmosfera, constitui outra característica marcante nesse contexto. O fortalecimento dessa célula resulta no aumento da intensidade dos Jatos Subtropicais em ambos os hemisférios, sendo esse efeito mais pronunciado no hemisfério que se encontra na estação de inverno, período em que esses ventos de altos níveis tendem a se intensificar natural-

mente devido ao maior gradiente térmico (BERLATO et al., 2024).

Os Jatos Subtropicais, por sua vez, desempenham um papel essencial ao atuarem como “guias de ondas”, funcionando como canais de propagação das anomalias atmosféricas, denominadas teleconexões. Por meio desse mecanismo, perturbações geradas nos trópicos podem se propagar por longas distâncias, modulando os padrões de circulação e precipitação em regiões extratropicais, mesmo a milhares de quilômetros da região de origem do fenômeno (BERLATO et al., 2024).

As ondas Kelvin, que se propagam para leste, e as ondas Rossby, que viajam para oeste, são mecanismos fundamentais pelos quais as variações dos ventos no Pacífico central modulam o conteúdo de calor oceânico, assim, controlam o início e a evolução dos eventos ENOS no Pacífico leste (BERLATO et al., 2024).

A La Niña corresponde à fase fria do fenômeno ENOS e é caracterizada pela ocorrência de anomalias negativas na TSM no Oceano Pacífico equatorial, indicando a presença de águas mais frias do que a média climatológica nessa região (BERLATO et al., 2024).

A La Niña representa o fortalecimento das condições oceânicas e atmosféricas consideradas Normais na região tropical do Oceano Pacífico, intensificando os padrões típicos de circulação. Durante esse fenômeno, os ventos alísios equatoriais tornam-se mais intensos que a média climatológica, transportando as águas superficiais mais quentes em direção ao Pacífico ocidental. Esse deslocamento favorece o afloramento de águas frias no setor leste do oceano, elevando águas subsuperficiais mais frias para a superfície (BERLATO; FONTANA, 2011; BERLATO et al., 2024).

Como resultado, a termoclina, camada que separa as águas quentes superficiais das águas frias profundas, torna-se mais inclinada, elevando-se no Pacífico leste e aprofundando-se no oeste devido ao acúmulo de águas quentes. Essa inclinação zonal é uma das principais características oceanográficas da fase fria do ENOS, com impactos relevantes na dinâmica térmica e biogeoquímica do oceano (BERLATO; FONTANA, 2011; BERLATO et al., 2024).

Na La Niña, a convecção, a nebulosidade e as chuvas se deslocam para o oeste, reforçando o gradiente térmico leste-oeste e intensificando a Circulação de Walker. Ao mesmo tempo, o resfriamento da troposfera no Pacífico equatorial enfraquece o gradiente térmico norte-sul e o Jato Subtropical, especialmente no inverno (BERLATO et al., 2024).

O fenômeno também está ligado à Oscilação Sul (OS), marcada por pressões mais altas no Taiti e mais baixas em Darwin, elevando o Índice de Oscilação Sul (IOS). Valores positivos do IOS indicam a fase fria do ENOS, com anomalias negativas na TSM do Pacífico equatorial (REBOITA et al., 2021; BERLATO et al., 2024).

O ENOS é o principal mecanismo de variabilidade climática interanual com efeitos globais (REBOITA et al., 2021; FENG; HAO, 2021; FERNANDES; GRIMM, 2022; ZHANG et al., 2023; REHBEIN; AMBRIZZI, 2023; FERNANDES; GRIMM, 2023). O RS localizado

no sudeste da América do Sul, é uma região fortemente influenciada pelas teleconexões do ENOS, que modulam significativamente seu regime de precipitação e temperatura, e, conseqüentemente, nos setores agrícolas e econômicos do estado (CAI et al., 2020; VALENTE et al., 2023; HU et al., 2023).

2.3.1 Impactos observados na Precipitação do RS durante eventos de ENOS

Durante eventos de El Niño na Região Sul do Brasil, é frequente o aumento dos volumes de precipitação, o que, por sua vez, resulta em eventos recorrentes de inundações e alagamentos (JÚNIOR et al., 2020; CAI et al., 2020; ALVES; PONTE, 2021; REHBEIN; AMBRIZZI, 2023; CRESPO; FONTANA; SCHIRMBECK, 2024). Em geral, os totais pluviométricos no estado situam-se acima da média climatológica durante esses períodos (GRIMM; FERRAZ; GOMES, 1998; DIAZ; STUDZINSKI; MECHOSO, 1998).

Esse comportamento é mais evidente no trimestre outubro–novembro–dezembro (OND), período de transição entre a primavera e o verão austral. (VALENTE et al., 2023; ARRUDA; CENTENO; NUNES, 2025). Tal padrão está diretamente associado à intensificação dos complexos convectivos de mesoescala e ao fortalecimento do jato subtropical, elementos que favorecem a formação e a persistência de sistemas meteorológicos responsáveis por eventos de chuva intensa (GRIMM; FERRAZ; GOMES, 1998; HU et al., 2023; PÁNTANO; PENALBA; IACOVONE, 2024).

A influência do fenômeno El Niño torna-se mais pronunciada durante os meses de primavera, período em que o fenômeno ENSO e os gradientes de temperatura entre as regiões polares e equatoriais se intensificam (HU et al., 2023; PÁNTANO; PENALBA; IACOVONE, 2024). Durante eventos de El Niño, observa-se um aumento significativo na frequência de eventos extremos de precipitação, que pode chegar a dobrar em amplas áreas da Região Sul do Brasil, destacando o RS (FERNANDES; GRIMM, 2022; MARTINEZ; SOLMAN, 2022; FERNANDES; GRIMM, 2023).

Durante os eventos de La Niña, é comum a ocorrência de condições climáticas mais secas, especialmente nas estações da primavera e do verão, propiciando temperaturas médias sazonais mais baixas no RS (VALENTE et al., 2023; CRESPO; FONTANA; SCHIRMBECK, 2024; ARRUDA; CENTENO; NUNES, 2025). Esse fenômeno está frequentemente associado à redução dos volumes de precipitação, o que favorece a ocorrência de episódios de seca em diversas áreas da região Sul do Brasil (JÚNIOR et al., 2020; VALENTE et al., 2023).

De modo característico, observa-se uma diminuição significativa das chuvas no período compreendido entre os meses de junho e fevereiro (VALENTE et al., 2023). Essa redução está relacionada à frequência de frentes frias, que atuam no escoamento da umidade atmosférica, agravando o quadro de deficit hídrico característico desses eventos, e podendo ser agravado pela fase positiva da Oscilação Antártica (AAO) (VALENTE et al., 2023; ARRUDA; CENTENO; NUNES, 2025).

Quando ocorrem anomalias negativas de TSM no Atlântico Sul, a redução na temperatura das águas oceânicas diminui a evaporação e, conseqüentemente, o transporte de umidade para o continente, favorecendo a ocorrência de secas (GOMES; CAVALCANTI; MÜLLER, 2024).

2.3.2 Impactos observados na Temperatura do RS durante eventos de ENOS

Durante eventos de El Niño, observa-se, na região sudeste da América do Sul (SESA), uma tendência de temperaturas do ar à superfície mais amenas ou até mesmo ligeiramente mais baixas. Esse comportamento está associado, em grande parte, ao aumento da nebulosidade e ao conseqüente impacto radiativo, que reduz a incidência de radiação solar direta, promovendo um resfriamento das temperaturas, especialmente em períodos mais chuvosos (GRIMM; FERRAZ; GOMES, 1998; CAI et al., 2020; HU et al., 2023).

No RS, há indícios de diminuição das temperaturas médias durante esses eventos. Esse fenômeno resulta, principalmente, da combinação entre as chuvas mais intensas, frequentemente acompanhadas pela advecção de ar quente proveniente do norte, e o resfriamento atmosférico decorrente da própria precipitação, associado ao aumento da nebulosidade diurna (MARTINEZ; SOLMAN, 2022; CRESPO; FONTANA; SCHIRMBECK, 2024). Como resultado, as anomalias de temperatura do ar tendem a apresentar amplitudes relativamente baixas, com variações pouco expressivas (CAI et al., 2020; PÁNTANO; PENALBA; IACOVONE, 2024).

Entretanto, uma exceção importante deve ser destacada. Nos meses de inverno, especificamente entre junho, julho e agosto, durante anos de El Niño, a intensificação do fluxo de ar quente advindo do norte, sem um aumento proporcional nas precipitações, pode ocasionar episódios de temperaturas anormalmente elevadas sobre a região subtropical, abrangendo também o território gaúcho (CAI et al., 2020).

Além disso, apesar da tendência geral de resfriamento associada ao El Niño, estudos apontam que, no RS, esse fenômeno pode provocar um aumento na temperatura atmosférica média, sobretudo durante a primavera, quando os efeitos de aquecimento se tornam mais expressivos (VALENTE et al., 2023).

Durante episódios de La Niña, um dos principais fatores que influenciam as condições térmicas no RS é o resfriamento das TSM no Oceano Atlântico (REHBEIN; AMBRIZZI, 2023). Esse fenômeno está geralmente associado à redução da umidade atmosférica e à diminuição da cobertura de nuvens sobre a região, o que favorece a maior incidência de radiação solar e, conseqüentemente, altera o regime térmico local (JÚNIOR et al., 2020).

Observa-se, de forma consistente, que as TSM no sudoeste do Atlântico apresentam valores mais baixos durante os períodos de La Niña. Esse resfriamento das águas oceânicas contribui diretamente para a redução da umidade disponível na atmosfera, inten-

sificando as condições de tempo seco e influenciando o comportamento das temperaturas na superfície terrestre. No RS, o verão apresenta temperaturas mais elevadas de superfície por ter maior incidência de radiação, enquanto no inverno apresenta temperaturas de superfície mais baixas devido a maior frequência de frios intensos (ARRUDA; CENTENO; NUNES, 2025).

2.4 Déficit de Pressão de Vapor (DPV)

A relevância da análise de variáveis climáticas locais, especialmente o DPV, é destacada pelo Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que aponta impactos adversos já observados da mudança climática sobre os sistemas naturais e humanos, com efeitos negativos na produtividade agrícola global. O relatório enfatiza que a intensificação de eventos extremos, como secas e ondas de calor, constitui um dos principais fatores de risco à segurança alimentar (IPCC, 2023).

Nesse cenário, o DPV destaca-se como um indicador fundamental do estresse atmosférico imposto às plantas, pois valores elevados aumentam a demanda evaporativa da atmosfera, intensificando o estresse hídrico vegetal e reduzindo a produtividade das culturas. Assim, a análise do DPV permite integrar os efeitos da temperatura e da umidade do ar sobre a produção agrícola, reforçando a importância de estudos regionais que investiguem sua variabilidade e impactos (IPCC, 2023; LEE et al., 2024).

Sabe-se que água é um elemento fundamental para a manutenção da vida no planeta, e seu manejo eficiente, aliado à conservação desta no solo, configura-se como um dos grandes desafios contemporâneos para a preservação desse recurso, cuja sua disponibilidade está diretamente vinculada à produtividade agrícola (MISHRA, 2023).

A água se constitui como um dos principais fatores limitantes para a obtenção de elevadas produtividades na agricultura, visto que sua disponibilidade influencia diretamente os processos fisiológicos e o desenvolvimento das culturas. O cálculo preciso das necessidades hídricas torna-se imprescindível para o manejo eficiente da água em sistemas agrícolas, que é fundamental para a estimativa da demanda hídrica das plantas (SANTOS et al., 2023).

O déficit hídrico é um fenômeno recorrente no RS e representam um dos principais fatores adversos à produção agropecuária, causando quedas expressivas na produtividade, especialmente em culturas que dependem de precipitação regular. A agricultura, atividade econômica central no sudeste da América do Sul, incluindo o Rio Grande do Sul, é altamente vulnerável à variabilidade climática e a eventos extremos como secas prolongadas e inundações, que provocam impactos severos nos sistemas produtivos e perdas econômicas significativas (CRESPO; FONTANA; SCHIRMBECK, 2024).

No campo da meteorologia, a evaporação é compreendida como o processo que se refere à passagem de água do ambiente terrestre para a atmosfera, na forma de vapor. Esse fenômeno engloba a evaporação observada em superfícies naturais, como solos úmi-

dos desprovidos de vegetação, oceanos, lagos, demais corpos d'água e a sublimação em áreas cobertas por gelo, constituindo um dos principais mecanismos do ciclo hidrológico. Além disso, parte da água disponibilizada para atmosfera é proveniente da transpiração das plantas (CAMPBELL; NORMAN, 1998).

Onde o aumento global do DPV está relacionado à redução da produtividade das plantas e do rendimento de culturas em regiões agrícolas estratégicas, devido à limitação da fotossíntese provocada pela diminuição da condutância estomática sob condições de elevada demanda evaporativa. Altos valores de DPV causam grandes evaporações na folha, o que faz com que a planta feche os estômatos para evitar perda excessiva de água, mas com esse fechamento se tem redução da fotossíntese, devido a redução da assimilação de CO_2 (LÓPEZ; WAY; SADOK, 2021).

Nesse contexto, o DPV é uma variável meteorológica que representa um indicador para quantificar a escassez de vapor d'água na atmosfera. É definido como a diferença entre a pressão de vapor de saturação (e_s) e a pressão de vapor real (e_a), esse parâmetro é amplamente reconhecido como um indicador do 'poder de secagem' do ar em estudos ecofisiológicos e, mensura a força de sucção exercida pelo ar sobre a água disponível em superfícies e folhas (CAMPBELL; NORMAN, 1998; GREEN et al., 2017; MONTEITH; UNSWORTH, 2013).

O fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera envolve a transformação da água líquida em vapor no interior das folhas, processo que ocorre em resposta ao gradiente de pressão de vapor. Esse vapor é então transportado para a atmosfera por meio da convecção turbulenta. A evaporação da água na superfície terrestre assume relevância física e biológica significativa, uma vez que desempenha papel essencial tanto no transporte global de calor quanto na manutenção do reservatório atmosférico de vapor d'água (CAMPBELL; NORMAN, 1998; MONTEITH; UNSWORTH, 2013).

O valor de e_s depende exclusivamente da temperatura do ar, enquanto e_a está associado ao conteúdo real de vapor d'água no ar, temperatura do ponto de orvalho. Dessa forma, o DPV exerce influência direta sobre processos fisiológicos, desempenhando papel crucial na regulação da transpiração e, consequentemente, na determinação das taxas relativas de crescimento das plantas (CAMPBELL; NORMAN, 1998; MONTEITH; UNSWORTH, 2013).

Dessa forma o DPV é representado como uma medida direta da força de secamento da atmosfera, e o aumento da temperatura global eleva a pressão de vapor de saturação, resultando em um incremento significativo do DPV (GROSSIORD et al., 2020).

Para os mecanismos fisiológicos, valores elevados de DPV indicam maior demanda evaporativa da atmosfera (MONTEITH; UNSWORTH, 2013). Essa condição afeta diretamente a transpiração, sob DPV alto, as plantas tendem a reduzir a condutância estomática para evitar perdas excessivas de água (KIBLER et al., 2023).

O fechamento dos estômatos embora seja uma estratégia protetora, restringe tam-

bém a entrada de dióxido de carbono (CO_2), o que acaba diminuindo a taxa fotossintética, a produção de biomassa e, conseqüentemente, o rendimento, especialmente em fases críticas como floração e enchimento de grãos (PINTO et al., 2010). E quando combinados com baixa disponibilidade hídrica no solo, valores elevados de DPV intensificam o risco de cavitação e de falhas no transporte de água pelo xilema (NAUDTS et al., 2015).

O DPV afeta limiares práticos, com variações conforme a cultura, fase fenológica, disponibilidade hídrica e adaptação local. Para DPV menores ou aproximados a valores de 0,3 a 0,5 kPa se tem a atmosfera muito úmida e os estômatos geralmente abertos, proporciona ambientes para maior suscetibilidade a doenças fúngicas. Se tem uma faixa de baixo estresse hídrico, mas com riscos sanitários elevados (GROSSIORD et al., 2020).

Entre valores, para DPV, de 0,5 a 1,5 kPa se caracteriza uma faixa confortável para muitas culturas, destacando as C_3 , como trigo e arroz, onde há bom equilíbrio entre trocas gasosas e perda de água, favorecendo eficiência fisiológica (PASQUALOTTO et al., 2021).

Valores para DPV de 1,5 até 2,5 kPa dá-se início ao estresse atmosférico, onde ocorre o fechamento estomático mais pronunciado, reduzindo a assimilação de CO_2 e conseqüentemente limitando o crescimento (DEVI; SINCLAIR; TALIERCIO, 2015; GROSSIORD et al., 2020).

Para DPV com valores acima de 2,5 kPa, a planta tende a entrar em estresse forte e sustentado, provável queda no rendimento, especialmente em culturas de sequeiro, se o estado persistir (GOUFO et al., 2017; PASQUALOTTO et al., 2021).

A soja de sequeiro é muito sensível a DPV alto, nas fases de floração e enchimento de grãos, o que pode acarretar perdas de rendimento grandes. Em genótipos de soja com enrolamento lento (slow-wilting), que ocorre o enrolamento parcial das folhas, ao qual a taxa de transpiração se estabiliza ou diminui, quando o DPV ultrapassa cerca de 2 kPa, demonstrando um mecanismo fisiológico de adaptação que mitiga perdas sob alta demanda evaporativa (DEVI; SINCLAIR; TALIERCIO, 2015).

O trigo no inverno tem sensibilidade diferente, geadas e falta de água na emergência são críticas. O DPV afeta principalmente maturação e a qualidade dos grãos se associado à seca. Exposições a DPV elevado, a cerca de 2,27 kPa, além de configurar condições de estresse hídrico, reduz significativamente a fotossíntese, condutância estomática e expressão de enzimas chave (Rubisco – ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase) (FAKHET et al., 2021).

Já o arroz irrigado tem menor sensibilidade direta ao DPV porque a irrigação limita o déficit hídrico no solo, porém quando DPV é elevado, pode alterar o consumo hídrico da planta, saúde do dossel, além de interagir com eventos de excesso hídrico, como enchentes, que alteram o calendário e área colhida, pela influência no calendário de plantio (LÓPEZ; WAY; SADOK, 2021). Valores de DPV acima de aproximadamente 2,5 kPa faz com que o estresse se intensifique, com evidências de que crescimento e produtividade são substancialmente prejudicados em condições de alta DPV, por meio de limitações fo-

tossintéticas induzidas pela queda da condutância estomática (OHSUMI et al., 2008).

É importante destacar que, ainda que o DPV seja um bom indicador da demanda atmosférica, ele não substitui a medição da umidade do solo. Seu impacto real sobre o rendimento surge quando elevada demanda evaporativa, DPV alto, coincide com deficiência hídrica ou com fases fenológicas sensíveis das plantas, cenário em que a limitação conjunta de oferta do solo e demanda da atmosfera cria forte estresse fisiológico (NOVICK et al., 2024).

A integração entre DPV e ENOS permite evidenciar como processos globais modulam o estresse hídrico regional, fornecendo uma explicação mais consistente para as variações produtivas no RS (GROSSIORD et al., 2020).

2.5 Reanálises atmosféricas

As reanálises atmosféricas consistem na reconstrução histórica do estado da atmosfera a partir da combinação entre observações meteorológicas e modelos numéricos, integradas por técnicas de assimilação de dados (KALNAY et al., 1996). Esse procedimento permite incorporar, em um mesmo esqueleto físico e dinâmico, informações provenientes de diferentes fontes (como estações de superfície, radiossondagens, aeronaves e satélites), resultando em campos meteorológicos fisicamente consistentes e comparáveis por períodos longos. Por esse motivo, reanálises são amplamente empregadas em diagnósticos climáticos e ambientais, especialmente quando o objetivo envolve séries de múltiplas décadas e a análise integrada de variáveis atmosféricas, atualmente ampliadas pela extensão retrospectiva temporal do ERA5 até 1950 (KALNAY et al., 1996; PARKER, 2016; SIMMONS et al., 2017) (BELL et al., 2021).

Uma das principais vantagens desses produtos é a disponibilidade de variáveis meteorológicas em formato de grade espacial (gridded data), com cobertura contínua no espaço e no tempo, o que permite análises regionalizadas mesmo em áreas onde a rede observacional é limitada, irregular ou apresenta lacunas temporais. Essa característica é particularmente relevante para estudos climáticos, pois favorece a caracterização de gradientes espaciais e a obtenção de estatísticas consistentes para regiões extensas, reduzindo limitações inerentes ao uso exclusivo de registros pontuais (TRENBERTH; FASULLO; MACKARO, 2011; LORENZ; KUNSTMANN, 2012).

Entre as reanálises modernas, destaca-se o avanço representado por conjuntos globais de alta resolução espacial e frequência temporal, como o ERA5, que fornece um retrato integrado da atmosfera e da superfície com elevada coerência físico-temporal. Produtos derivados voltados à superfície terrestre, como o ERA5-Land, ampliam essa capacidade ao disponibilizar variáveis relevantes para aplicações hidrológicas e agrometeorológicas, consolidando o uso dessas bases em estudos climáticos e ambientais contemporâneos (HERSBACH et al., 2020; MUÑOZ-SABATER et al., 2021).

Em aplicações regionais no RS, a necessidade de dados espacialmente contínuos

é reforçada pela heterogeneidade fisiográfica e climática que condiciona a variabilidade intraestadual de temperatura, umidade e precipitação. A climatologia do Sul do Brasil evidencia forte influência de sistemas frontais, gradientes latitudinais e variabilidade interanual associada a modos de variabilidade climática, resultando em padrões espaciais complexos que exigem bases de dados capazes de representar adequadamente a variabilidade regional (REBOITA et al., 2010; GRIMM, 2011).

Nesse contexto, análises baseadas exclusivamente em séries pontuais podem não capturar de forma adequada padrões climáticos em escala mesorregional, sobretudo em regiões com limitações de densidade observacional e lacunas temporais nas séries meteorológicas. Estudos demonstram que o uso de dados meteorológicos em grade contribui para superar essas limitações, permitindo análises espaciais mais consistentes e comparáveis em áreas extensas, o que reforça o papel das reanálises como base metodológica para investigações climáticas regionais (XAVIER; KING; SCANLON, 2016; BECK et al., 2019; HERSBACH et al., 2020).

Reanálises são particularmente relevantes em agrometeorologia por disponibilizarem campos meteorológicos em grade com coerência física entre variáveis, permitindo análises integradas do sistema solo-planta-atmosfera e do balanço hídrico em múltiplas escalas. Essa consistência é essencial quando se trabalha com variáveis acopladas (temperatura, umidade, precipitação) e seus efeitos sobre processos ecofisiológicos (ALLEN et al., 1998; MONTEITH; UNSWORTH, 2013; HERSBACH et al., 2020; LONGO-MINNOLO et al., 2022).

A produtividade agrícola responde a controles termodinâmicos e hidrológicos e, frequentemente, a indicadores derivados (por exemplo, evapotranspiração de referência e métricas de demanda evaporativa), cuja estimativa depende de séries contínuas e compatibilidade entre variáveis. Por isso, ERA5/ERA5-Land e produtos correlatos são amplamente empregados em aplicações agrícolas e de manejo hídrico, desde que seu desempenho seja avaliado regionalmente (MUÑOZ-SABATER et al., 2021; VANELLA et al., 2022; LONGO-MINNOLO et al., 2022).

Entre os indicadores de demanda evaporativa, destaca-se o DPV, que expressa a demanda atmosférica por água e depende diretamente das condições termodinâmicas próximas à superfície, especialmente temperatura do ar e umidade. Por apresentar elevada variabilidade espaço-temporal, o DPV é sensível à resolução dos dados meteorológicos e às condições regionais, sendo favorecido pelo uso de bases em grade com alta frequência temporal, capazes de representar o ciclo diurno e diferenças espaciais em escala regional. Nesse contexto, reanálises modernas oferecem suporte metodológico consistente para avaliar padrões regionais do DPV e sua relação com a produtividade agrícola (NOVICK et al., 2016; YUAN et al., 2019; HERSBACH et al., 2020; MUÑOZ-SABATER et al., 2021).

Embora as reanálises forneçam séries meteorológicas espacialmente contínuas e fisicamente consistentes, elas não substituem as observações de superfície, pois per-

manecem sujeitas a incertezas relacionadas à resolução espacial, à representação dos processos físicos e aos métodos de assimilação utilizados para estimar as variáveis atmosféricas. Por esse motivo, a aplicação desses produtos em estudos regionais deve ser acompanhada por procedimentos de validação frente a dados observacionais, com a quantificação sistemática de viés e desempenho por meio de métricas estatísticas apropriadas (BECK et al., 2019; HERSBACH et al., 2020).

Essa etapa é especialmente importante em aplicações agrometeorológicas, nas quais pequenos desvios em temperatura e umidade podem se propagar e afetar diretamente variáveis derivadas e diagnósticos de estresse atmosférico, como evapotranspiração e DPV. Dessa forma, a utilização operacional de reanálises em análises hidroclimáticas e agrícolas está condicionada à realização de avaliações regionais prévias (MUÑOZ-SABATER et al., 2021; VANELLA et al., 2022).

Dessa forma, reanálises atmosféricas devem ser compreendidas como fontes complementares às observações meteorológicas, fornecendo a continuidade espacial e temporal necessária para análises em escala mesorregional. Essa característica sustenta sua adoção em estudos que exigem séries longas e espacialização consistente no RS, ao mesmo tempo em que reforça a importância da seleção de produtos adequados ao objetivo e da realização de validação regional prévia antes da interpretação de padrões climáticos e agroclimáticos (HERSBACH et al., 2020; ALMEIDA; COELHO, 2023).

As reanálises mais recentes do ECMWF representam avanços significativos em relação a gerações anteriores, como o ERA-Interim, com melhorias na assimilação de dados, resolução espacial e consistência entre variáveis atmosféricas (DEE et al., 2011; HERSBACH et al., 2020).

Nesse contexto, destaca-se a consolidação do ERA5 e de seus derivados terrestres, como o ERA5-Land, como referência metodológica atual em aplicações climáticas e de superfície, especialmente em estudos que demandam maior detalhamento espacial e representação aprimorada de processos de superfície (MUÑOZ-SABATER et al., 2021; SAKHRAOUI; ARRA; ŞİŞMAN, 2025).

2.6 Fenologia e desenvolvimento radicular de arroz, soja e trigo no RS

A resposta das culturas agrícolas à variabilidade climática resulta da interação entre fenologia, arquitetura do sistema radicular e condições atmosféricas, especialmente temperatura do ar e DPV. A demanda evaporativa atmosférica, associada a T_{2m} e DPV, interage com a disponibilidade hídrica do solo, condicionada pela precipitação e pela dinâmica de umidade no perfil, determinando o grau de estresse experimentado pelas plantas ao longo do ciclo. Como a sensibilidade ao estresse hídrico e térmico não é homogênea entre estádios, a definição de janelas críticas de desenvolvimento é fundamental para interpretar como anomalias climáticas se traduzem em variações de rendimento no RS (ALLEN et al., 1998; LOBELL; FIELD, 2007; HATFIELD et al., 2011; WASSON et al., 2012; UGA et

al., 2013; COMAS et al., 2013; LÓPEZ; WAY; SADOK, 2021).

De modo geral, traços radiculares como profundidade efetiva, densidade e comprimento radicular em profundidade, condutividade hidráulica e características anatômicas modulam a capacidade de extração de água sob alta demanda atmosférica. Assim, o desenvolvimento espacial e temporal do sistema radicular condiciona a exposição efetiva das culturas ao déficit hídrico, especialmente durante fases associadas à definição e ao enchimento de grãos (WASSON et al., 2012; UGA et al., 2013; COMAS et al., 2013).

O arroz irrigado cultivado em terras baixas apresenta ciclo de aproximadamente 100 a 140 dias, compreendendo emergência, perfilhamento, alongamento do colmo, floração, enchimento de grãos e maturação. Em sistemas subtropicais irrigados, o manejo hídrico garante saturação do solo durante grande parte do ciclo, impondo condições hipóxicas ao sistema radicular (JUNIOR; GOMES; SANTOS, 2004; LIN et al., 2022).

O sistema radicular é composto por raízes seminais, nodais e adventícias, sendo estas últimas fundamentais sob inundação. A formação de aerênquima cortical e de barreiras à perda radial de oxigênio permite a difusão longitudinal de oxigênio da parte aérea às raízes, assegurando atividade metabólica em ambientes anóxicos. Raízes adventícias aquáticas complementam a exploração das camadas superficiais e da lâmina de água, aumentando a resiliência a flutuações do lençol freático (PANDA; BARIK, 2021; TONG et al., 2023).

Apesar do controle hídrico, as fases de floração e enchimento de grãos permanecem altamente sensíveis a estresses térmicos e atmosféricos. Valores elevados de temperatura e DPV intensificam a transpiração, reduzem a condutância estomática e comprometem a fertilidade das espiguetas, afetando o número de grãos cheios. Por outro lado, DPV muito baixo e alta umidade relativa favorecem doenças fúngicas de panícula. Assim, a integração entre fenologia, traços radiculares e variáveis como T_{2m} , $T_{d,2m}$, DPV e umidade do solo é particularmente relevante nas fases de alongamento, floração e enchimento (JUNIOR; GOMES; SANTOS, 2004; PANDA; BARIK, 2021).

A soja apresenta ciclo médio entre 100 e 130 dias, organizado em estádios vegetativos (V) e reprodutivos (R). As fases R1–R2 (início da floração), R3–R4 (formação de vagens) e R5–R6 (enchimento de grãos) são reconhecidas como críticas para definição dos componentes de rendimento (HOSSAIN et al., 2024) (THENVEETIL et al., 2025).

O sistema radicular é dominado por raiz pivotante com ramificações laterais que exploram tanto camadas superficiais quanto mais profundas. Arquiteturas mais profundas e ramificadas aumentam a capacidade de extração de água e a manutenção da condutância estomática sob seca. Alterações na via fenilpropanóide e no sistema vascular raiz–parte aérea tem sido associadas à maior tolerância ao déficit hídrico, contribuindo para manutenção do status hídrico foliar e da assimilação de carbono (XIONG et al., 2021; COUTINHO et al., 2023).

Quando o déficit hídrico ocorre durante R3–R6, especialmente sob DPV elevado,

observa-se redução da fotossíntese, abortamento de flores e vagens e menor massa de sementes. Mesmo veranicos relativamente curtos podem causar perdas expressivas. Dessa forma, a caracterização integrada de $T_{2\ m}$, $T_{d,2\ m}$, DPV, precipitação e umidade do solo nos estádios reprodutivos é essencial para explicar variações interanuais de rendimento em sistemas de sequeiro (HOSSAIN et al., 2024; THENVEETIL et al., 2025).

O trigo de inverno apresenta ciclo aproximado de 120 a 140 dias, com desenvolvimento descrito pela escala de Zadoks, abrangendo germinação, afilhamento, alongamento do colmo, espigamento, florescimento e enchimento de grãos. A fase de afilhamento define o número potencial de espigas, enquanto espigamento–florescimento e enchimento de grãos são altamente sensíveis a estresses térmicos e hídricos (HOBSON et al., 2023; ODONE; CHANGDAR; THORUP-KRISTENSEN, 2025).

A maior parte da biomassa radicular concentra-se nos primeiros 30–40 cm do solo; contudo, raízes mais profundas desempenham papel decisivo na captação de água e nitrogênio em anos secos. A interação entre tipo de solo, estrutura física e desenvolvimento radicular condiciona a capacidade da cultura em acessar água em profundidade e sustentar o funcionamento fisiológico durante fases de alta demanda hídrica (WASSON et al., 2012; HOBSON et al., 2023).

Durante o enchimento de grãos, a combinação de baixa umidade do solo e DPV elevado intensifica a transpiração e limita o transporte de assimilados, reduzindo a massa de mil grãos. Em contraste, alta umidade relativa e DPV baixo durante espigamento e florescimento aumentam o risco de doenças de espiga, como giberela, comprometendo rendimento e qualidade. A definição de janelas críticas permite avaliar com maior precisão o impacto de anomalias de $T_{2\ m}$, $T_{d,2\ m}$, DPV e precipitação sobre a produtividade (HOBSON et al., 2023; ODONE; CHANGDAR; THORUP-KRISTENSEN, 2025) .

3 METODOLOGIA

O presente estudo busca compreender o impacto de fenômenos climáticos na agricultura do RS, com foco nas safras de arroz, soja e trigo entre 1974 e 2024. Também são analisados os efeitos da variação na disponibilidade hídrica sobre a produção, a partir de observações meteorológicas de 1970 até o presente. Além disso, serão realizados comparativos, permitindo avaliar a variabilidade histórica de mudanças climáticas na produtividade das culturas analisadas. Para tanto, são utilizados dados oceanográficos, registros meteorológicos obtidos nas estações do INMET no RS e dados de reanálise do ERA5 e ERA5-Land.

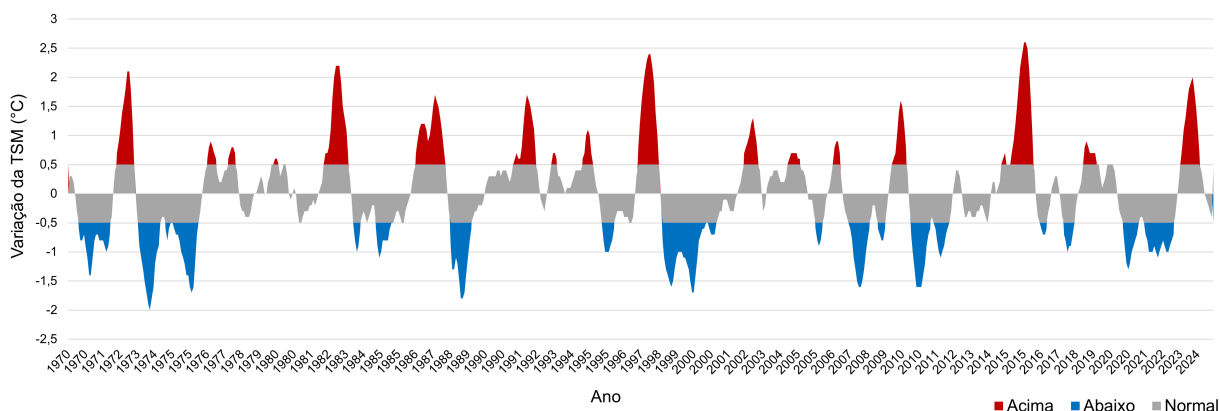
3.1 Classificação dos eventos de ENOS

A identificação das fases do ENOS foi realizada a partir do Oceanic Niño Index (ONI), disponibilizado pelo Climate Prediction Center da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) (NOAA, Climate Prediction Center (CPC), 2025). Esse índice foi selecionado por fornecer uma série temporal contínua e atualizada das anomalias de TSM na região Niño 3.4, utilizada internacionalmente como referência para a definição de episódios de El Niño e La Niña (PÁNTANO; PENALBA; IACOVONE, 2024; NOAA, Climate Prediction Center (CPC), 2025).

A classificação de El Niño é relacionada a anomalias com temperaturas iguais ou acima a $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a La Niña relacionada com as anomalias de temperatura iguais ou abaixo a $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, observadas em médias móveis trimestrais persistentes, usualmente são caracterizados por pelo menos cinco trimestres consecutivos; e anos fora desses critérios foram definidos como Neutros (NOAA, Climate Prediction Center (CPC), 2025).

Com base nesses critérios, a Fig. 2 apresenta a série histórica de anomalias de TSM no período de 1970 a 2024, destacando os episódios com anomalias com características de El Niño em vermelho, La Niña em azul e a faixa neutra em cinza. A visualização permite compreender de maneira clara a variabilidade interanual associada ao ENOS e sua relevância para estudos climáticos no RS.

Figura 2 – Anomalias de TSM entre 1970 e 2024, com características de fases do ENOS.



Fonte: Adaptado de NOAA (2025).

3.2 Dados observacionais e de reanálise meteorológica

3.2.1 Produtividade agrícola do RS

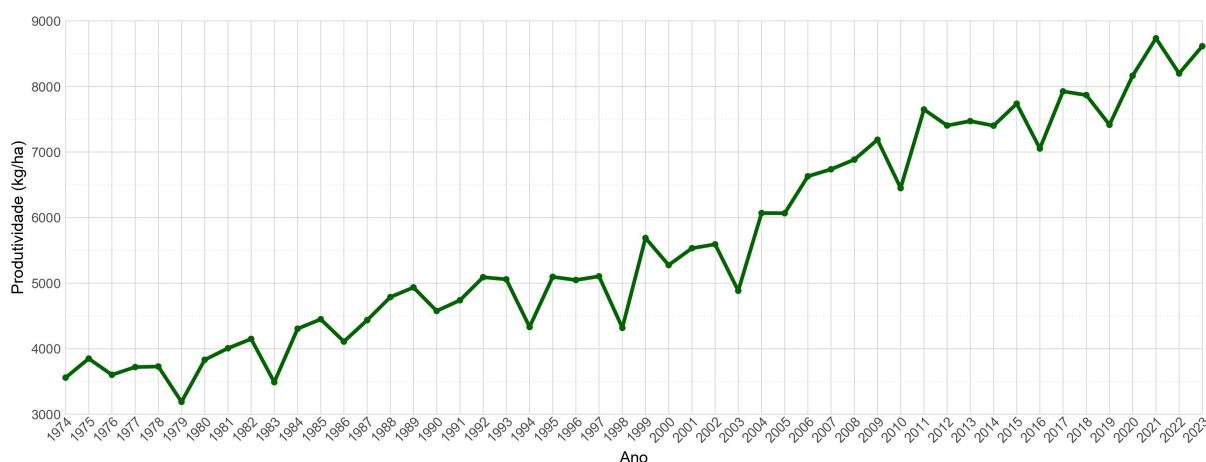
Os períodos de cultivo considerados na análise foram definidos a partir das recomendações estabelecidas pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) vigente para o estado do RS (MAPA, 2023). Esse zoneamento orienta as janelas de semeadura mais adequadas para cada cultura, considerando as condições climáticas regionais e os ciclos das cultivares.

Os dados utilizados para o rendimento agrícola serão as séries históricas de rendimento médio anual (kg ha^{-1}), para as culturas de arroz, soja e trigo foram obtidas na base de dados da Fundação de Economia e Estatística Siegfried Emanuel Heuser (FEE). Esses registros de dados podem se enquadrar com agrupamentos de valores médios estaduais, utilizados para análises comparativas com o ENOS, e como valores por mesorregião, empregados nas correlações com variáveis meteorológicas.

Para o arroz irrigado em ambiente subtropical, a semeadura é recomendada entre 1º de setembro e 31 de dezembro. O ciclo das cultivares pode variar significativamente, abrangendo desde aproximadamente 105 dias até mais de 136 dias até a maturação fisiológica, dependendo do grupo de cultivares utilizado (MAPA, 2023).

A evolução histórica do rendimento do arroz irrigado no RS, apresentada na Fig. 3, evidencia os avanços obtidos entre 1974 e 2023. Observa-se uma tendência consistente de aumento nos rendimentos médios, reflexo direto da incorporação de tecnologias de manejo, do avanço no melhoramento genético das cultivares, que gerou ganhos de produtividade em arroz irrigado de clima temperado (MARTÍNEZ et al., 2014).

Figura 3 – Produtividade média do arroz no RS de 1974 a 2023, com tendência de crescimento ao longo do período e variações interanuais.



Fonte: Adaptado de FEE (2025).

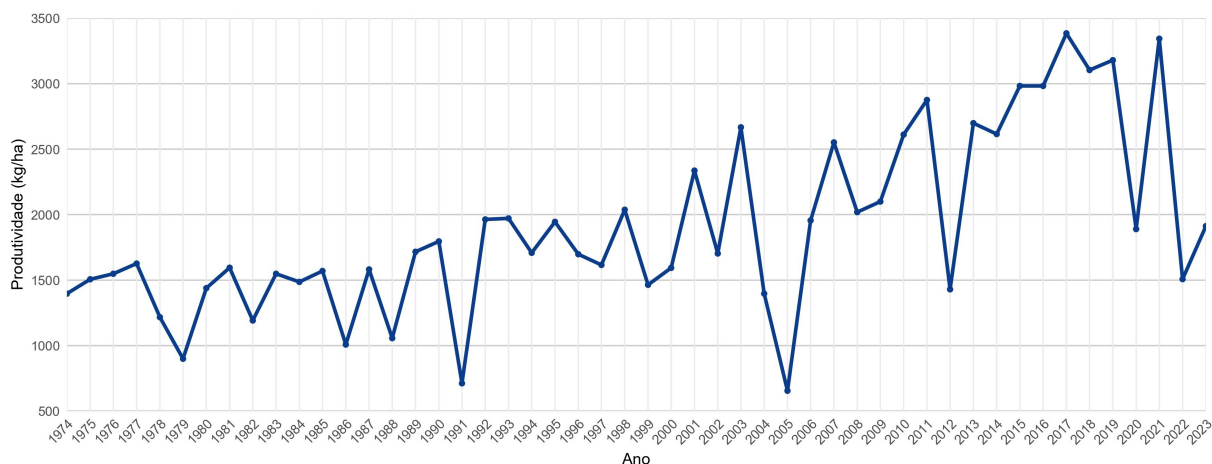
A soja, por sua vez, apresenta janela de semeadura entre 25 de setembro e 31 de dezembro, no RS. A duração do ciclo é influenciada pelo grupo de maturidade relativa e pelo desenvolvimento fenológico da cultivar, situando-se geralmente entre 100 e 130 dias desde a emergência até a maturação (MAPA, 2023).

Apesar das oscilações interanuais observadas na produtividade da soja no RS de 1974 a 2023, apresentada na Fig. 4, geralmente causadas por condições climáticas adversas, especialmente estiagens que afetam o enchimento de grãos, é possível identificar uma tendência de crescimento ao longo do tempo. Esse avanço está relacionado a fatores como o desenvolvimento tecnológico, os avanços genéticos, a expansão da cultura para diferentes regiões e o aprimoramento das práticas de manejo adotadas pelos produtores (SILVA et al., 2022).

Já o trigo possui janela de semeadura recomendada entre 1º de maio e 31 de agosto. O ciclo dessa cultura apresenta variação entre 120 e 140 dias, dependendo tanto da cultivar adotada quanto da região homogênea de adaptação dentro do estado (MAPA, 2023).

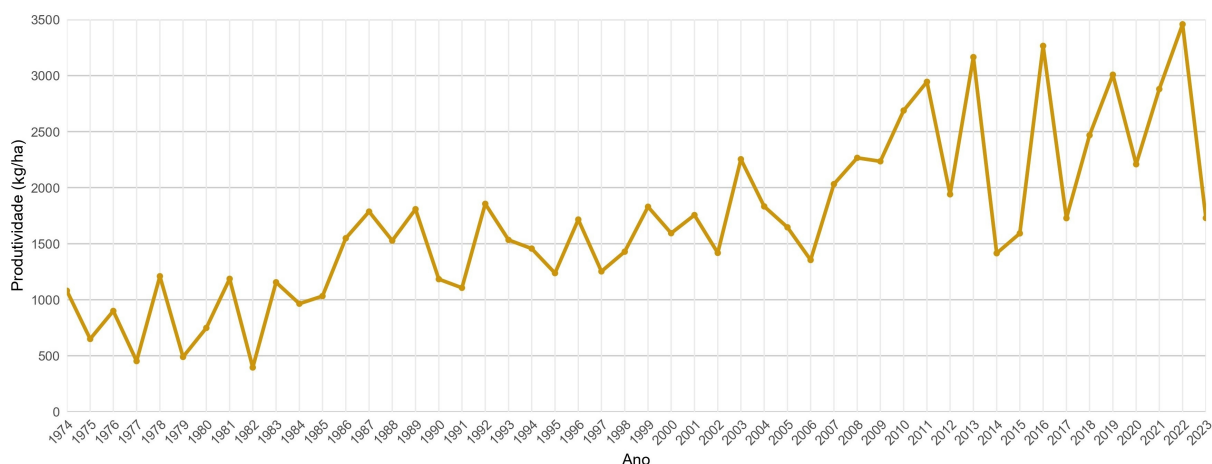
De 1974 até 2023, como mostra na Fig. 5, a produtividade do trigo no RS apresentou uma tendência de crescimento, apesar da expressiva variabilidade interanual associada a condições climáticas adversas em períodos fenológicos críticos da cultura. Esse avanço é atribuído, sobretudo, ao desenvolvimento de cultivares geneticamente adaptadas às condições edafoclimáticas do sul do Brasil e à incorporação de práticas de manejo mais eficientes, fatores que contribuíram de forma significativa para o aumento do potencial produtivo e para a maior estabilidade da triticultura no estado (FEDERIZZI et al., 1999; SCHEEREN et al., 2012).

Figura 4 – Produtividade média da soja no RS de 1974 a 2023, evidenciando crescimento ao longo do período e forte variabilidade interanual.



Fonte: Adaptado de FEE (2025).

Figura 5 – Produtividade do trigo no RS de 1974 a 2023, evidenciando flutuações ao longo dos anos.



Fonte: Adaptado de FEE (2025).

3.2.1.1 Estimativa dos Desvios de produtividade no RS

A Fig. 6 apresenta a evolução temporal da produtividade das culturas de soja, trigo e arroz na mesorregião Sudeste do Rio Grande do Sul, no período de 1976 a 2024. Nos painéis superiores, os pontos azuis representam a produtividade anual de cada cultura, em kg ha^{-1} , enquanto a linha tracejada vermelha corresponde à tendência linear ajustada à série temporal. Essa tendência sintetiza o crescimento médio da produtividade ao

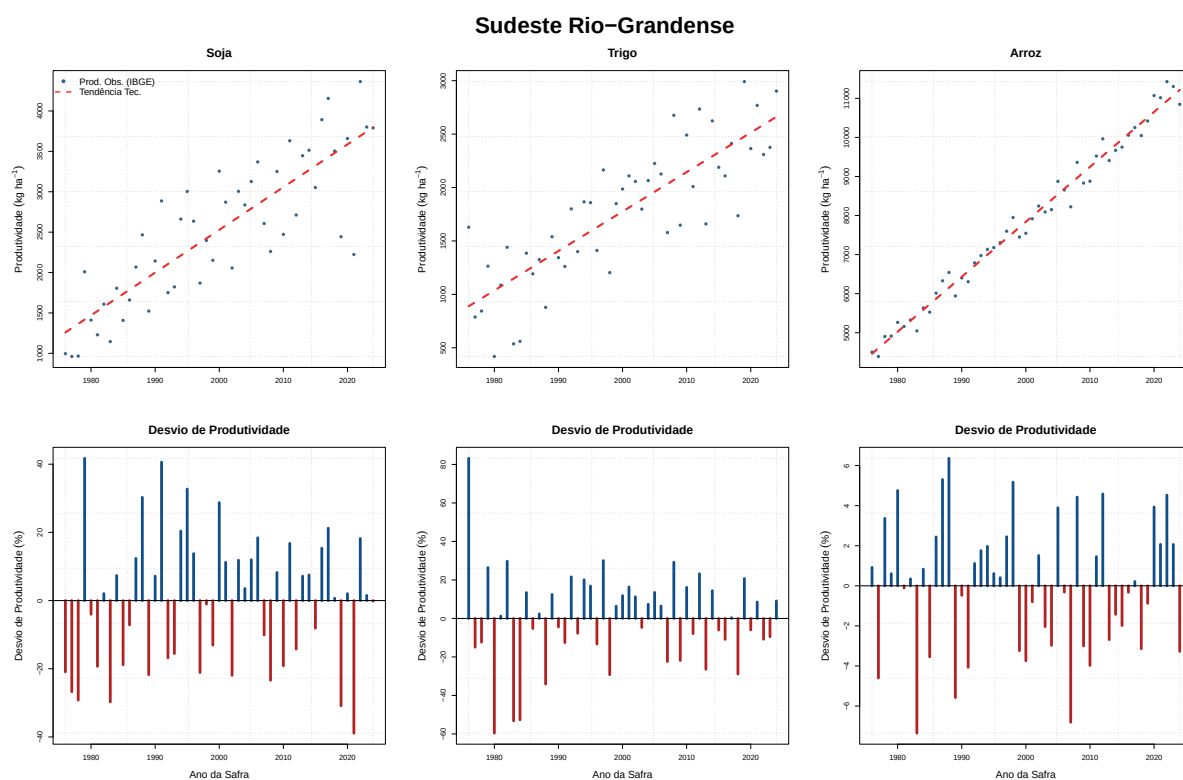
longo das décadas, refletindo o efeito acumulado de avanços tecnológicos, melhoramento genético e aperfeiçoamento das técnicas de manejo.

Observa-se, para as três culturas, uma trajetória geral de aumento da produtividade ao longo do período analisado, embora com magnitudes e dispersões distintas entre as séries. A inclinação positiva da reta ajustada indica que, apesar da variabilidade interanual, houve incremento progressivo do rendimento agrícola na mesorregião. Esse comportamento é compatível com a modernização dos sistemas produtivos e com a incorporação gradual de inovações agronômicas nas diferentes cadeias agrícolas.

Nos painéis inferiores são apresentados os desvios percentuais de produtividade em relação à tendência linear, permitindo avaliar a variabilidade residual das safras após a remoção do componente temporal de longo prazo. Cada barra representa o desvio percentual da produtividade anual em relação ao valor estimado pela tendência para o respectivo ano, de modo que valores positivos indicam safras acima do esperado e valores negativos indicam desempenho inferior ao esperado.

A análise desses desvios evidencia diferenças no comportamento interanual entre as culturas. A soja e o trigo apresentam oscilações residuais mais pronunciadas, com maior frequência de desvios negativos e positivos de maior magnitude, sugerindo maior sensibilidade às condições ambientais e meteorológicas de cada safra. O arroz, por sua vez, apresenta desvios percentuais mais concentrados em torno de zero e menor dispersão relativa, indicando maior estabilidade produtiva ao longo da série. Esse padrão é coerente com a diferença entre sistemas de cultivo, uma vez que culturas de sequeiro tendem a responder mais intensamente à variabilidade hidroclimática, enquanto o arroz irrigado apresenta maior capacidade de amortecimento frente às flutuações ambientais.

Figura 6 – Evolução temporal da produtividade e desvios percentuais para arroz, soja e trigo no Sudeste Rio-Grandense.



Evolução temporal da produtividade nos painéis superiores e desvios percentuais nos painéis inferiores, para as culturas de arroz, soja e trigo na mesorregião Sudeste do RS, conforme indicado no título de cada painel. Os pontos azuis nos painéis superiores representam a produtividade em kg ha⁻¹ em cada ano entre 1976 e 2024. A linha tracejada vermelha é a tendência obtida através do ajuste linear ao pontos, e representa a variação da produtividade devido aos avanços tecnológicos e técnicas modernas de produção. Nos painéis inferiores cada barra representa o desvio percentual de cada safra anual, obtido a partir da tendência média das safras ao longo dos anos. Fonte: Autor (2026).

É importante destacar que os desvios das safras, obtidos a partir da tendência média de produção, foram realizados para todas as demais mesorregiões e estão apresentados no Apêndice B.

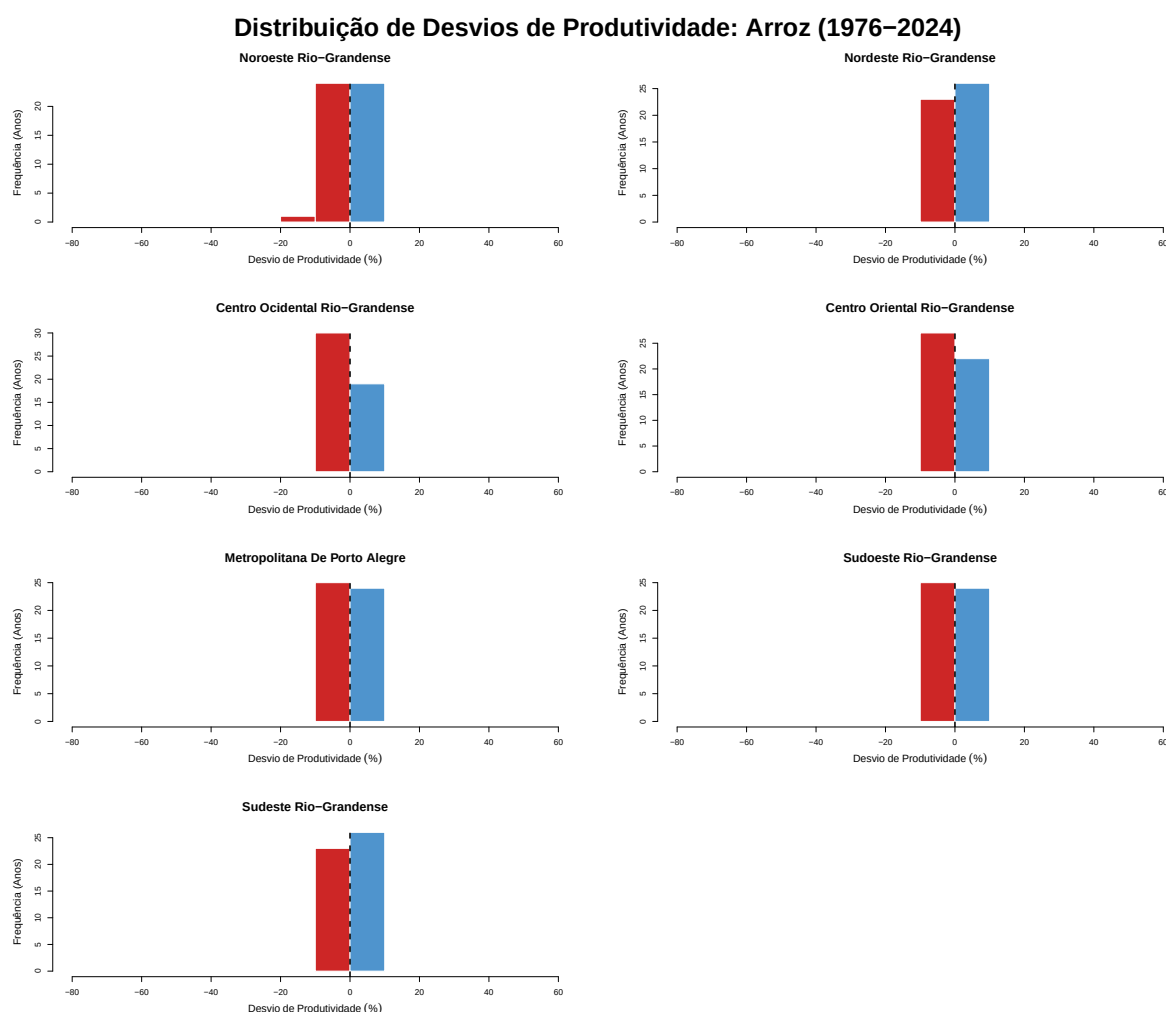
A partir da determinação dos desvios percentuais das safras, e assumindo que eles são majoritariamente modulados pela variabilidade climática interanual, torna-se possível identificar os impactos do clima ao longo das últimas décadas, bem como avaliar se sua influência foi predominantemente positiva ou negativa sobre a produtividade. A Fig. 7 mostra que os desvios na produtividade das safras de arroz concentram-se, em geral, em torno de aproximadamente 10%, para mais ou para menos, em todas as mesorregiões analisadas. Esse comportamento indica que, embora existam flutuações anuais associadas às condições meteorológicas, a magnitude dessas oscilações tende a permanecer relativamente limitada no conjunto da série histórica.

Esse padrão está associado, principalmente, ao fato de a cultura do arroz no RS

ser predominantemente conduzida em sistema irrigado, no qual a disponibilidade hídrica é controlada de forma mais direta pelo manejo agrícola. Dessa forma, a produtividade torna-se menos sensível à variabilidade da precipitação e aos déficits hídricos de curta duração, quando comparada a culturas de sequeiro. Em consequência, a influência climática sobre o rendimento do arroz tende a manifestar-se de forma mais moderada, contribuindo para uma distribuição de desvios mais concentrada em torno de zero e com menor ocorrência de perdas ou ganhos extremos.

Observa-se ainda que esse comportamento se repete de forma relativamente consistente entre as diferentes mesorregiões do estado, sugerindo que a variabilidade residual da produtividade do arroz apresenta padrão espacialmente homogêneo. Mesmo nas regiões de maior relevância produtiva, como a Sudoeste e a Sudeste Rio-Grandense, predominam desvios de pequena magnitude e baixa frequência de eventos extremos, tanto negativos quanto positivos. Esse resultado reforça a interpretação de que o sistema produtivo do arroz irrigado apresenta maior estabilidade interanual, ainda que permaneça sujeito à influência de outros fatores meteorológicos, como temperatura, radiação solar, nebulosidade e ocorrência de eventos extremos em fases fenológicas críticas.

Figura 7 – Distribuição de frequências dos desvios percentuais de produtividade da cultura do arroz por mesorregião do RS.



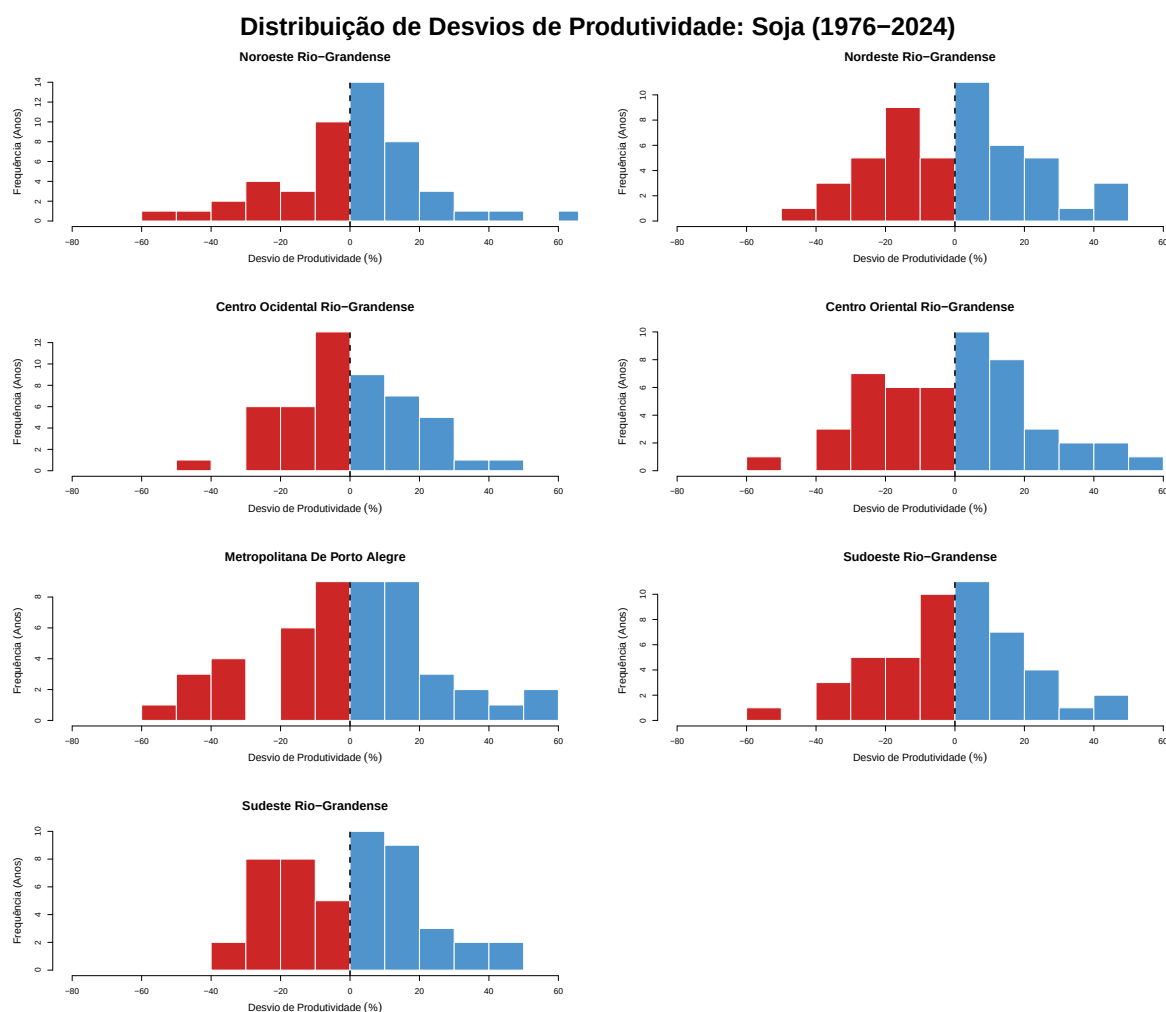
Fonte: Autor (2026).

A análise regional da variabilidade produtiva da soja no RS, representada pelos histogramas de desvios de produtividade na Fig. 8, mostra a distribuição dos desvios percentuais entre 1976 e 2024 nas diferentes mesorregiões do estado. De modo geral, observa-se maior concentração das frequências próximas de 10%, indicando predominância de safras com desvios de menor magnitude. Ainda assim, a distribuição da soja apresenta dispersão considerável, com ocorrência relativamente frequente de desvios negativos e positivos mais acentuados.

Esse comportamento evidencia a elevada sensibilidade da produtividade da soja à variabilidade interanual das condições climáticas no RS, inclusive nas regiões de maior expressão produtiva. Destacam-se, nesse contexto, a Noroeste Rio-Grandense, principal mesorregião produtora da cultura, além das mesorregiões Centro Ocidental e Centro Ori-

ental, que também apresentam importante participação na produção estadual. Nessas áreas, observam-se quebras de produtividade superiores a 20% e, em alguns casos, próximas de 30%, ainda que com menor frequência, indicando que mesmo as regiões mais produtivas permanecem fortemente expostas às flutuações climáticas.

Figura 8 – Distribuição de frequências dos desvios de produtividade da cultura da soja nas mesorregiões do RS.



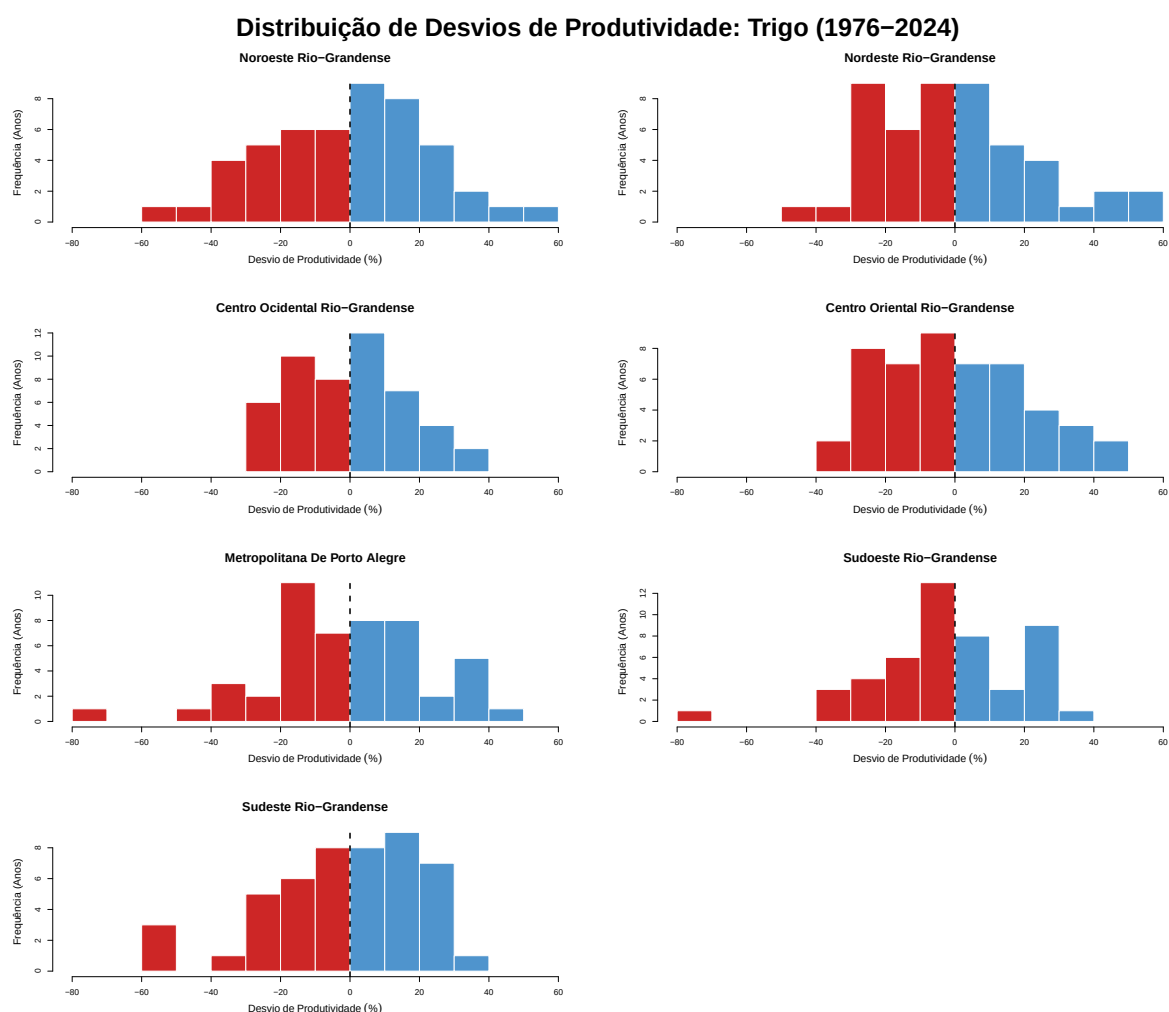
Fonte: Autor (2026).

A análise regional da variabilidade produtiva do trigo no Rio Grande do Sul, representada pelos histogramas de desvios de produtividade na Fig. 9, evidencia a distribuição dos desvios percentuais no período de 1976 a 2024 para as sete mesorregiões do estado. De modo geral, observa-se maior concentração das frequências em torno de 10%, indicando predominância de safras com desvios produtivos de menor magnitude. Ainda assim, a maior dispersão observada em várias regiões revela a recorrência de anos com

perdas e ganhos expressivos, caracterizando variabilidade interanual relevante para a cultura.

Entre as mesorregiões analisadas, destacam-se a Noroeste e a Nordeste Rio-Grandense, que estão entre as áreas de maior relevância para a produção de trigo no estado e que apresentam distribuições mais amplas, com ocorrência de desvios negativos e positivos mais pronunciados. As mesorregiões Centro Ocidental e Centro Oriental mostram comportamento intermediário, enquanto a Metropolitana de Porto Alegre apresenta distribuição mais irregular e as regiões Sudoeste e Sudeste Rio-Grandense concentram maior frequência de desvios próximos da média, embora também registrem quebras expressivas em alguns anos. Em conjunto, os resultados indicam que o trigo apresenta predominância de variações moderadas, mas com recorrência de eventos extremos que refletem sua sensibilidade às condições interanuais.

Figura 9 – Distribuição de frequências dos desvios de produtividade da cultura do trigo nas mesorregiões do RS.



Fonte: Autor (2026).

3.2.2 Estações do INMET

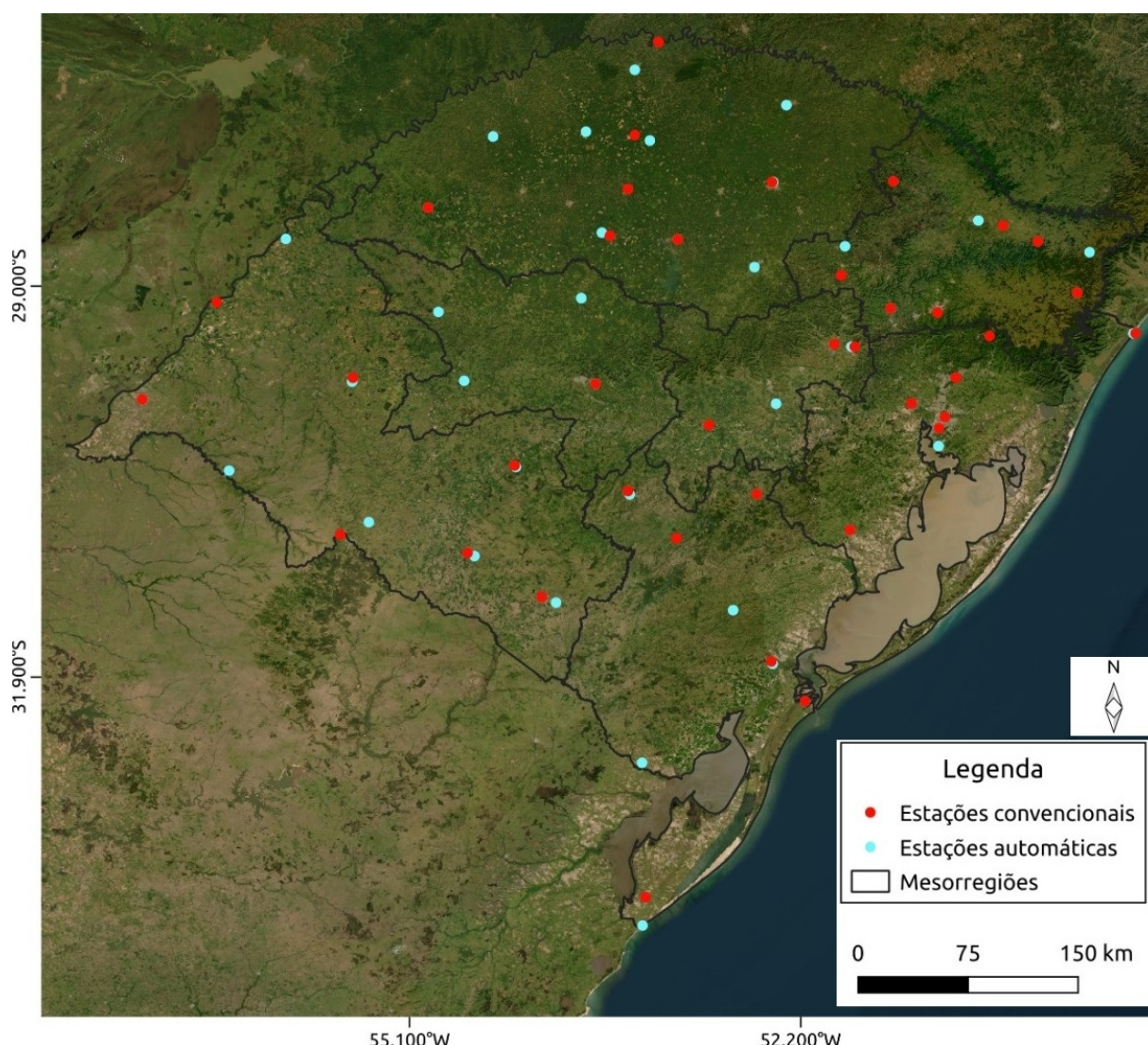
Para a validação dos dados de reanálise e a caracterização da variabilidade climática no Rio Grande do Sul, foram utilizados registros de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), distribuídas no território estadual no período de 1970 a 2025. Esse intervalo é propositalmente maior que o período das séries de produtividade agrícola, pois esta etapa do estudo busca também descrever a evolução temporal das variáveis meteorológicas e identificar padrões de mudança ao longo das últimas décadas.

A rede de estações meteorológicas utilizada é composta por estações convencio-

nais e automáticas, cuja distribuição espacial no estado é apresentada na Fig. 10 e cujos períodos de operação estão listados na Tab. 1. As estações convencionais predominam nas décadas iniciais da série histórica e fornecem observações em horários fixos, enquanto as estações automáticas, implementadas a partir dos anos 2000, disponibilizam registros horários, obtidos por instrumentação digital (INMET, 2025). A utilização conjunta desses dois tipos de estação permite ampliar a cobertura temporal e espacial dos dados observacionais, assegurando uma base mais robusta para a avaliação das condições meteorológicas no estado.

Uma vez que a resolução espacial dos dados não é alta para as décadas de 1970 a 1990, os dados do INMET serão utilizados, neste estudo, como referência observacional para a validação das variáveis meteorológicas derivadas da reanálise ERA5-Land. A combinação de séries provenientes de estações com diferentes períodos de operação permite manter a continuidade da análise histórica e na interpretação da variabilidade hidroclimática regional. A Fig. 10 ilustra a disposição das estações convencionais e automáticas do INMET utilizadas no estudo, bem como a delimitação das mesorregiões do IBGE.

Figura 10 – Localização das estações meteorológicas do INMET utilizadas no presente estudo. Os pontos vermelhos indicam a localização de estações convencionais, enquanto que os pontos azuis mostram a localização de estações automáticas. Os contornos cinzas representam os limites das mesorregiões do RS, mostradas na Fig. 1.



Fonte: Adaptado de IBGE (2019), FEE (2024) e INMET (2025).

A Tab. 1 apresenta as datas de operação e os tipos convencional ou automática, de cada uma das estações meteorológicas do INMET utilizadas neste estudo para o estado do RS. Essa diversidade de estações é fundamental para cobrir o extenso período de análise, de 1970 a 2025. É importante notar a transição de estações convencionais (com dados coletados por equipamentos em grande parte analógicos e disponibilizados em 3 horários diários) para automáticas (mais modernas com equipamentos digitais e taxa de amostragem horária), ao longo do tempo. As estações convencionais, que operaram predominantemente nas décadas iniciais, fornecem dados essenciais para o início da série histórica. As estações automáticas, que começaram a ser implementadas a partir dos

anos 2000, oferecem dados mais precisos e de alta frequência, complementando e, em muitos casos, substituindo os registros das estações convencionais (INMET, 2025).

Tabela 1 – Estações meteorológicas do INMET no Rio Grande do Sul, utilizadas no estudo. As colunas da esquerda indicam o tipo da estação e o período de operação.

Nome	Convencional	Automática
ALEGRETE	01/01/1970 – 31/12/1989	27/09/2006 – 01/07/2025
BAGÉ	01/01/1970 – 01/07/2025	03/01/2007 – 01/07/2025
BENTO GONÇALVES	01/01/1970 – 30/12/2013	30/11/2006 – 01/07/2025
BOM JESUS	01/01/1970 – 01/07/2025	–
CAÇAPAVA DO SUL	01/01/1970 – 30/09/1975	21/06/2006 – 01/07/2025
CACHOEIRA DO SUL	01/01/1970 – 30/11/1978	–
CAMAQUÃ	01/01/1970 – 11/12/2006	11/12/2006 – 01/07/2025
CAMBARÁ DO SUL	31/10/1976 – 24/07/2021	23/11/2016 – 01/07/2025
CAMPO BOM	31/08/1984 – 29/11/2013	–
CANELA	31/12/1971 – 30/09/1990	–
CANGUÇU	–	23/01/2007 – 01/07/2025
CAPÃO DO LEÃO	–	17/07/2019 – 01/07/2025
CAXIAS DO SUL	01/01/1970 – 01/07/2025	–
CRUZ ALTA	01/01/1970 – 01/07/2025	30/05/2007 – 01/07/2025
DOM PEDRITO	01/01/1970 – 31/07/1982	22/04/2010 – 01/07/2025
ENCRUZILHADA DO SUL	01/01/1970 – 24/07/2021	14/03/2018 – 01/07/2025
ERECHIM	–	24/11/2006 – 01/07/2025
FREDERICO WESTPHALLEN	–	13/12/2007 – 01/07/2025
GUAPORÉ	01/01/1970 – 31/12/1980	–
IBIRUBÁ	30/09/1977 – 12/02/2012	12/12/2012 – 01/07/2025
IRAÍ	01/01/1970 – 31/07/2018	–
ITAQUI	01/01/1970 – 30/12/1983	–
JAGUARÃO	–	08/01/2007 – 01/07/2025
LAGOA VERMELHA	01/01/1970 – 01/07/2025	01/03/2007 – 01/07/2025

Nome	Convencional	Automática
LAJEADO	31/12/1977 – 30/12/1985	–
NOVO HAMBURGO	31/08/1975 – 31/12/1998	–
PALMEIRA DAS MISSÕES	01/01/1970 – 31/12/1986	25/02/2008 – 01/07/2025
PANAMBI	31/12/1973 – 31/03/1984	–
PASSO FUNDO	01/01/1970 – 01/07/2025	26/11/2006 – 01/07/2025
PELOTAS	01/01/1970 – 01/07/2025	–
PORTO ALEGRE	01/01/1970 – 01/07/2025	–
PORTO ALEGRE (Jardim Botânico)	–	21/09/2000 – 01/07/2025
PORTO ALEGRE (Belém Novo)	–	07/12/2022 – 01/07/2025
QUARAÍ	–	16/10/2007 – 01/07/2025
RIO GRANDE	01/01/1970 – 18/01/2015	15/11/2001 – 01/07/2025
RIO PARDO	–	29/09/2006 – 01/07/2025
SANTA MARIA	01/01/1970 – 01/07/2025	25/11/2001 – 01/07/2025
SANTA ROSA	–	14/11/2006 – 01/07/2025
SANTA VITÓRIA DO PALMAR	01/01/1970 – 01/07/2025	–
SANTA VITÓRIA DO PALMAR (Barra do Chuí)	–	07/03/2008 – 01/07/2025
SANTANA DA BOA VISTA	01/01/1970 – 30/06/1978	–
SANTANA DO LIVRAMENTO	01/01/1970 – 16/12/2013	21/11/2001 – 01/07/2025
SANTIAGO	–	03/02/2009 – 01/07/2025
SANTO AUGUSTO	–	04/12/2001 – 01/07/2025
SÃO BORJA	–	20/07/2007 – 01/07/2025
SÃO GABRIEL	01/01/1970 – 30/06/1976	10/07/2007 – 01/07/2025
SÃO JOSÉ DOS AUSEN- TES	–	25/10/2006 – 01/07/2025
SÃO LUIZ GONZAGA	01/01/1970 – 01/07/2025	24/07/2007 – 01/07/2025

Nome	Convencional	Automática
SÃO VICENTE DO SUL	–	05/04/2016 – 01/07/2025
SERAFINA CORREA	–	31/03/2016 – 01/07/2025
SOLEDADE	–	29/02/2008 – 01/07/2025
TEUTÔNIA	03/10/1998 – 30/11/2011	03/10/2012 – 01/07/2025
TORRES	01/01/1970 – 26/04/2021	31/05/2006 – 09/10/2024
TRIUNFO	18/12/1978 – 29/06/2013	–
TUPANCIRETÃ	–	10/08/2016 – 01/07/2025
URUGUAIANA	01/01/1970 – 31/03/2019	27/09/2006 – 01/07/2025
VACARIA	01/01/1970 – 31/12/1988	25/04/2008 – 01/07/2025

Fonte: Adaptado de INMET (2025).

É importante destacar que a validação do conjuntos de dados de diferentes períodos assegura a continuidade e a consistência da análise, permitindo a obtenção de séries temporais completas de variáveis meteorológicas fundamentais para o estudo do impacto do clima na produção agrícola.

3.2.3 ERA5-Land

Os dados meteorológicos em grade utilizados neste estudo foram obtidos a partir do produto ERA5-Land, o qual é derivado a partir da reanálise global ERA5, produzida pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) e disponibilizada pelo Copernicus Climate Change Service (C3S). O ERA5 combina modelos numéricos de previsão com observações meteorológicas assimiladas por meio do *Integrated Forecasting System* (IFS), gerando séries temporais fisicamente consistentes do estado da atmosfera em escala global (ECMWF, 2016; C3S, 2024; HERSBACH et al., 2020).

O ERA5-Land é um produto voltado especificamente à representação dos processos de superfície terrestre, executado de forma offline a partir do forçamento atmosférico do ERA5 e disponibilizado em resolução espacial mais elevada. Essa configuração torna o conjunto particularmente adequado para aplicações hidrológicas, climáticas e agrometeorológicas, pois melhora a representação das condições da superfície e da interação solo–planta–atmosfera (MUÑOZ-SABATER et al., 2021; VANELLA et al., 2022; LONGO-MINNOLO et al., 2022; C3S; ECMWF, 2019). Foram utilizadas as variáveis temperatura do ar a 2 m (T_{2m}), temperatura do ponto de orvalho a 2 m ($T_{d,2m}$), precipitação total acumulada e umidade volumétrica do solo (SWVL) em 4 níveis, por serem essenciais à caracterização das condições termo-higrométricas e hídricas associadas ao cálculo do DPV e à análise da variabilidade da produtividade agrícola (ALLEN et al., 1998; HERSBACH et al., 2020;

MUÑOZ-SABATER et al., 2021).

Apesar da consistência espacial e temporal das reanálises, seu desempenho pode variar regionalmente em função da resolução do produto, da heterogeneidade da superfície e da disponibilidade de observações assimiladas. Por essa razão, os dados do ERA5-Land foram avaliados com base nas observações das estações do INMET no Rio Grande do Sul, com ênfase nas variáveis empregadas na derivação do DPV e, sempre que possível, na precipitação. Essa etapa é necessária porque eventuais vieses em T_{2m} e $T_{d,2m}$ podem propagar-se diretamente para o cálculo do DPV e influenciar a interpretação dos padrões climáticos obtidos para o estado (MUÑOZ-SABATER et al., 2021; VANELLA et al., 2022).

3.3 Estimativa do Deficit de Pressão de Vapor

A estimativa do déficit de pressão de vapor (DPV) foi realizada a partir das variáveis atmosféricas disponibilizadas pelo produto de reanálise ERA5-Land, utilizando-se a temperatura do ar a 2 metros de altura (T_{2m}) e a temperatura do ponto de orvalho a 2 metros ($T_{d,2m}$). Tal procedimento é fisicamente consistente com a definição do DPV, uma vez que esse parâmetro corresponde à diferença entre a pressão de vapor de saturação do ar (e_s) e a pressão real de vapor d'água (e_a), sendo amplamente reconhecido como um indicador da demanda evaporativa da atmosfera e do seu poder de secagem sobre superfícies e tecidos vegetais (CAMPBELL; NORMAN, 1998; MONTEITH; UNSWORTH, 2013).

Neste estudo, a pressão de vapor de saturação foi estimada a partir da temperatura do ar, enquanto a pressão real de vapor foi obtida com base na temperatura do ponto de orvalho, considerando-se que, nessa condição, o ar se encontra saturado. Essa formulação é coerente com a base teórica já apresentada na revisão bibliográfica, na qual se destaca que e_s depende fortemente da temperatura do ar, ao passo que e_a está diretamente associado ao conteúdo real de vapor d'água na atmosfera, podendo ser representado a partir da temperatura do ponto de orvalho (CAMPBELL; NORMAN, 1998; MONTEITH; UNSWORTH, 2013).

Para a estimativa das pressões de vapor, foi utilizada a formulação empírica de Tetens, amplamente empregada em estudos agrometeorológicos por sua elevada acurácia na faixa de temperaturas atmosféricas típicas, constituindo uma aproximação simplificada da relação de Clausius-Clapeyron (ALLEN et al., 1998; CAMPBELL; NORMAN, 1998). Para o cálculo de e_s e e_a utilizou-se as seguintes equações:

DPV foi obtido pela Equação 1, e expresso em hPa.

$$\text{DPV} = e_s - e_a \quad (1)$$

Valores de $e_s(T)$ obtidos pela Equação 2, em hPa e T é a temperatura do ar °C.

$$e_s(T) = 6.108 \exp\left(\frac{17.27 T}{T + 237.3}\right) \quad (2)$$

Valores de $e_a(T_d)$ obtidos pela Equação 3, em hPa e T_d é a temperatura do ponto de orvalho em °C.

$$e_a(T_d) = 6.108 \exp\left(\frac{17.27 T_d}{T_d + 237.3}\right) \quad (3)$$

Previamente à aplicação dessas equações, as variáveis $T_{2\ m}$ e $T_{d,2\ m}$, originalmente disponibilizadas em Kelvin pelo ERA5-Land, foram convertidas para graus Celsius. A adoção dessa abordagem apresenta vantagens metodológicas relevantes, pois evita o uso indireto da umidade relativa e preserva de forma mais direta a coerência física entre temperatura e conteúdo de vapor d'água no ar. Além disso, o ERA5-Land constitui uma base adequada para análises agrometeorológicas e climáticas em escala regional, por fornecer séries temporais longas, espacialmente contínuas e consistentes entre variáveis atmosféricas e de superfície, sendo particularmente útil em regiões com limitações observacionais ou baixa densidade de estações meteorológicas (MUÑOZ-SABATER et al., 2021).

4 RESULTADOS

O presente estudo tem como objetivo principal avaliar como a variabilidade climática afeta a produtividade agrícola no RS. Para isso, investiga-se o papel do ENOS e de variáveis meteorológicas, tais como temperatura, umidade do solo e déficit de pressão de vapor (DPV), nas variações da produtividade das safras, analisando suas correlações com os desvios de produtividade das culturas de soja, arroz e trigo nas diferentes mesorregiões do estado.

4.1 Influência do ENOS sobre a Produtividade agrícola no RS

Conforme discutido anteriormente, o El Niño–Oscilação Sul (ENOS) altera os padrões de precipitação e temperatura e consecutivamente, o déficit de pressão de vapor no RS. Durante o El Niño, a chuva tende a aumentar e suavizar extremos de seca; por outro lado, em períodos de La Niña estiagens são favorecidas, assim como ondas de calor e maior demanda evaporativa. Essas perturbações incidem sobre janelas fenológicas críticas, tais como a semeadura, o florescimento e o enchimento de grãos. Portanto, a presente análise buscou comparar a variação relativa à produtividade média entre anos classificados como El Niño, La Niña e Neutro, de acordo com NOAA, Climate Prediction Center (CPC) (2025), visando quantificar a intensidade e a direção das associações observadas, para identificar padrões consistentes de resposta da produtividade às diferentes fases do ENOS.

A Fig. 11 mostra a evolução temporal, no período de 1974 a 2023, da produtividade das safras anuais de arroz irrigado, soja e trigo no RS, destacando a fase do ENOS coincidente (vermelho - El Niño; azul La Niña; cinza - neutro), conforme mostrado. Para analisar a resposta das culturas às fases do ENOS, foi retirada a tendência média da evolução temporal das séries de produtividade e avaliada a oscilação da produção em torno da média. As análises mostram resultados distintos entre as culturas; em safras coincidentes com períodos de El Niño, a produtividade de arroz é menor que a média em 53 % dos casos e 78% das safras de trigo também apresentam redução, com relação à média, quando comparado com outros anos com o mesmo padrão. Por outro lado, 87 % das safras de soja, com predominância de El Niño apresentam aumento na produtividade.

No entanto, quando as safras são coincidentes com períodos de La Niña, o trigo (aumento de 62%) e, principalmente o arroz (aumento de 79% com relação à média), apresentam crescimento na produtividade com relação à outros anos com a mesma característica. Enquanto, a soja apresenta um aumento mais discreto na produtividade (aumento de 53% com relação à média)

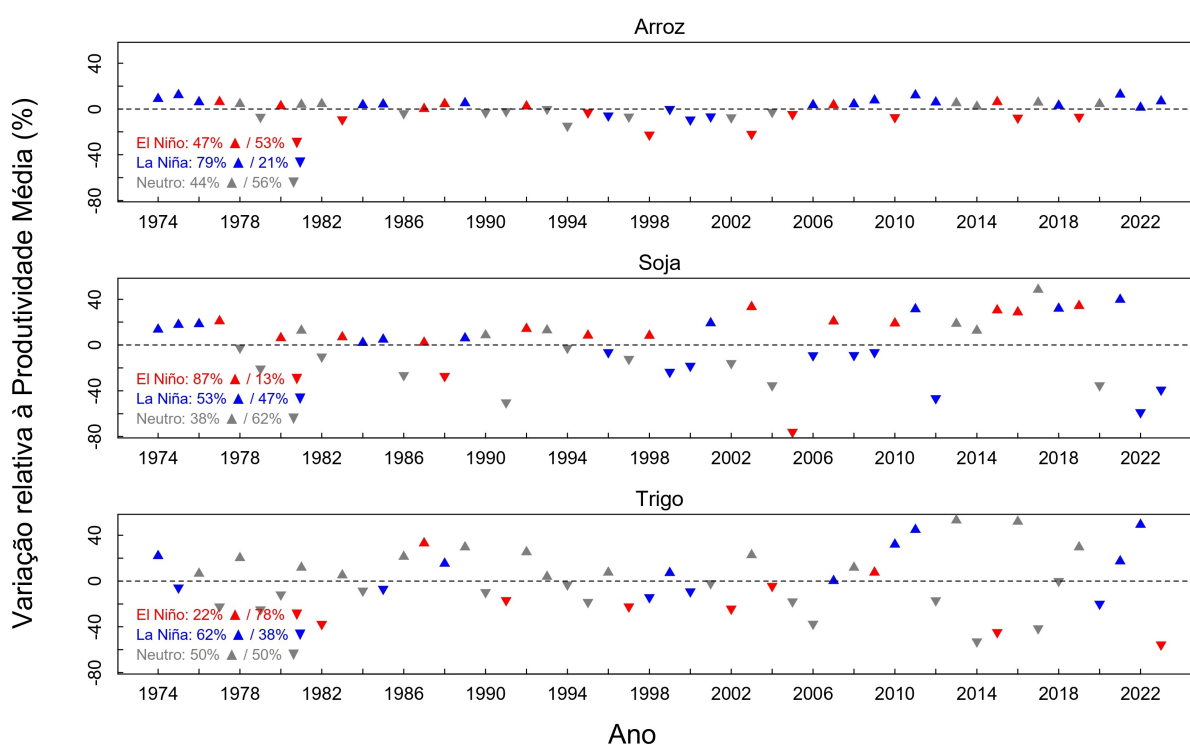
Esse resultado mostra que períodos com El Niño tendem a beneficiar a produtividade de soja, principalmente devido à disponibilidade hídrica. Por outro lado, as safras de arroz e trigo são prejudicadas. Essas reduções na produtividade de arroz e, principalmente

de trigo podem estar relacionadas com a disponibilidade de radiação solar para a primeira cultura e com níveis elevados de umidade, que prejudicam o trigo devido ao aparecimento de doenças.

Por outro lado, períodos com La Niña são caracterizados por baixa precipitação e cobertura de nuvens o que favorece a cultura do arroz e a do trigo. Entretanto, a presença de verões com precipitação irregular não causa significativa redução na produtividade de soja na maioria das safras.

É importante destacar que em qualquer uma das fases, assim como no período neutro, podem ocorrer eventos extremos que podem afetar a produtividade, portanto, para cada caso mais discrepante deve ser feita uma análise mais detalhada.

Figura 11 – Influência do ENOS sobre variação relativa à produtividade média de arroz, soja e trigo no RS. A análise da evolução temporal foi realizada retirando a tendência média dos dados, para cada uma das culturas. Cada ponto triângulo representa um ano de safra, e a orientação representa acima, voltado para cima, ou abaixo, voltado para baixo, da média. As cores vermelho, azul e cinza representam as fases El Niño, La Niña e Neutro, e os percentuais apresentados na legenda são estimados comparando safras que coincidiram com a mesma fase.



Fonte: Autor (2025).

4.1.1 Validação dados Era5–Land

Com o objetivo de avaliar a consistência e representatividade dos dados provenientes do conjunto de reanálise ERA5-Land, realizou-se a validação das variáveis meteorológicas simuladas por meio da comparação com observações de estações do INMET distribuídas no RS. Foram analisadas a temperatura do ar, a temperatura do ponto de orvalho e a precipitação mensal acumulada.

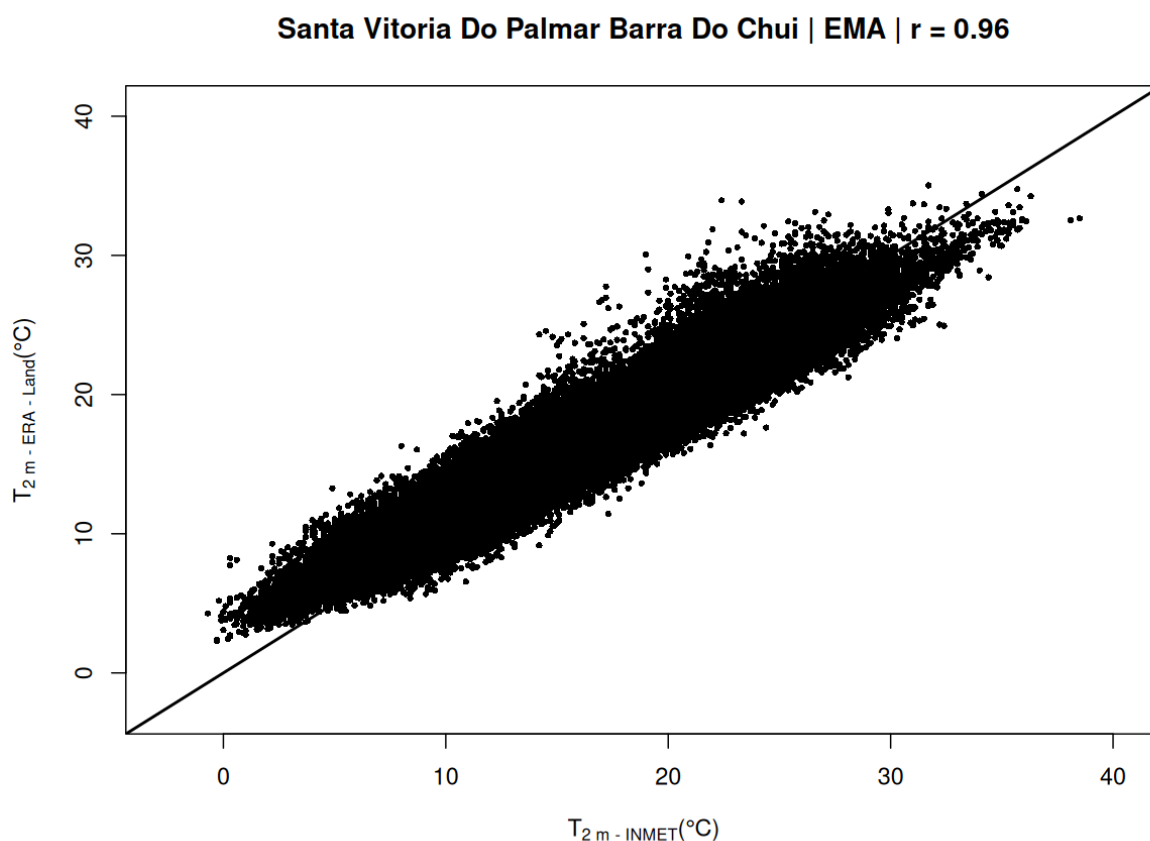
As Fig. 12 a 17 apresentam comparações visuais representativas entre dados observacionais e estimativas do ERA5-Land, enquanto a avaliação completa da validação para todas as estações utilizadas no estudo encontra-se no Apêndice A. Nessa seção complementar, são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson (r), a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o erro absoluto médio (MAE) e o viés médio (MBE), sintetizados nas Tabelas 2, 3 e 4 no Apêndice A.

4.1.2 Temperatura do ar

Na Fig. 12, é apresentada a comparação entre a temperatura do ar observada na estação do INMET de Santa Vitória do Palmar/Barra do Chuí (EMA) e os valores estimados pelo ERA5-Land, evidenciando alta concordância entre os conjuntos de dados. A concentração dos pontos ao longo da linha 1:1 indica que a reanálise reproduz de forma consistente a variabilidade térmica observada nessa localidade, o que é reforçado pelo coeficiente de correlação $r = 0,96$, indicativo de associação linear muito forte.

Embora haja dispersões pontuais, elas permanecem relativamente pequenas e são compatíveis com a diferença entre a medição pontual da estação e a representação espacial média da grade da reanálise, além de efeitos locais não totalmente resolvidos pelo modelo. Ainda assim, o comportamento geral da figura evidencia boa capacidade do ERA5-Land em representar a temperatura do ar nesse caso. A interpretação da Fig. 12 deve ser complementada pelos resultados consolidados no Apêndice A, especialmente na Tabela 2, que apresenta os índices estatísticos para todas as estações avaliadas.

Figura 12 – Comparação entre a temperatura do ar observada na estação do INMET de Santa Vitória do Palmar/Barra do Chuí (EMA) e a temperatura estimada pelo ERA5-Land, com coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0,96$).



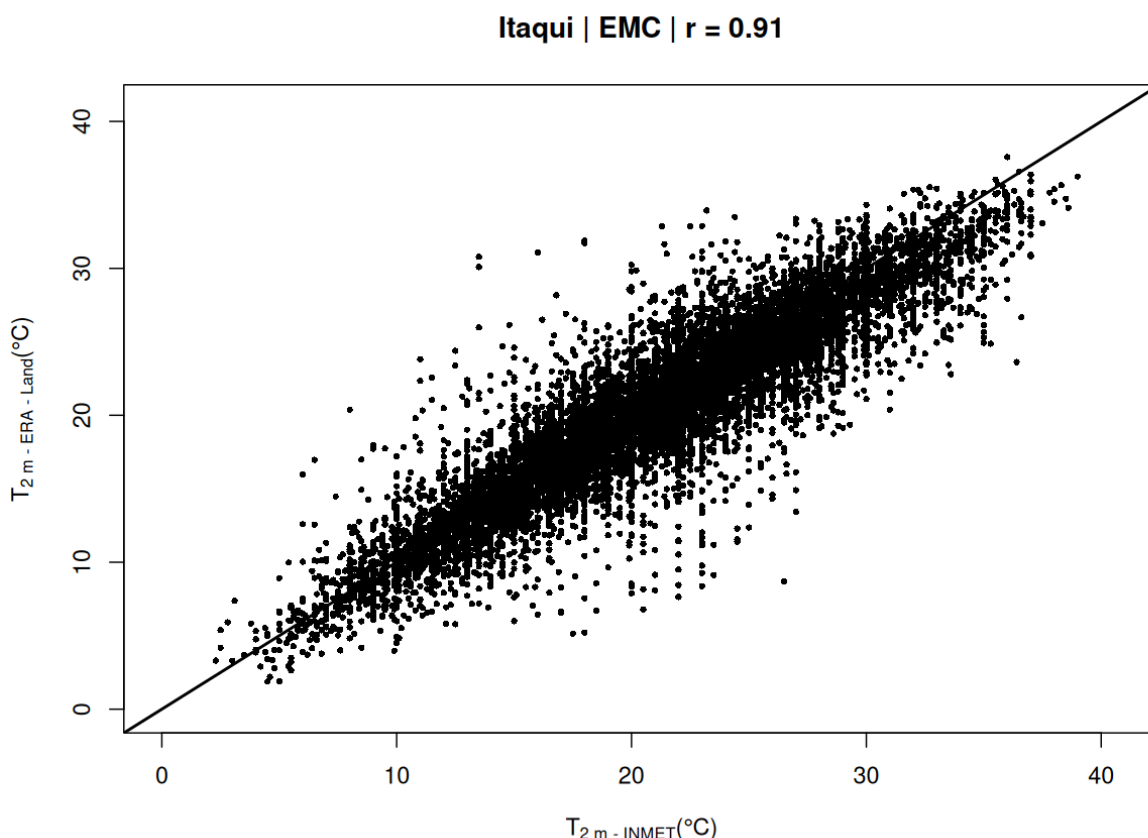
Fonte: Autor (2025).

Na Fig. 13, observa-se a comparação entre a temperatura do ar observada na estação do INMET de Itaquí (EMC) e os valores estimados pelo ERA5-Land, também evidenciando boa concordância entre os conjuntos de dados. A distribuição dos pontos acompanha a linha 1:1 ao longo da faixa de valores, indicando que a reanálise representa de forma consistente a variabilidade térmica observada nessa localidade. O coeficiente de correlação $r = 0,91$ confirma uma associação linear forte entre os dados observados e simulados.

Em comparação à Fig. 12, nota-se dispersão um pouco mais ampla em torno da linha de igualdade, embora sem comprometer o padrão geral de aderência. Esse comportamento é compatível com diferenças entre a medição pontual da estação e a representação espacial média da grade da reanálise, além da influência de condições locais que não são totalmente resolvidas pelo modelo. A interpretação da Fig. 13 deve ser complementada pelos resultados do Apêndice A, especialmente na Tabela 2, que reúne os índices estatísticos (r , RMSE, MBE e MAE) para todas as estações avaliadas, permitindo contextualizar

o desempenho observado em Itaqui no conjunto estadual.

Figura 13 – Comparação entre a temperatura do ar observada na estação do INMET de Itaqui (EMC) e a temperatura estimada pelo ERA5-Land, com coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0,91$).



Fonte: Autor (2025).

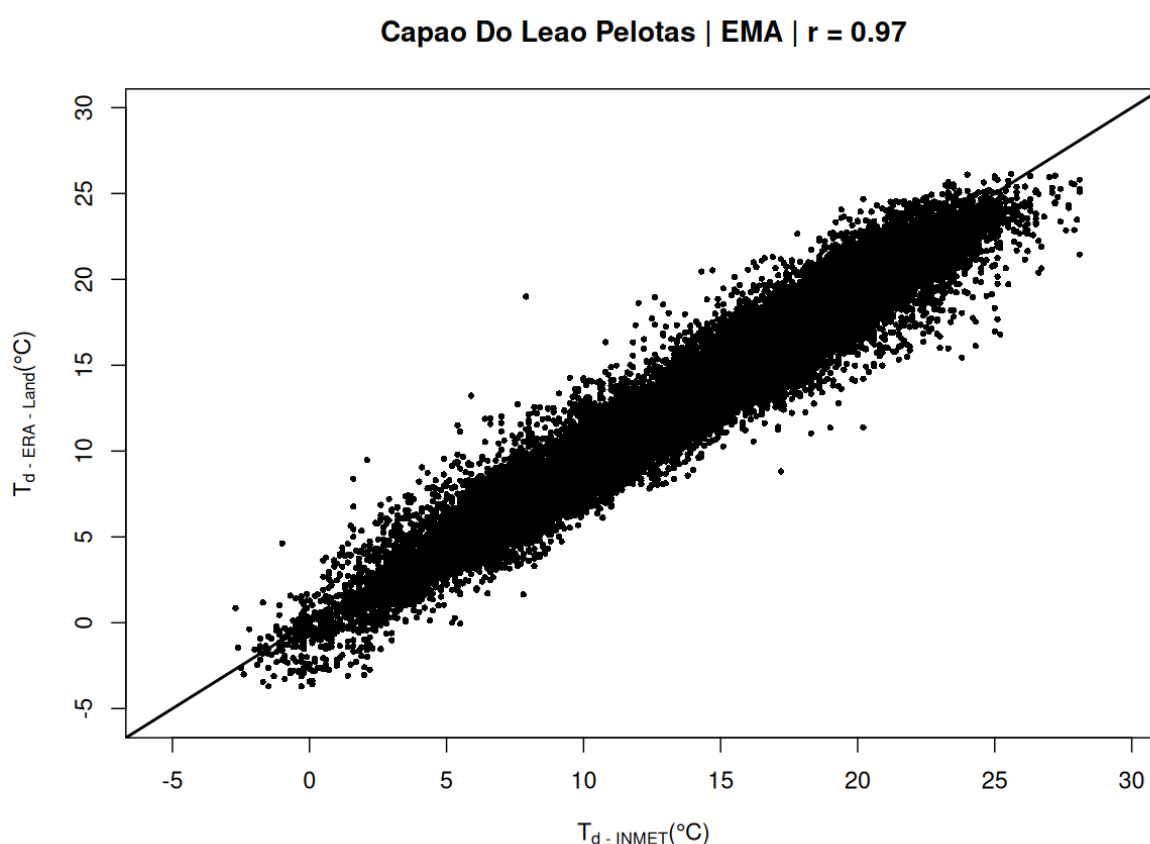
4.1.3 Temperatura do ponto de orvalho

Na Fig. 14, a comparação entre a temperatura do ponto de orvalho observada na estação do INMET de Capão do Leão/Pelotas (EMA) e os valores estimados pelo ERA5-Land evidencia alta concordância entre os conjuntos de dados. A nuvem de pontos está fortemente concentrada ao longo da linha 1:1, indicando que a reanálise representa de forma consistente a variabilidade da umidade atmosférica próxima à superfície nessa localidade. O coeficiente de correlação $r = 0,97$ reforça essa interpretação, caracterizando associação linear muito forte entre os dados observados e simulados.

Observa-se boa aderência em praticamente toda a faixa de valores, com dispersão relativamente baixa em torno da linha de igualdade. As diferenças pontuais existentes

são esperadas e podem ser associadas à diferença entre a medição pontual da estação e a representação espacial média da grade da reanálise, além de influências locais de umidade que não são totalmente capturadas pelo modelo. A interpretação da Fig. 14 deve ser complementada pelo Apêndice A, especialmente na Tabela 3, que apresenta os índices estatísticos (r , RMSE, MBE e MAE) da temperatura do ponto de orvalho para o conjunto das estações avaliadas, consolidando o desempenho da variável em escala estadual.

Figura 14 – Comparação entre a temperatura do ponto de orvalho observada na estação do INMET de Capão do Leão/Pelotas (EMA) e a temperatura do ponto de orvalho estimada pelo ERA5-Land, com coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0,97$).



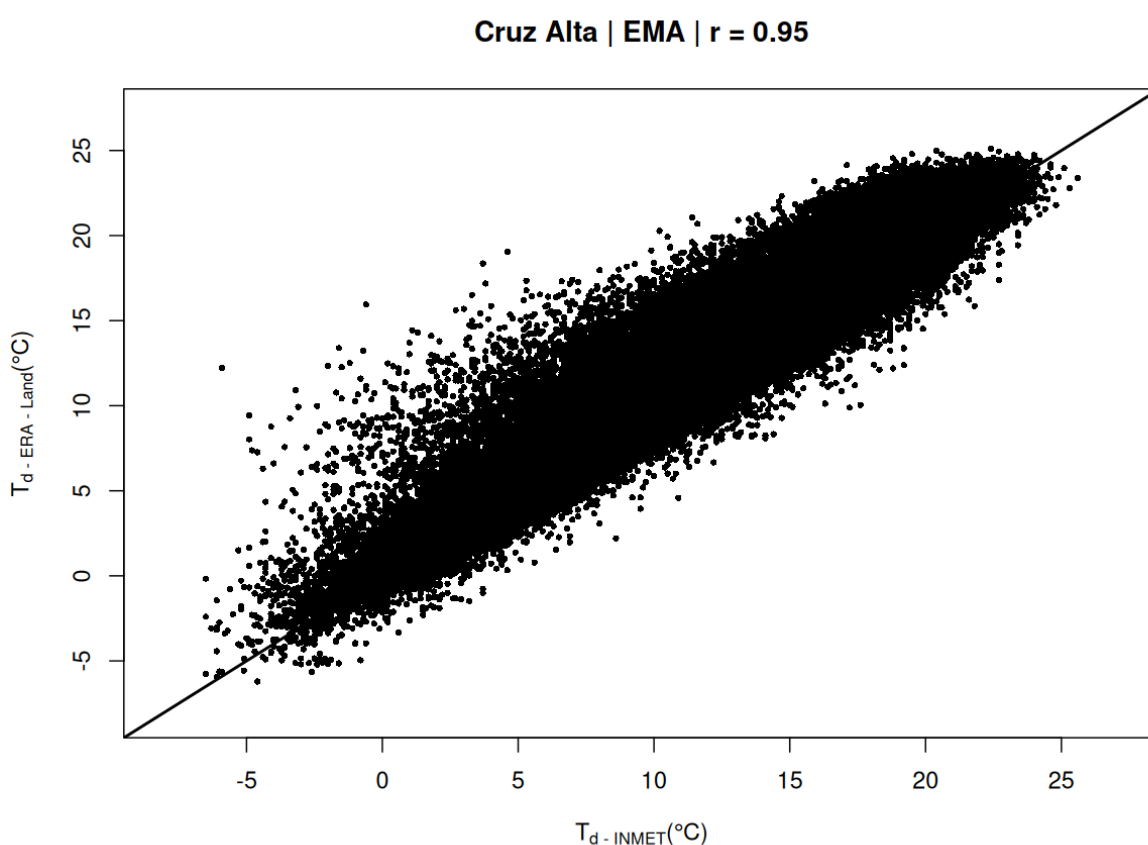
Fonte: Autor (2025).

Na Fig. 15, a comparação entre a temperatura do ponto de orvalho observada na estação do INMET de Cruz Alta (EMA) e os valores estimados pelo ERA5-Land também evidencia boa concordância entre os conjuntos de dados. A distribuição dos pontos acompanha a linha 1:1 ao longo da faixa de valores, indicando que a reanálise representa de forma consistente a variabilidade da umidade atmosférica próxima à superfície nessa localidade. O coeficiente de correlação $r = 0,95$ confirma uma associação linear forte entre os

dados observados e simulados.

Observa-se aderência satisfatória em grande parte da faixa de valores, com dispersão moderada em torno da linha de igualdade, comportamento esperado para uma variável sensível às condições locais de umidade e à diferença entre medição pontual e dado espacializado de reanálise. Ainda assim, o padrão geral da figura indica boa capacidade do ERA5-Land em reproduzir o comportamento da temperatura do ponto de orvalho para esse caso. A interpretação da Fig. 15 deve ser complementada pelo Apêndice A, especialmente na Tabela 3, que reúne os índices estatísticos (r , RMSE, MBE e MAE) da temperatura do ponto de orvalho para todas as estações avaliadas e apresenta a síntese quantitativa do desempenho da variável no conjunto do estado.

Figura 15 – Comparação entre a temperatura do ponto de orvalho observada na estação do INMET de Cruz Alta (EMA) e a temperatura do ponto de orvalho estimada pelo ERA5-Land, com coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0,95$).



Fonte: Autor (2025).

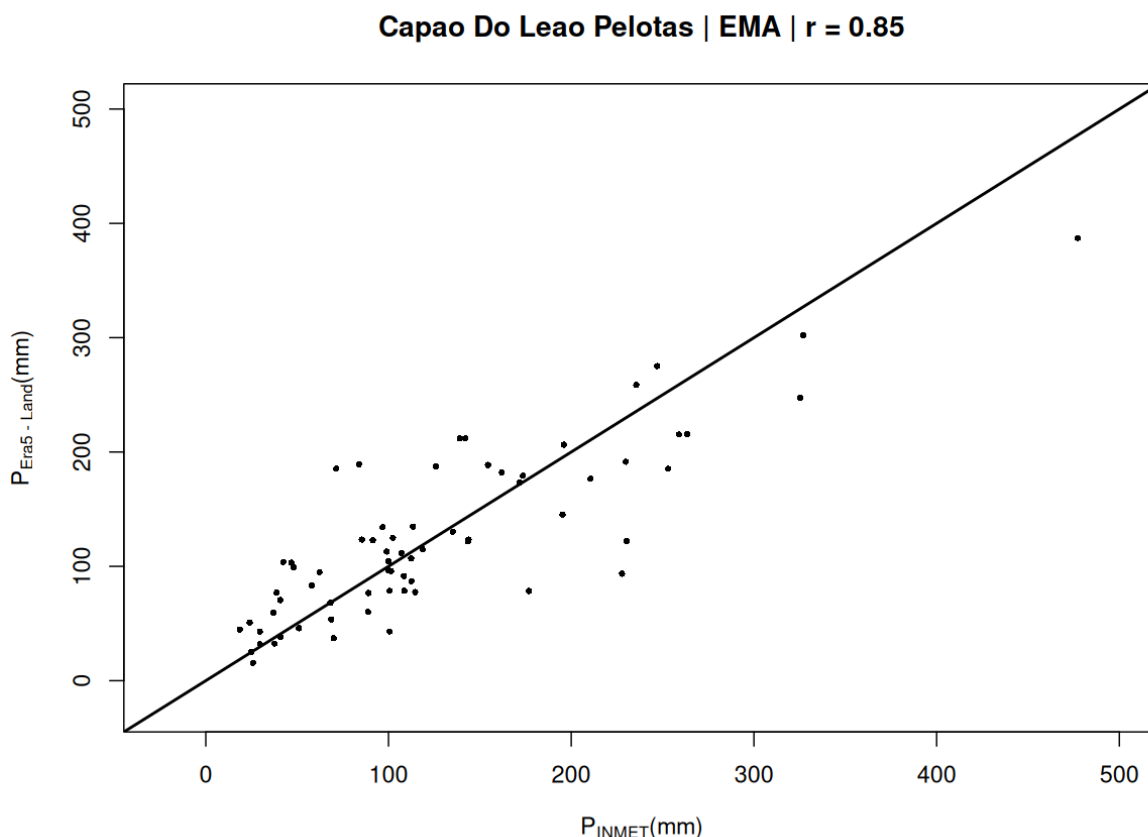
4.1.4 Precipitação acumulada mensal

À Fig. 16 apresenta a comparação entre os totais mensais de precipitação observados na estação do INMET de Capão do Leão/Pelotas (EMA) e os valores estimados pelo ERA5-Land evidencia boa associação geral entre os conjuntos de dados, com coeficiente de correlação $r = 0,85$. A distribuição dos pontos acompanha a tendência da linha 1:1, indicando que a reanálise reproduz de forma satisfatória a variabilidade mensal da precipitação nessa localidade.

Em comparação com as variáveis termodinâmicas, observa-se maior dispersão em torno da linha de igualdade, especialmente em acumulados mensais mais elevados, o que é esperado para precipitação. Esse comportamento reflete a alta variabilidade espaço-temporal da variável, a influência de eventos localizados e a diferença entre a medição pontual da estação e a representação espacial média da reanálise.

Além disso, por se tratar de precipitação acumulada mensal, o número de pares de dados é menor, resultando em menor quantidade de pontos no gráfico e maior sensibilidade da correlação e da dispersão a meses extremos. A interpretação da Fig. 16 deve ser complementada pelo Apêndice A, especialmente na Tabela 4, que apresenta os índices estatísticos (r , RMSE, MBE, MAE e PBIAS) da precipitação para o conjunto das estações avaliadas, consolidando o desempenho da variável em escala estadual.

Figura 16 – Comparação entre a precipitação mensal acumulada observada na estação do INMET de Capão do Leão/Pelotas (EMA) e a precipitação mensal estimada pelo ERA5-Land, com coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0,85$).



Fonte: Autor (2025).

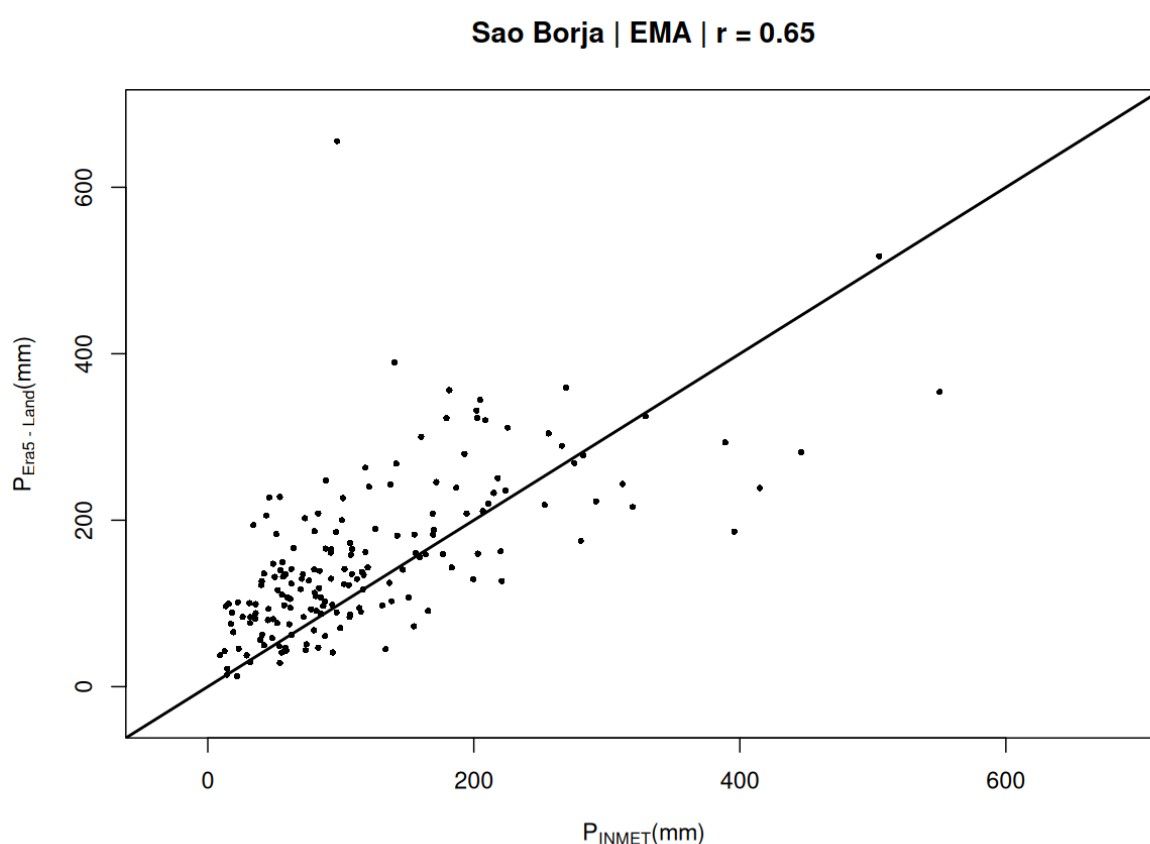
Na Fig. 17, a comparação entre os totais mensais de precipitação observados na estação do INMET de São Borja (EMA) e os valores estimados pelo ERA5-Land evidencia associação moderada entre os conjuntos de dados, com coeficiente de correlação $r = 0,65$. A nuvem de pontos mantém tendência positiva em relação à linha 1:1, indicando que a reanálise acompanha parte da variabilidade mensal da precipitação nessa localidade, porém com dispersão mais elevada do que a observada na Fig. 16.

Observa-se maior espalhamento dos pontos ao longo da faixa de valores e discrepâncias mais marcantes em acumulados médios e altos, incluindo meses em que a reanálise superestima ou subestima a precipitação observada. Esse comportamento é esperado para precipitação, em razão da elevada variabilidade espaço-temporal da variável, da influência de eventos convectivos/localizados e da diferença entre a medição pontual da estação e a representação espacial média da reanálise.

Adicionalmente, por se tratar de acumulados mensais, há menor número de obser-

vações pareadas, o que reduz a quantidade de pontos no gráfico e aumenta a influência relativa de meses extremos sobre o ajuste visual e sobre o coeficiente de correlação. A interpretação da Fig. 17 deve ser complementada pelo Apêndice A, especialmente na Tabela 4, que apresenta os índices estatísticos (r , RMSE, MBE, MAE e PBIAS) da precipitação para o conjunto das estações avaliadas, consolidando o desempenho da variável em escala estadual.

Figura 17 – Comparação entre a precipitação mensal acumulada observada na estação do INMET de São Borja (EMA) e a precipitação mensal estimada pelo ERA5-Land, com coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0,65$).



Fonte: Autor (2025).

4.2 Climatologia

As Fig. 18 a 21 apresentam a climatologia mensal das principais variáveis meteorológicas e de superfície analisadas no estudo, calculada a partir das médias de cada mês ao longo do período considerado. Esse conjunto de mapas descreve o padrão sazonal típico e sua distribuição espacial no RS.

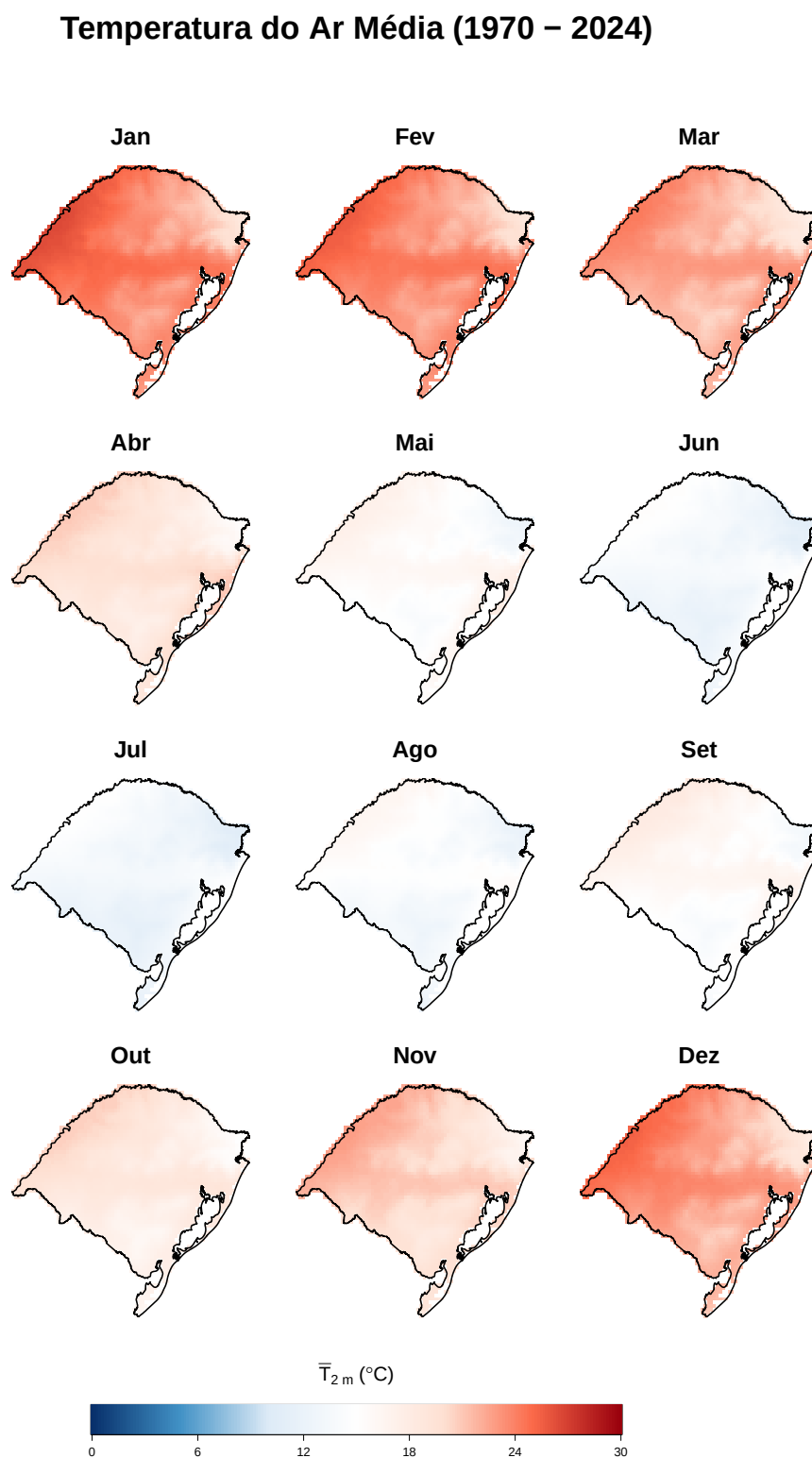
Essas climatologias fornecem a referência física para interpretar, nas etapas seguintes, tanto as anomalias e tendências quanto a relação entre variáveis atmosféricas e o estresse climático associado ao DPV. Além disso, permitem reconhecer gradientes regionais ligados à latitude, ao relevo e ao contraste entre áreas costeiras e continentais.

A Fig. 18 apresenta a temperatura do ar média a 2 m em base mensal, evidenciando com clareza o ciclo anual no RS. Observa-se um padrão sazonal bem definido, com valores mais elevados no verão, especialmente entre dezembro e março, quando o aquecimento se intensifica em todo o estado, e valores mais baixos no inverno, com mínimos concentrados entre junho e agosto, refletindo a atuação mais frequente de massas de ar frio e a redução da energia disponível.

Além da sazonalidade, o mapa revela um gradiente espacial consistente. Em termos gerais, as porções ao norte apresentam temperaturas médias superiores às registradas ao sul, em resposta ao controle latitudinal. Adicionalmente, fatores fisiográficos modulam esse padrão, pois regiões de maior altitude tendem a manter temperaturas menores ao longo do ano, enquanto áreas de menor altitude e mais continentais respondem de forma mais intensa ao aquecimento no verão e ao resfriamento no inverno.

Nos meses de transição, mostra a passagem gradual entre os regimes térmicos, com declínio progressivo das temperaturas a partir do outono e retomada do aquecimento a partir da primavera. Assim, fornecendo a referência climatológica do comportamento térmico regional, fundamental para interpretar variáveis dependentes da temperatura, como o DPV, nas análises subsequentes.

Figura 18 – Média mensal da temperatura do ar a 2 metros no RS para o período de 1970 a 2024.



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 19 apresenta a precipitação acumulada mensal média ao longo do ciclo anual,

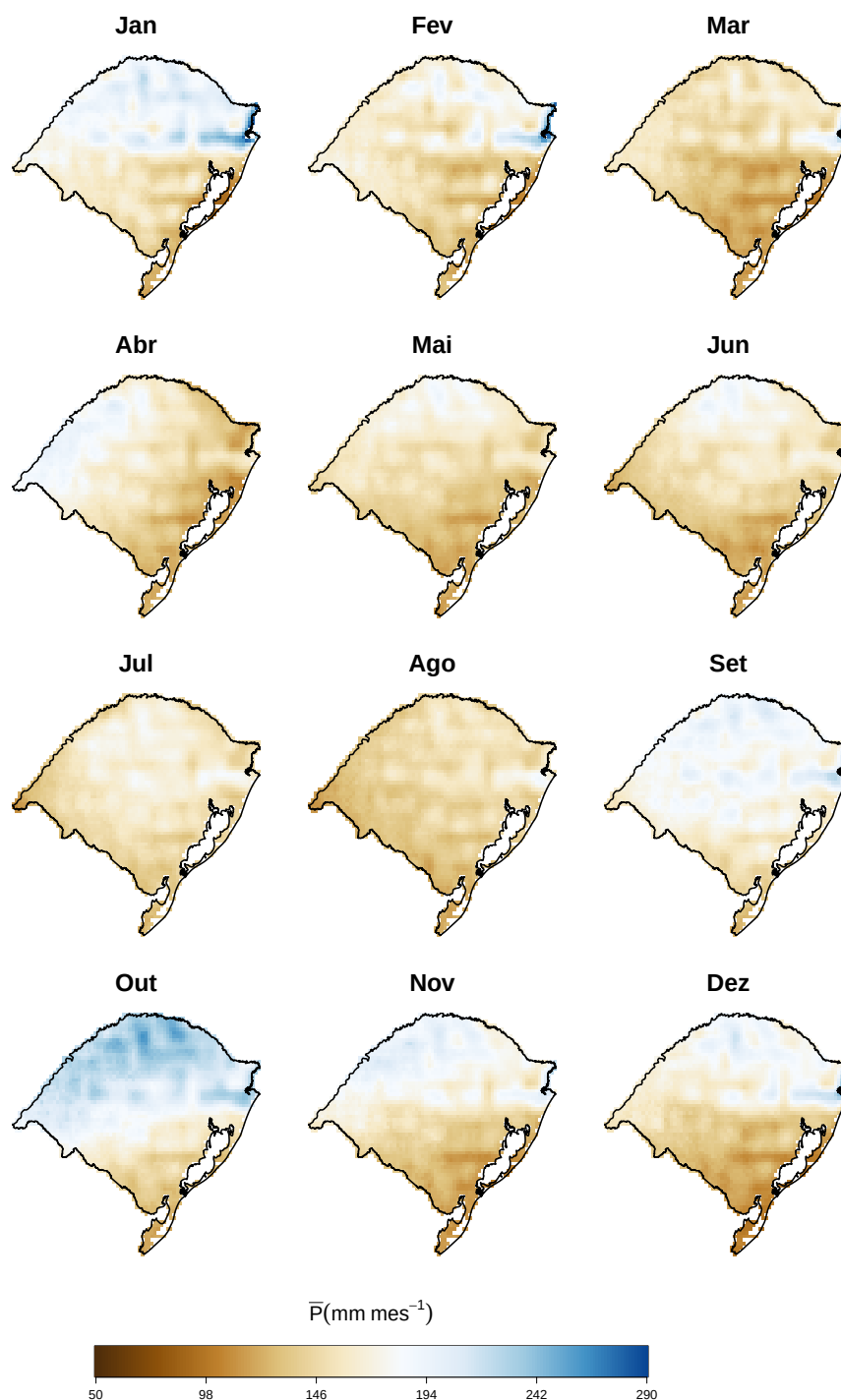
evidenciando que o RS não possui uma estação seca bem definida, porém a precipitação varia ao longo do ano e apresenta diferenças regionais recorrentes dentro do estado. Em termos gerais, os maiores acumulados aparecem com mais frequência na primavera, com destaque para setembro e, sobretudo, outubro, quando se observa intensificação da precipitação em áreas mais amplas do estado.

No componente espacial, nota-se um padrão recorrente de maiores acumulados no setor norte e nordeste, enquanto as porções sul e sudoeste tendem a apresentar valores relativamente menores em vários meses. Essa organização é compatível com a influência combinada de latitude, relevo e circulação regional, incluindo efeitos orográficos em áreas elevadas e maior aporte de umidade em setores mais favoráveis à formação de chuva.

Também, os períodos de outono e inverno, especialmente entre maio e agosto, observa-se redução relativa dos acumulados em grande parte do estado, com distribuição mais homogênea e valores moderados, ainda que sem caracterizar ausência de precipitação. Já no fim da primavera e começo do verão, a chuva não se distribui igual no RS, ela costuma ficar concentrada em algumas regiões em certos meses, e em outros meses essa concentração muda ou diminui, deixando os acumulados mais moderados.

Figura 19 – Precipitação acumulada mensal média no RS para o período de 1970 a 2024.

Precipitação Acumulada Média (1970 – 2024)



Fonte: Autor (2025).

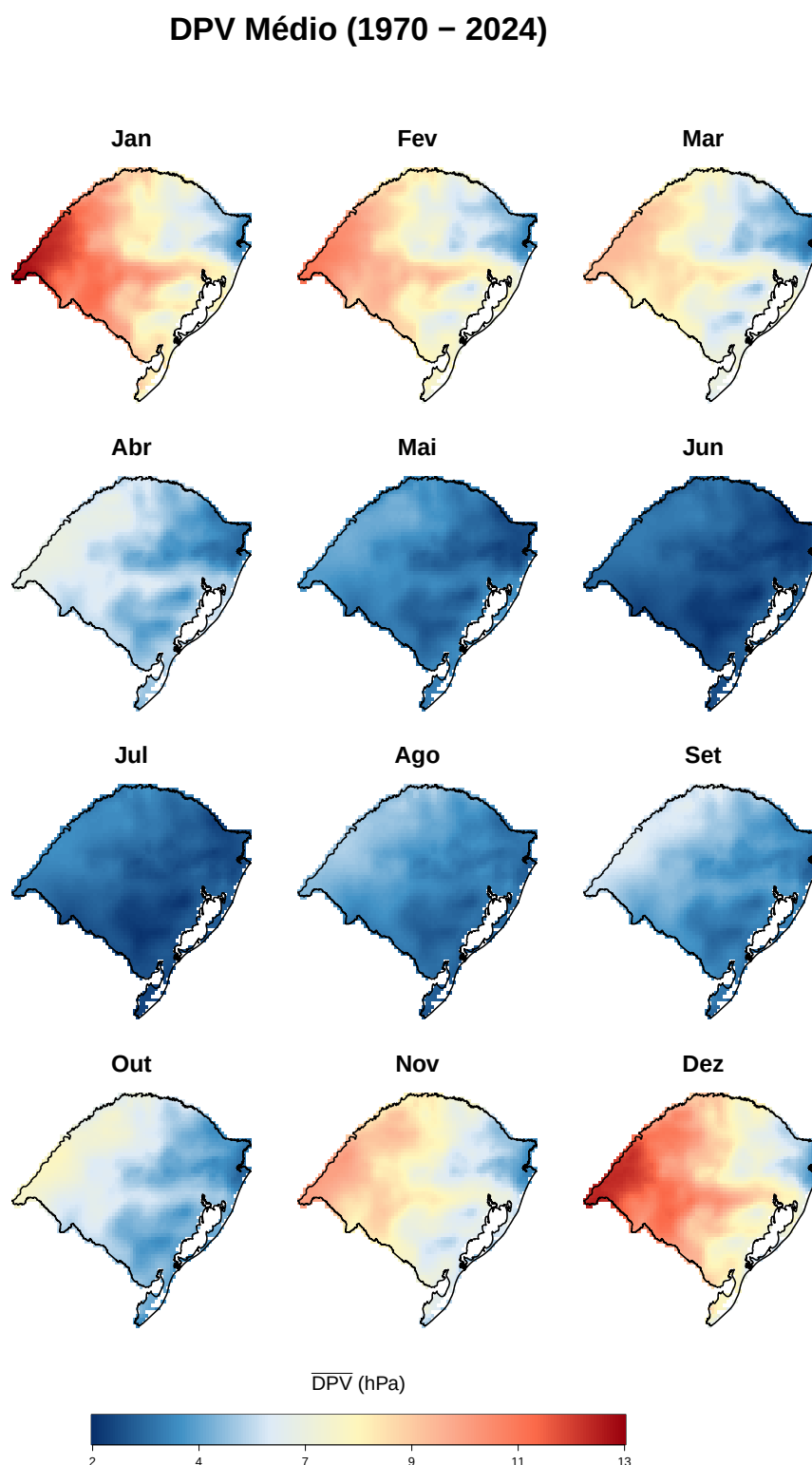
A Fig. 20 apresenta o DPV médio mensal no período de 1970 a 2024, evidenciando um ciclo anual bem marcado e coerente com a sazonalidade térmica do estado. Os

maiores valores concentram-se no verão, especialmente em dezembro e janeiro, quando a atmosfera apresenta maior demanda evaporativa; nesses meses, observa-se um núcleo mais intenso no oeste do RS, enquanto o leste e a faixa costeira tendem a manter DPV relativamente menor.

A partir do outono, ocorre redução progressiva do DPV, com valores baixos predominando entre maio e agosto, quando a atmosfera fica mais fria e, em média, menos “secante”. Nesse intervalo, a distribuição espacial se torna mais homogênea, indicando DPV reduzido em praticamente todo o estado. Na primavera, especialmente entre setembro e novembro, observa-se retomada gradual do DPV e reaparecimento do contraste regional, até alcançar novamente os máximos no verão.

Em termos físicos, o padrão espacial recorrente, com DPV mais elevado no interior e menor próximo ao litoral, é consistente com a combinação entre aquecimento e disponibilidade de umidade. Em áreas mais continentais tendem a apresentar maior demanda atmosférica por água, enquanto a proximidade do oceano e condições médias mais úmidas favorecem DPV menor. Essa climatologia serve como base de comparação para as análises seguintes, permitindo entender como mudanças na temperatura e na umidade do ar aumentam ou reduzem o DPV e, conseqüentemente, alteram a demanda atmosférica por água e o potencial de estresse para as plantas.

Figura 20 – Média mensal do DPV no RS para o período de 1970 a 2024.



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 21 apresenta a umidade do solo média mensal na camada superficial, (L1) até aproximadamente 30 cm, evidenciando um ciclo anual bem definido e um contraste es-

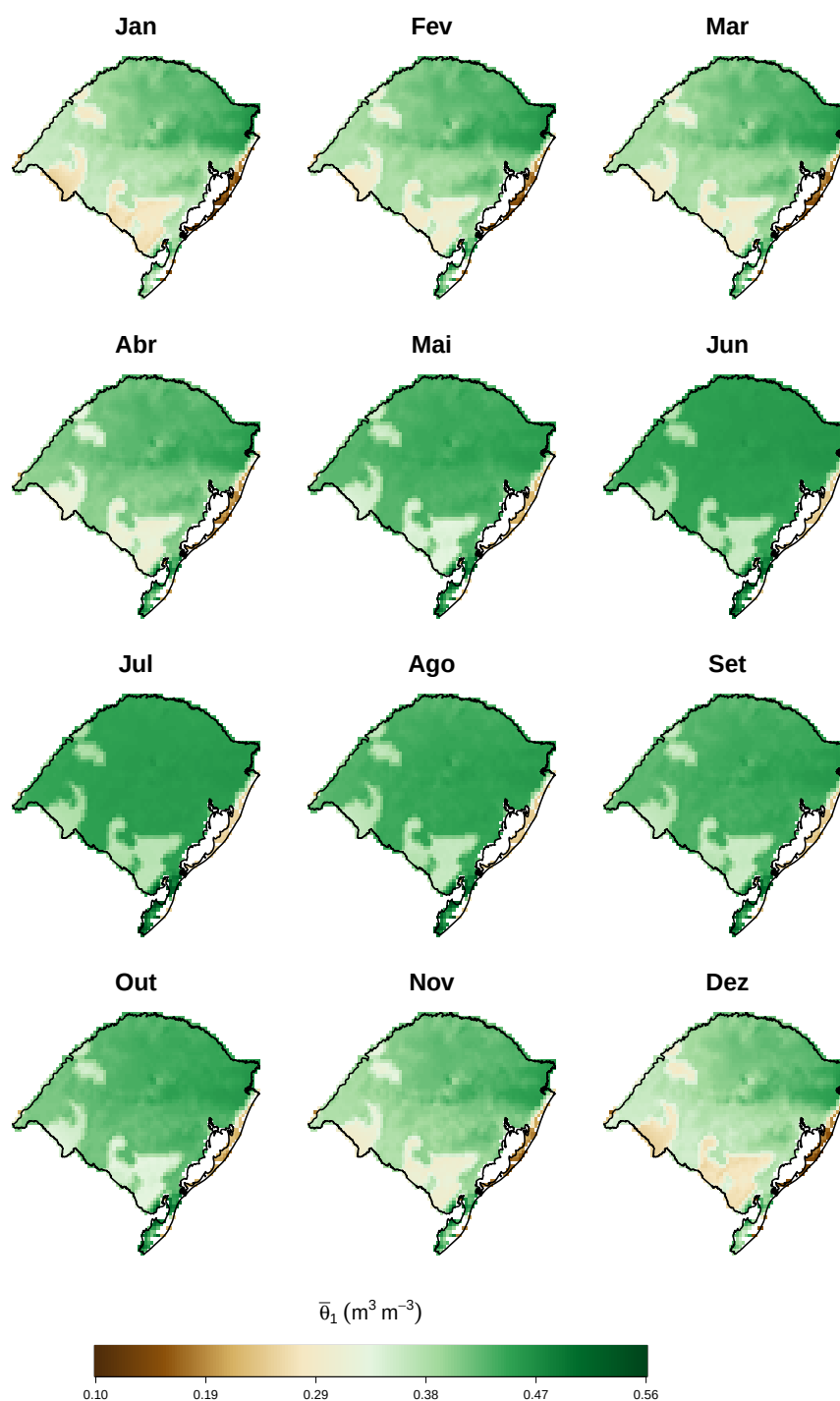
pacial consistente dentro do estado. De modo geral, observa-se um período mais úmido e homogêneo entre maio e setembro, quando predominam valores mais elevados em grande parte do RS, refletindo condições médias de menor demanda evaporativa e maior permanência de água na camada superficial.

Nos meses mais quentes, especialmente entre novembro e fevereiro, a Fig. 20 mostra redução relativa da umidade superficial e aumento do contraste regional. Nesse intervalo, os menores valores tendem a se concentrar com maior frequência em áreas do interior, sobretudo no oeste e sudoeste, enquanto setores do norte e nordeste mantêm valores relativamente mais altos em diversos meses, sugerindo um gradiente espacial recorrente na disponibilidade hídrica da camada superficial.

Dessa forma, na Fig. 21 a climatologia de umidade do solo fornece a referência do estado hídrico superficial ao longo do ano, permitindo contextualizar, nas análises seguintes, a interação entre disponibilidade de água no solo e variáveis atmosféricas, especialmente durante o período quente, quando a secagem superficial se intensifica.

Figura 21 – Climatologia da umidade do solo mensal média na camada superficial (até 30 cm) no RS para o período de 1970 a 2024.

Umidade Solo Média Camada 1 (1970 – 2024)



Fonte: Autor (2025).

As análises apresentadas no corpo principal do trabalho concentram-se na camada

superficial da umidade do solo, por sua relação mais direta com a dinâmica atmosférica e com a resposta imediata das culturas. As climatologias e distribuições espaciais referentes às camadas mais profundas de umidade volumétrica do solo foram incluídas no Apêndice C, para umidade volumétrica do solo na camada L2 na Fig. 67, para umidade volumétrica do solo na camada L3 na Fig. 68 e para umidade volumétrica do solo na camada L4 na Fig. 69, como material complementar à análise desenvolvida neste estudo.

4.2.1 Temperatura a 2 metros (T2m)

As Fig. 22 a 24 apresentam a temperatura do ar a 2 m em médias trimestrais por década, permitindo separar dois controles principais do clima térmico no RS: o ciclo sazonal e a evolução temporal de longo prazo. A organização em linhas, com os trimestres do ano, e colunas, com as décadas, permite comparar diretamente como a distribuição espacial da temperatura muda entre estações e como esse padrão se altera de uma década para outra.

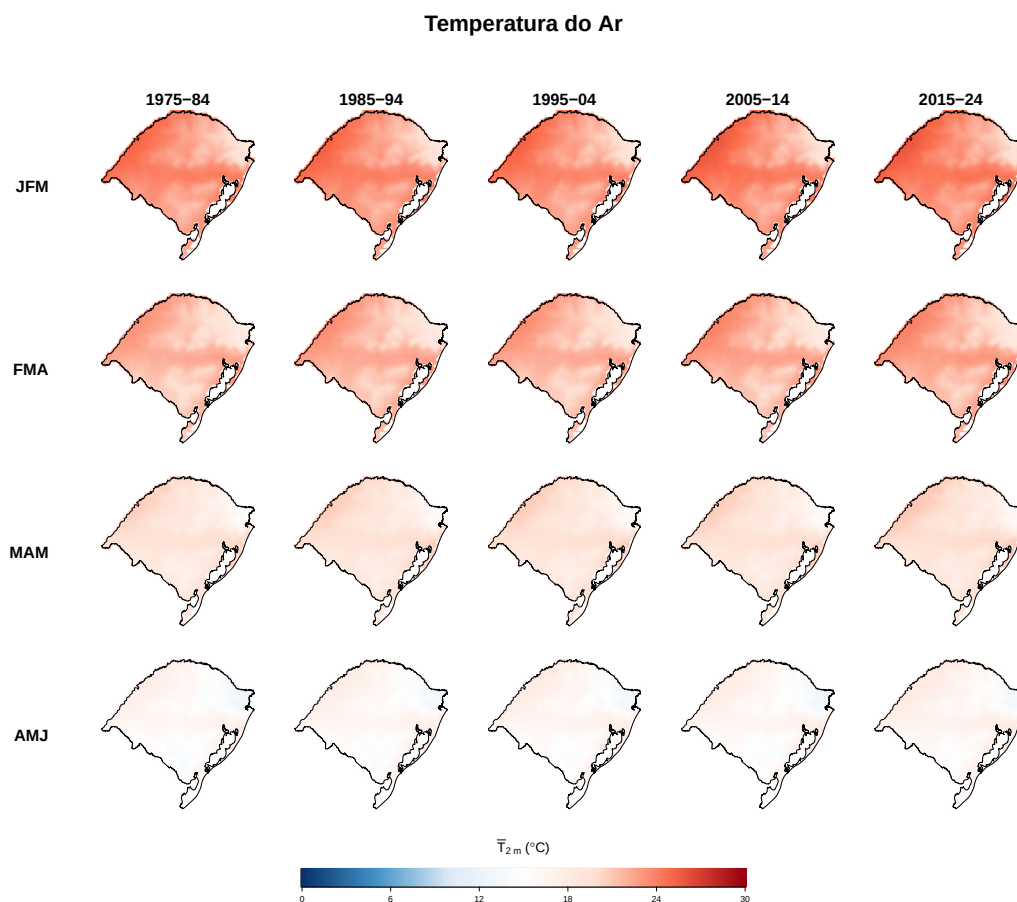
O primeiro sinal que se destaca é a sazonalidade muito marcada. Os trimestres de verão, especialmente NDJ e DJF, apresentam os maiores valores térmicos em todas as décadas, enquanto os trimestres de inverno, como JJA, concentram os menores valores. Nos trimestres de transição, como MAM/AMJ e ASO/SON, observa-se a passagem gradual entre esses regimes, com gradiente térmico bem definido no espaço.

Em praticamente todos os trimestres e décadas, o estado mantém um padrão espacial estável: valores mais elevados no setor norte/noroeste e menores no sul/sudeste, refletindo o controle latitudinal e a influência fisiográfica. Além disso, áreas de relevo mais elevado tendem a manter valores relativamente menores, enquanto áreas de menor altitude e mais continentais mostram aquecimento mais intenso nos trimestres quentes.

Ao comparar as colunas de décadas, observa-se um aumento progressivo das temperaturas nas décadas mais recentes, sobretudo quando se compara 1975–84 com 2015–24. Esse aquecimento aparece de forma mais evidente nos trimestres quentes (primavera e verão), onde as cores associadas a temperaturas mais altas se tornam mais frequentes e espacialmente mais abrangentes. Nos trimestres frios, o sinal também existe, porém tende a ser mais sutil, com mudanças mais discretas na intensidade e na extensão espacial.

A Fig. 22 reúne os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ por década, capturando o final do verão e a transição para outono/início de inverno. Observa-se que o padrão espacial típico se mantém, mas há uma intensificação nas décadas mais recentes, principalmente nos trimestres mais quentes (JFM e FMA), indicando elevação dos valores médios e expansão das áreas mais quentes. Já em MAM e AMJ, a queda sazonal domina, mas ainda assim é possível perceber que as décadas recentes mantêm temperaturas relativamente superiores às décadas iniciais, sugerindo aquecimento também no período de transição.

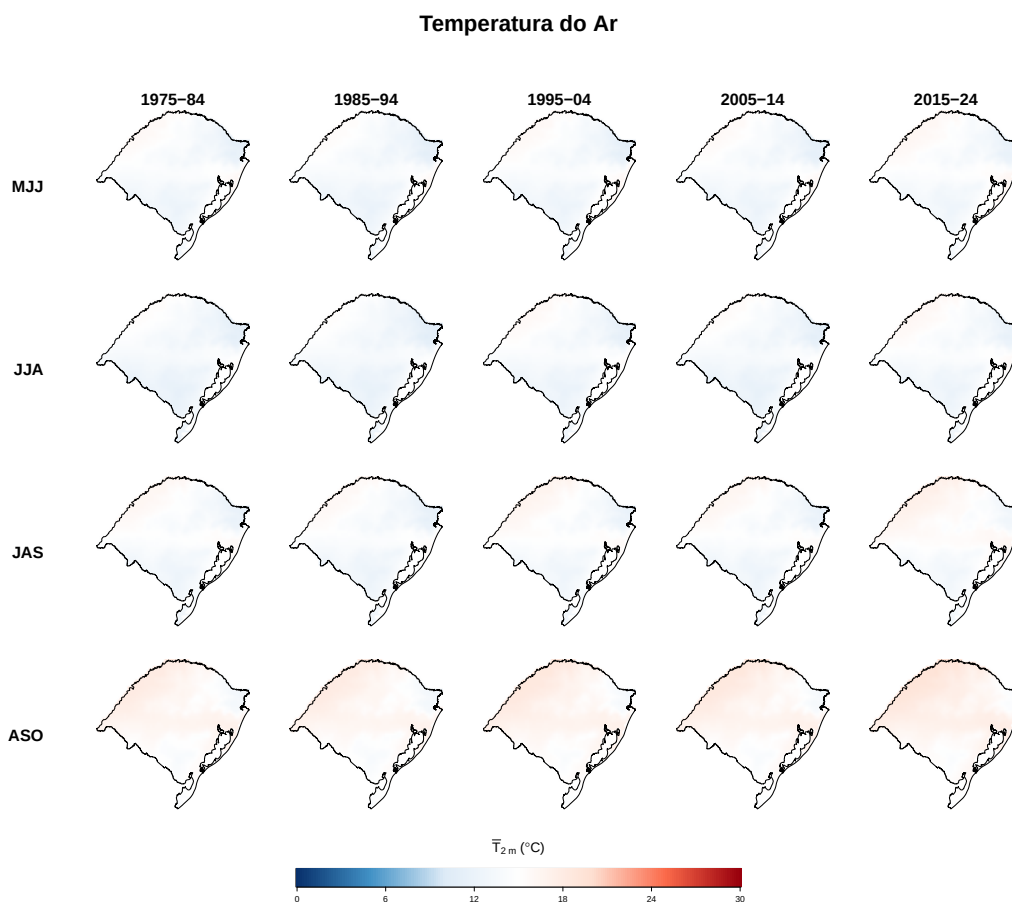
Figura 22 – Médias trimestrais da temperatura do ar a 2 metros no RS por década, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 23 apresenta os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO, que cobrem o núcleo do inverno e a transição para primavera. Aqui, o domínio é do resfriamento sazonal, com mapas mais homogêneos e valores médios menores. Mesmo assim, quando se compara década a década, nota-se que as décadas recentes tendem a apresentar valores ligeiramente maiores, especialmente nos trimestres de transição (JAS e ASO), onde o início do aquecimento primaveril passa a ocorrer com maior intensidade ou maior abrangência espacial.

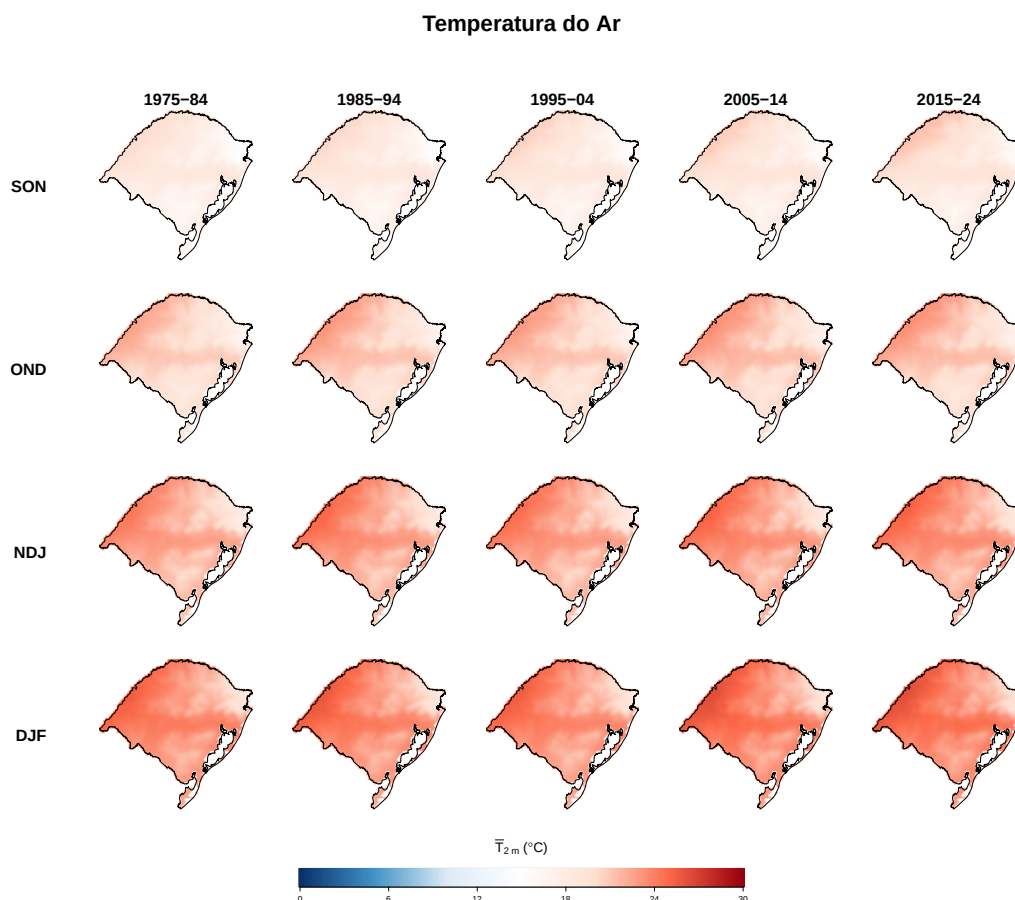
Figura 23 – Médias trimestrais da temperatura do ar a 2 metros no RS por década, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 24 reúne os trimestres SON, OND, NDJ e DJF, abrangendo a primavera e o verão, quando o aquecimento sazonal é máximo. Nessa figura, o sinal de aquecimento ao longo das décadas aparece com maior clareza: nas décadas mais recentes, as áreas com temperaturas mais elevadas se ampliam e se intensificam, sobretudo em NDJ e DJF, com padrão consistente de máximos nas porções mais continentais e no setor norte do estado. Em SON e OND, observa-se também o fortalecimento do aquecimento primaveril nas décadas mais recentes, o que é importante porque a primavera é uma estação crítica para várias culturas, tanto por demanda atmosférica quanto por efeitos indiretos sobre DPV e balanço hídrico.

Figura 24 – Médias trimestrais da temperatura do ar a 2 metros no RS por década, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.



Fonte: Autor (2025).

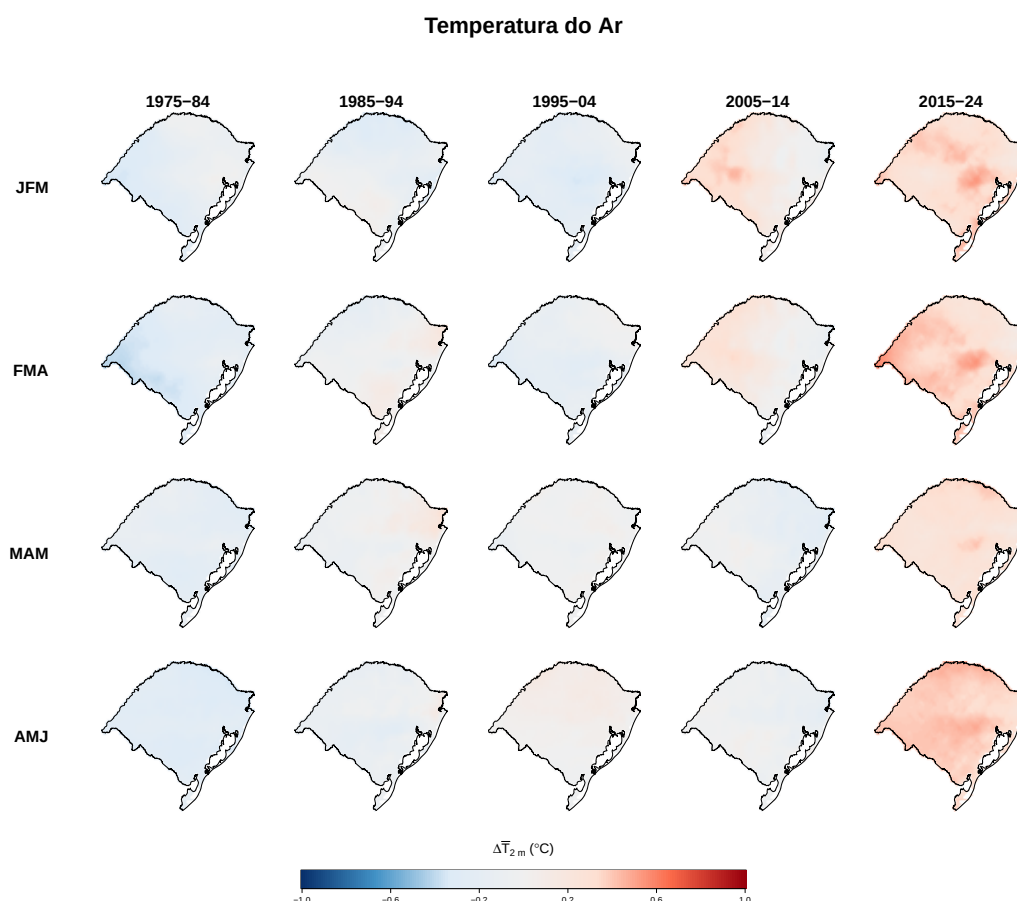
As Fig. 25 a 27 apresentam as anomalias trimestrais da temperatura do ar a 2 m em relação à média, organizadas por década. Diferentemente das figuras anteriores, que mostravam os valores absolutos da temperatura, aqui o foco está no quanto cada trimestre se afastou do comportamento médio climatológico. Assim, essas figuras permitem identificar, de forma mais clara, os períodos e as regiões em que a temperatura esteve acima ou abaixo do padrão esperado.

Esse tipo de representação é importante porque evidencia não apenas a variabilidade sazonal da temperatura, mas também a forma como o sinal térmico foi mudando ao longo do tempo. Dessa maneira, torna-se possível observar se as décadas mais recentes passaram a apresentar maior frequência e maior intensidade de anomalias positivas, bem como em quais trimestres esse comportamento se tornou mais evidente no RS.

Na Fig. 25, que reúne os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ, observa-se que as décadas mais antigas apresentam com maior frequência anomalias negativas ou próximas da neutralidade, principalmente em JFM e FMA. A partir de 1995–04, esse padrão começa a mudar e, nas décadas mais recentes, sobretudo em 2005–14 e 2015–24, passam a

predominar anomalias positivas mais amplas. Nos trimestres MAM e AMJ, essa mudança também aparece, embora de forma mais moderada, indicando que o aquecimento não ficou restrito apenas ao verão, mas também passou a influenciar a transição para o outono e o início do inverno.

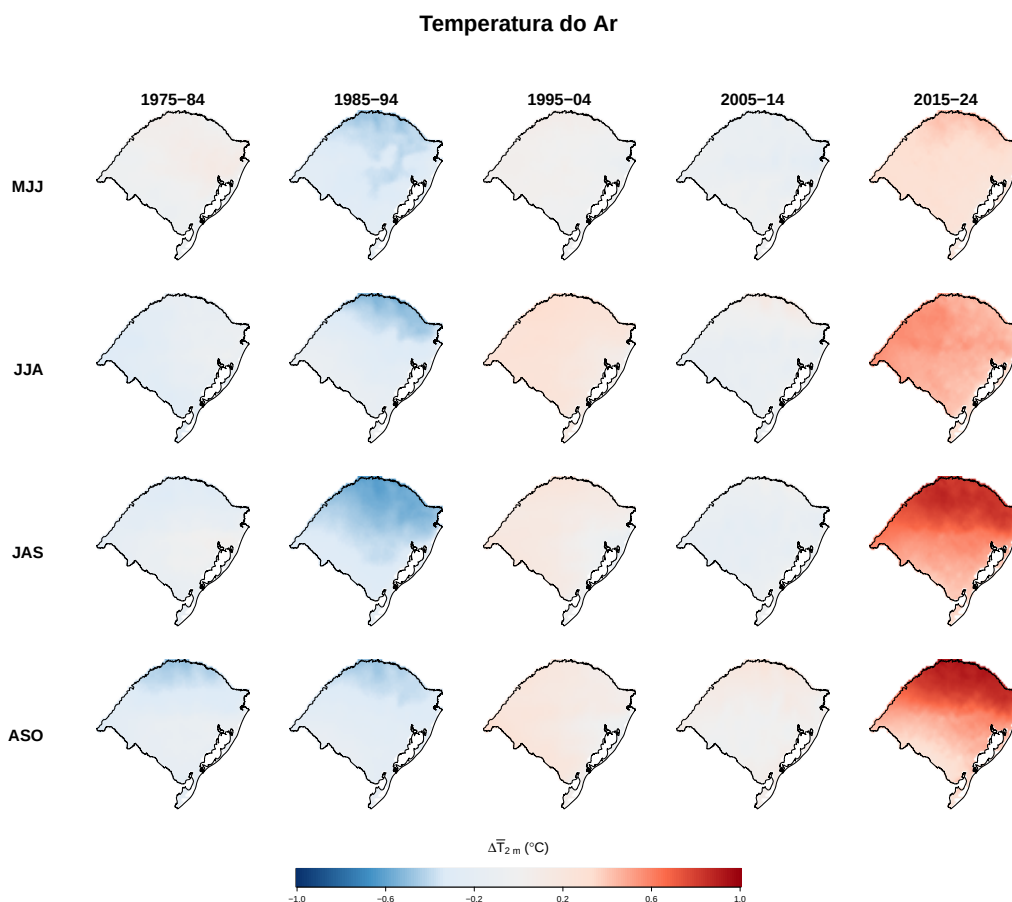
Figura 25 – Diferença média da temperatura do ar a 2 metros por década com relação à média de todo o período, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.



Fonte: Autor (2025).

Na Fig. 26, referente aos trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO, o padrão também mostra diferenças importantes entre as décadas. Nas primeiras décadas, especialmente em 1975-84 e 1985-94, há maior presença de anomalias negativas, principalmente em JJA e JAS, indicando temperaturas abaixo da média em parte do estado durante o inverno e a transição para a primavera. Nas décadas mais recentes, esse comportamento perde força e, em 2015-24, observa-se predomínio mais claro de anomalias positivas, com destaque para JAS e ASO, mostrando que o aquecimento também passou a se manifestar no final do inverno e no início da primavera.

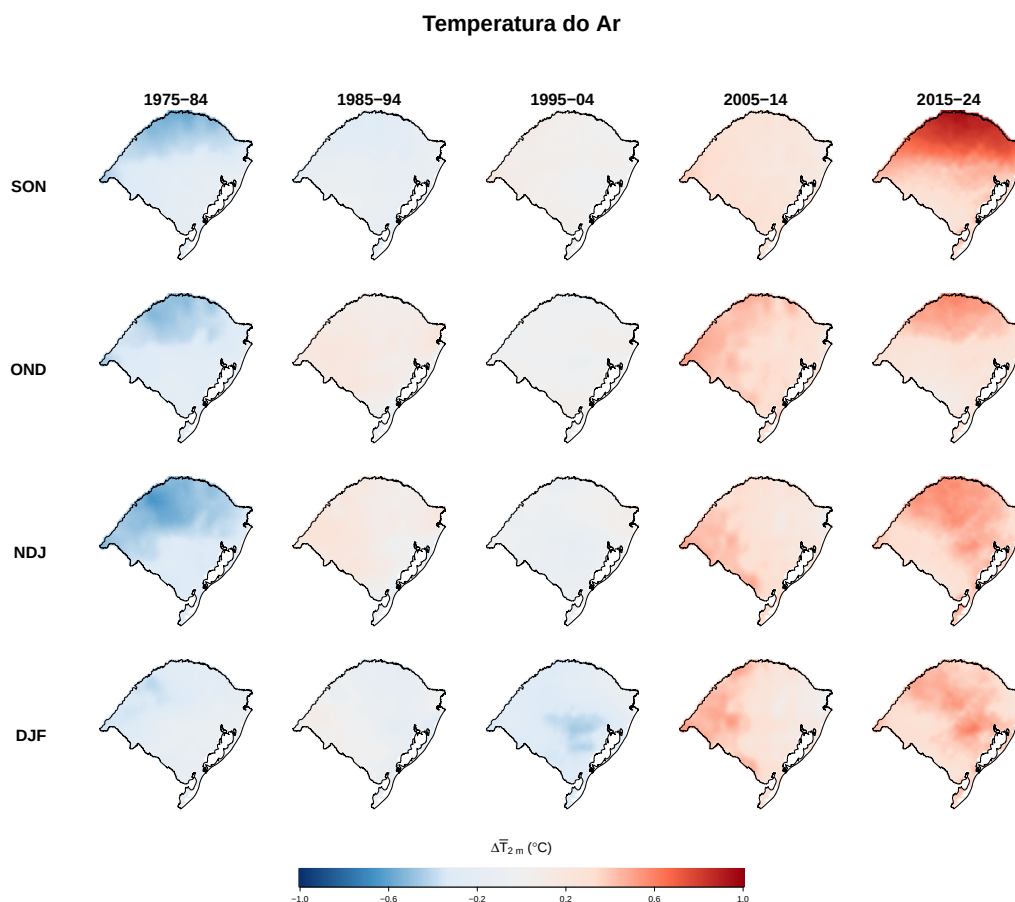
Figura 26 – Diferença média da temperatura do ar a 2 metros por década com relação à média de todo o período, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 27, que reúne os trimestres SON, OND, NDJ e DJF, é a que mostra de forma mais clara o aumento das anomalias positivas ao longo das décadas. Nas décadas mais antigas, ainda se observam áreas com anomalias negativas ou próximas da média, principalmente em SON e OND. No entanto, esse padrão vai sendo substituído, nas décadas mais recentes, por anomalias positivas mais extensas e intensas, sobretudo em 2005–14 e 2015–24. O destaque maior ocorre em SON, OND e DJF, mostrando que a primavera e o verão passaram a apresentar aquecimento mais forte e mais abrangente nas últimas décadas.

Figura 27 – Diferença média da temperatura do ar a 2 metros por década com relação à média de todo o período, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.



Fonte: Autor (2025).

As Fig. 25 a 27 mostram uma transição entre décadas com maior presença de anomalias negativas ou próximas da média para décadas com predomínio de anomalias positivas. Esse sinal aparece ao longo de praticamente todo o ano, mas se torna mais evidente nos trimestres ligados à primavera e ao verão, quando o aquecimento se mostra mais intenso e espacialmente mais abrangente.

4.2.2 Precipitação Total acumulada (TP)

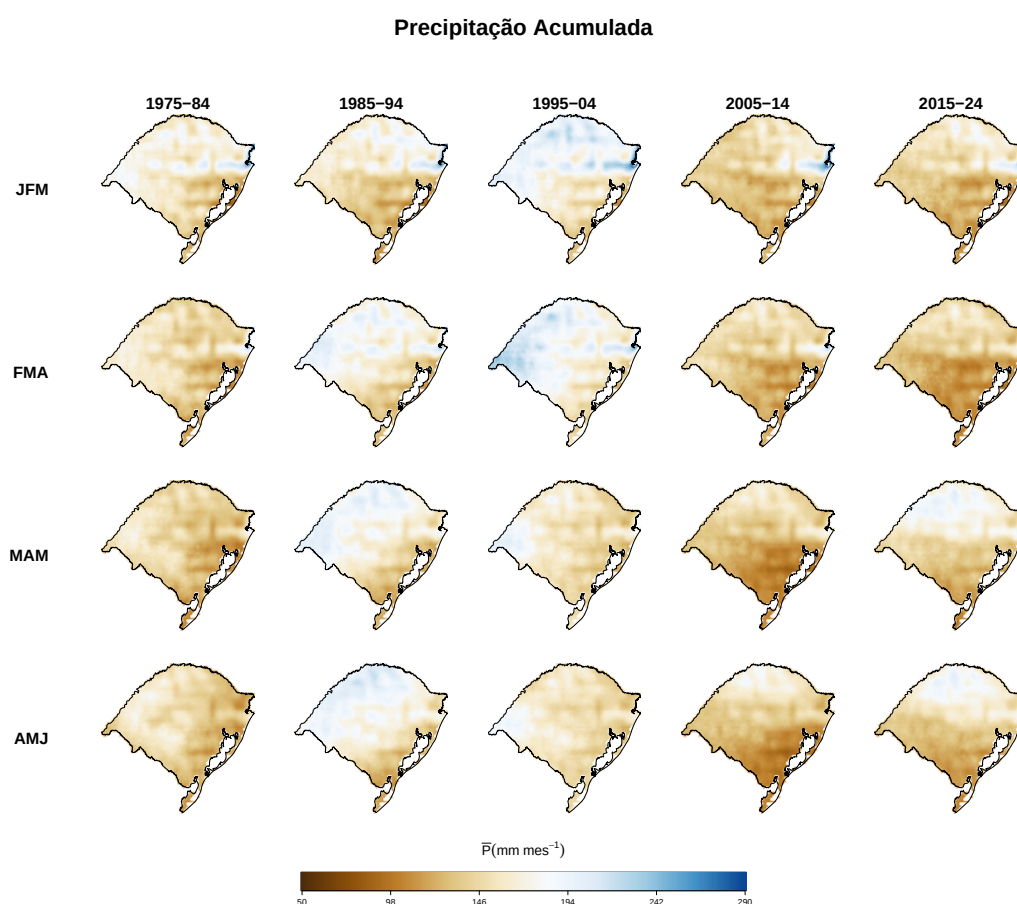
As Fig. 28 a 30 apresentam as médias trimestrais da precipitação acumulada, organizadas por década, permitindo observar tanto a sazonalidade da chuva no RS quanto sua distribuição espacial ao longo do tempo. Diferentemente da temperatura, a precipitação apresenta maior heterogeneidade espacial, com contrastes regionais mais marcados entre diferentes áreas do estado. Assim, esse conjunto de figuras permite identificar em quais trimestres os maiores acumulados tendem a ocorrer e como esses padrões variam entre as décadas.

O padrão espacial mais recorrente é a presença de maiores acumulados no norte

e nordeste do estado e menores valores no sul e sudoeste, embora a intensidade desse contraste varie conforme o trimestre. Esse comportamento aparece de forma mais clara nos trimestres da primavera e do início do verão, quando as áreas de maiores acumulados no setor norte se tornam mais evidentes. Já nos trimestres de outono e inverno, a distribuição da precipitação tende a ficar relativamente mais homogênea em algumas décadas, embora o padrão regional dominante ainda possa ser reconhecido.

Na Fig. 28, que reúne os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ, observa-se que, no final do verão e ao longo do outono, a precipitação já apresenta uma organização espacial relativamente persistente no estado. Em JFM e FMA, os maiores acumulados se distribuem com mais frequência no norte e nordeste, enquanto o sul e parte do oeste apresentam valores menores. Esse contraste continua visível em MAM e AMJ, embora em alguns períodos a distribuição se torne um pouco mais homogênea. De forma geral, mesmo fora do pico da primavera, a metade norte do estado tende a manter precipitação média superior à observada na metade sul.

Figura 28 – Médias trimestrais da precipitação total no RS por década, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.

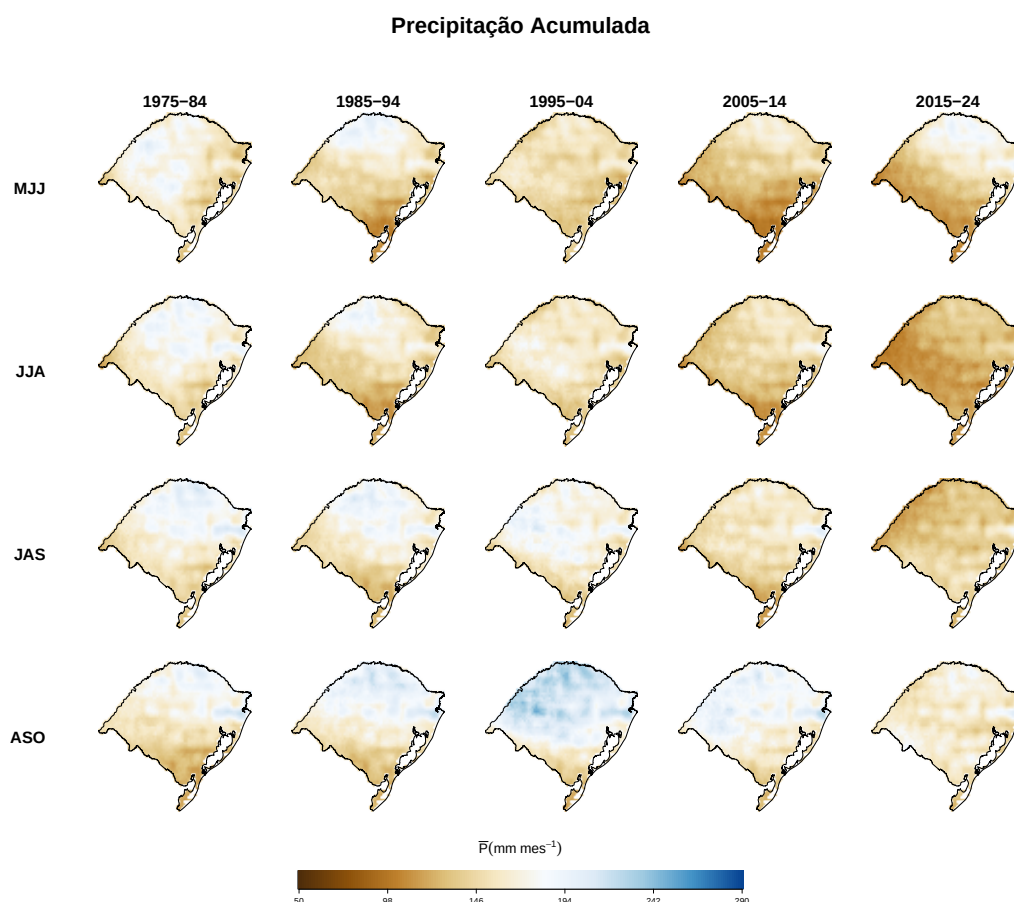


Fonte: Autor (2025).

Na Fig. 29, referente aos trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO, observa-se a continui-

dade da chuva ao longo do ano, sem caracterizar uma estação seca definida. Em MJJ e JJA, os acumulados tendem a ser mais moderados e, em algumas décadas, a distribuição aparece relativamente mais uniforme. No entanto, em JAS e principalmente em ASO, volta a se destacar o aumento dos acumulados no norte e nordeste, enquanto o sul e sudoeste permanecem com valores menores em várias décadas. Esse comportamento indica que, na transição do inverno para a primavera, a intensificação da precipitação tende a ocorrer de forma mais expressiva nas porções setentrionais do estado.

Figura 29 – Médias trimestrais da precipitação total no RS por década, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.



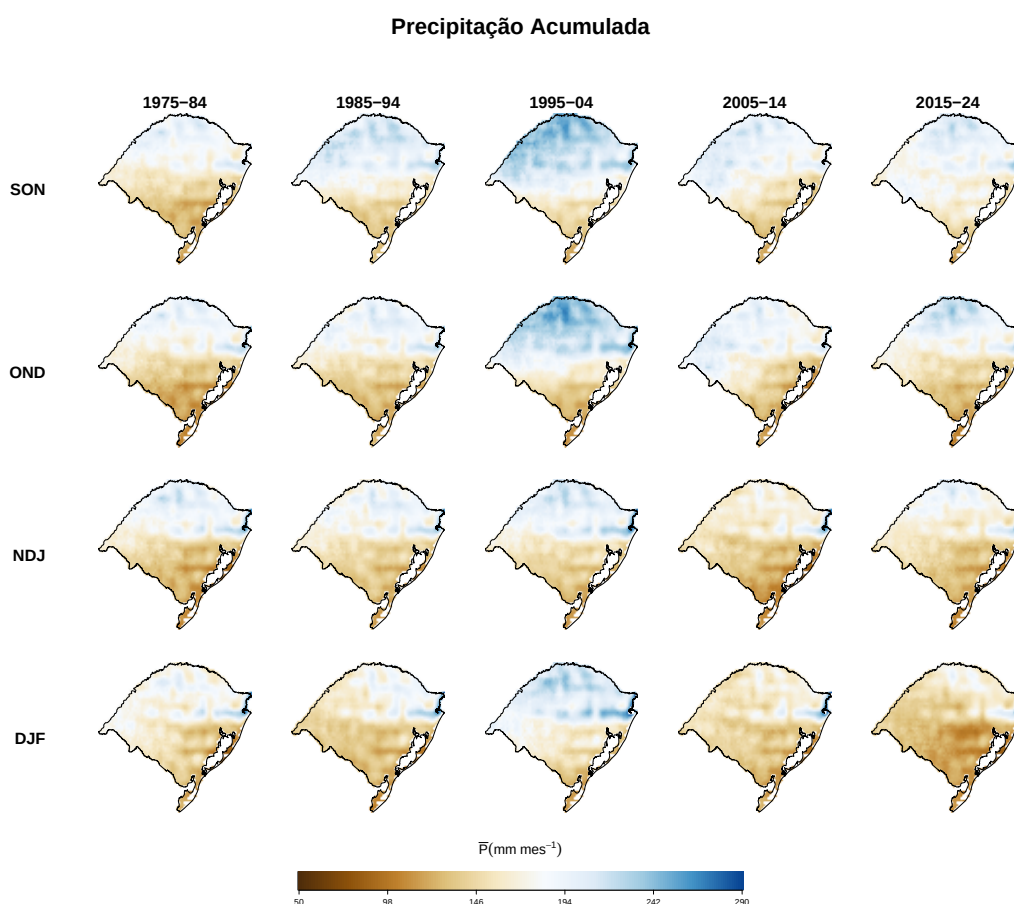
Fonte: Autor (2025).

A Fig. 30, que reúne os trimestres SON, OND, NDJ e DJF, mostra com maior clareza o contraste espacial da precipitação. Em SON e OND, os maiores acumulados se concentram de forma mais nítida no norte e nordeste, enquanto a metade sul apresenta valores relativamente menores. Esse padrão permanece em NDJ e DJF, ainda que com alguma variação entre as décadas. Assim, se evidencia que a primavera e o início do verão correspondem ao período em que a organização espacial da precipitação se torna mais marcada, reforçando o predomínio de maiores acumulados no norte do estado.

Quando se compara o conjunto das décadas, percebe-se que a intensidade desses

contrastes varia ao longo do tempo, mas sem alterar o padrão espacial predominante. Em algumas décadas, os maiores acumulados no norte aparecem de forma mais intensa e abrangente; em outras, a diferença entre as regiões se mostra um pouco mais moderada. Ainda assim, o comportamento geral se mantém, indicando que a precipitação no RS possui uma climatologia espacial persistente, mesmo com a variabilidade temporal observada entre os períodos analisados.

Figura 30 – Médias trimestrais da precipitação total no RS por década, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.



Fonte: Autor (2025).

As Fig. 28 a 30 mostram que a precipitação no RS apresenta forte variabilidade sazonal e espacial, mas conserva um padrão recorrente de maiores acumulados no norte e nordeste e menores volumes no sul e sudoeste, especialmente na primavera e no início do verão. Esse resultado reforça a importância de analisar a precipitação em escala regional, já que sua distribuição é mais heterogênea do que a da temperatura, e fornece a base climatológica necessária para interpretar, nas etapas seguintes, a relação entre chuva, umidade do solo e déficit de pressão de vapor.

As Fig. 31 a 33 apresentam as anomalias trimestrais da precipitação total em relação à média, organizadas por década. Diferentemente das figuras anteriores, que mostra-

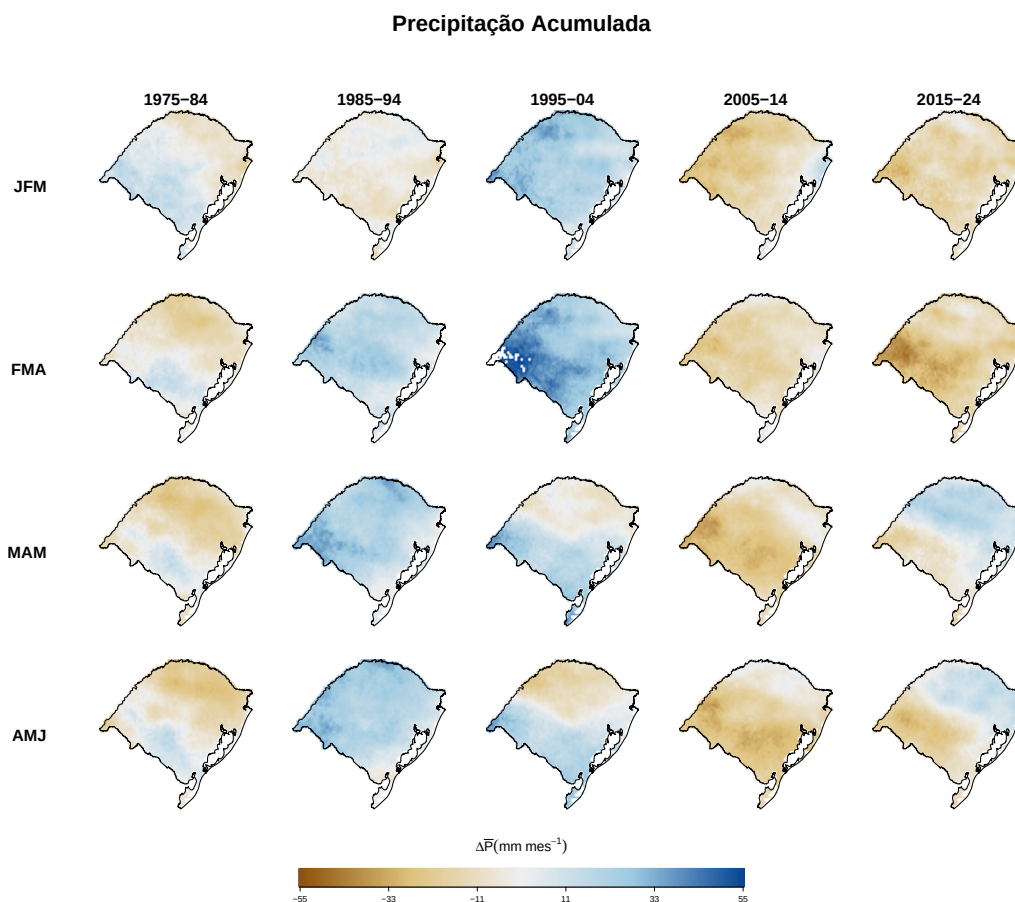
vam os acumulados absolutos, aqui o foco está no desvio da precipitação em relação ao padrão climatológico. Essa representação permite identificar com mais clareza os períodos em que houve excesso ou déficit de chuva e como esse comportamento variou entre as décadas.

Nas três figuras, as anomalias de precipitação mostram maior variabilidade espacial e temporal do que as observadas para a temperatura. Enquanto a temperatura apresenta um sinal mais contínuo ao longo das décadas, a precipitação alterna entre períodos relativamente mais úmidos e mais secos, com diferenças marcantes entre os trimestres do ano.

Na Fig. 31, que reúne os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ, observa-se forte contraste entre as décadas. Em 1975–84, predominam anomalias negativas em FMA, MAM e AMJ, indicando final do verão e outono mais secos que a média em grande parte do estado. Em 1985–94, esse padrão se altera, com FMA, MAM e AMJ passando a apresentar anomalias positivas, sugerindo condições relativamente mais úmidas.

Na década 1995–04, o sinal positivo se intensifica, principalmente em JFM e FMA, com anomalias úmidas mais amplas no estado. Já em 2005–14, o padrão volta a se inverter, com predomínio de anomalias negativas em praticamente todos os trimestres da figura. Em 2015–24, esse comportamento continua, embora de forma menos uniforme, com JFM e FMA ainda mais secos e MAM e AMJ mostrando distribuição mais mista. Assim, se evidencia alternância entre décadas mais secas e mais úmidas no final do verão e durante o outono.

Figura 31 – Diferença da média por década da precipitação total acumulada mensal com relação à média para todo o período, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.

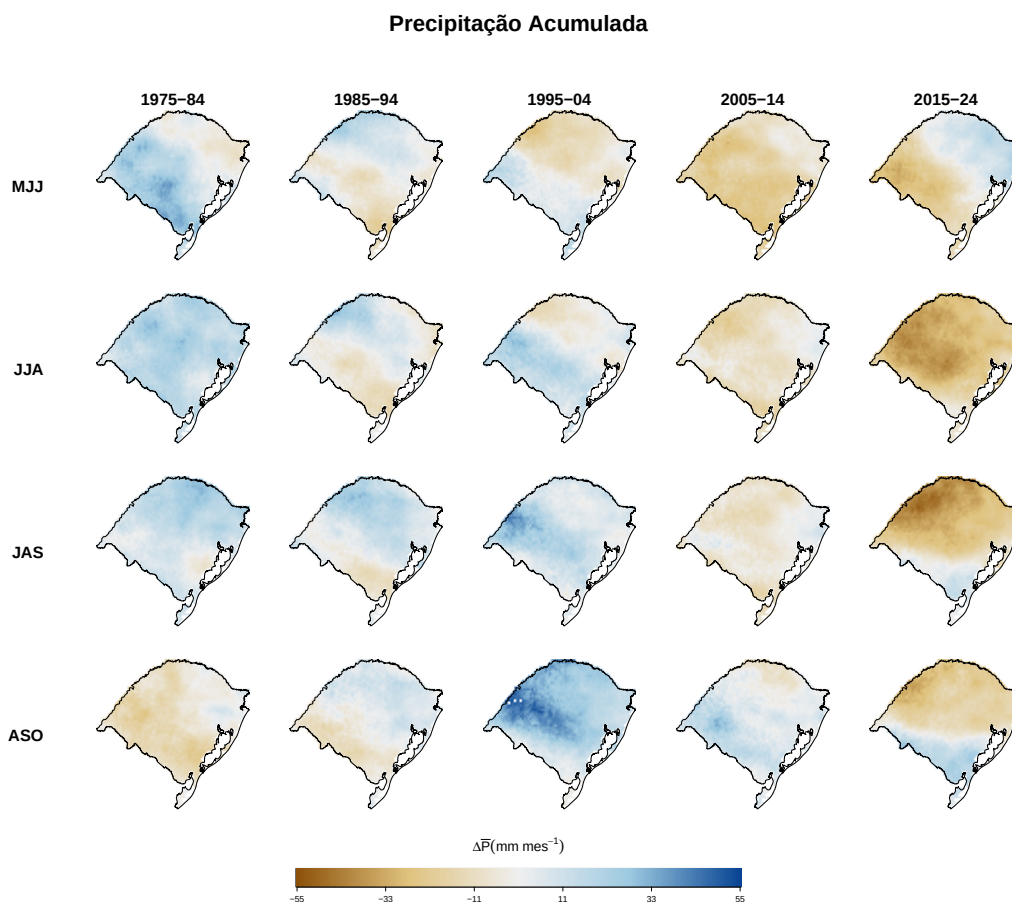


Fonte: Autor (2025).

Na Fig. 32, referente aos trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO, também se observa variação importante entre as décadas. Em 1975–84, predominam anomalias positivas em MJJ, JJA e JAS, indicando inverno relativamente mais úmido que a média. Em 1985–94, esse sinal enfraquece, com alguns trimestres mais próximos da neutralidade e outros com áreas negativas, principalmente no sul do estado.

Em 1995–04, destacam-se anomalias positivas mais fortes em ASO, enquanto os demais trimestres mostram comportamento mais misto. Já em 2005–14, há mudança para um padrão mais seco, sobretudo em MJJ, JJA e JAS, com predomínio de anomalias negativas. Em 2015–24, o contraste permanece, com JJA, JAS e ASO apresentando anomalias negativas mais amplas. A Figura 29 mostra, portanto, que o inverno e a transição para a primavera também foram marcados por alternância entre períodos mais úmidos e mais secos.

Figura 32 – Diferença da média por década da precipitação total acumulada mensal com relação à média para todo o período, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.

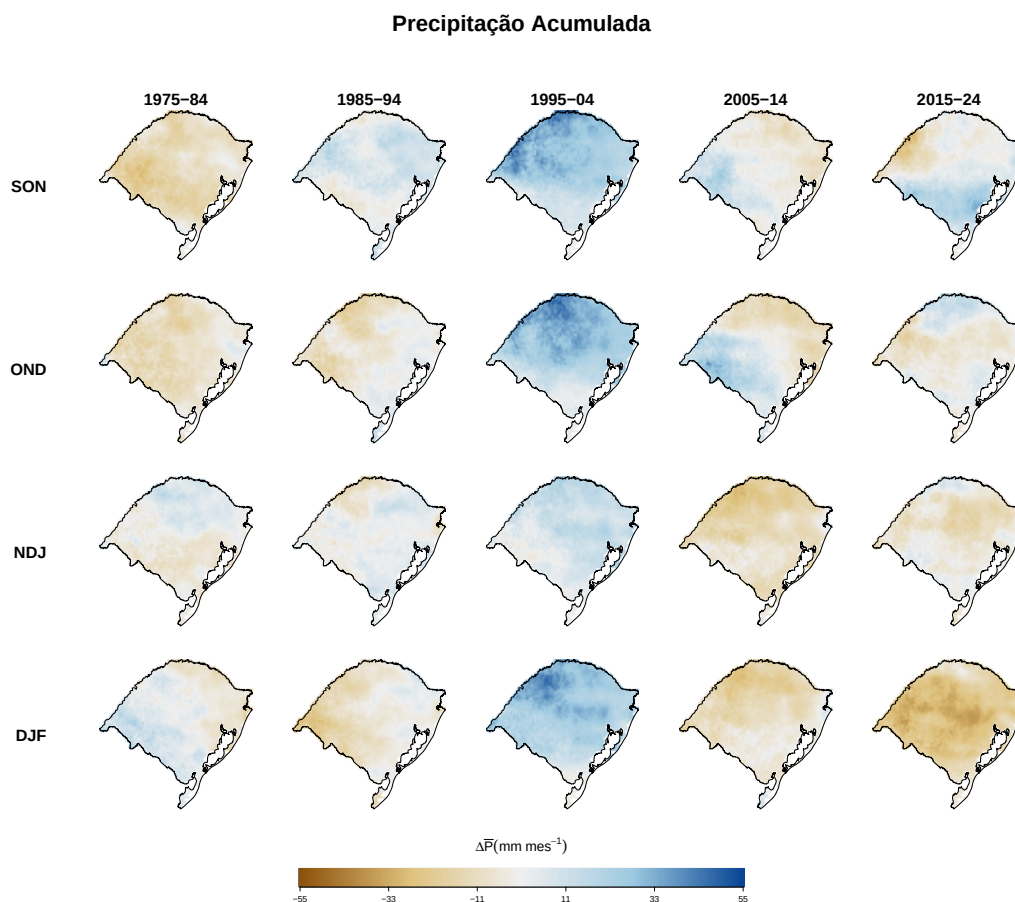


Fonte: Autor (2025).

A Fig. 33, que reúne os trimestres SON, OND, NDJ e DJF, evidencia essa alternância de forma ainda mais clara. Em 1975–84, predominam anomalias negativas em praticamente todos os trimestres, com destaque para SON, OND e DJF, indicando primavera e início do verão relativamente mais secos. Em 1985–94, o padrão continua majoritariamente seco em OND e DJF, embora com áreas próximas da neutralidade em parte do estado.

Na década 1995–04, ocorre mudança mais marcada, com predomínio de anomalias positivas em SON, OND e DJF, caracterizando uma década relativamente mais úmida nesses trimestres. Em 2005–14, o comportamento volta a se aproximar da neutralidade ou de condições levemente secas, especialmente em OND e DJF. Em 2015–24, a primavera apresenta padrão mais misto, mas NDJ e principalmente DJF mostram novamente anomalias negativas mais amplas, sugerindo redução da precipitação em relação à média no início e no auge do verão.

Figura 33 – Diferença da média por década da precipitação total acumulada mensal com relação à média para todo o período, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.



Fonte: Autor (2025).

As Fig. 31 a 33 mostram que a precipitação apresenta variações mais irregulares entre as décadas do que a temperatura. Enquanto na temperatura o sinal de aquecimento aparece de forma mais contínua, na precipitação observa-se alternância entre décadas relativamente mais úmidas e mais secas. Além disso, esse comportamento muda conforme o trimestre analisado, indicando que a variabilidade da chuva no Rio Grande do Sul é mais dependente da sazonalidade.

4.2.3 Déficit de Pressão de Vapor (VPD)

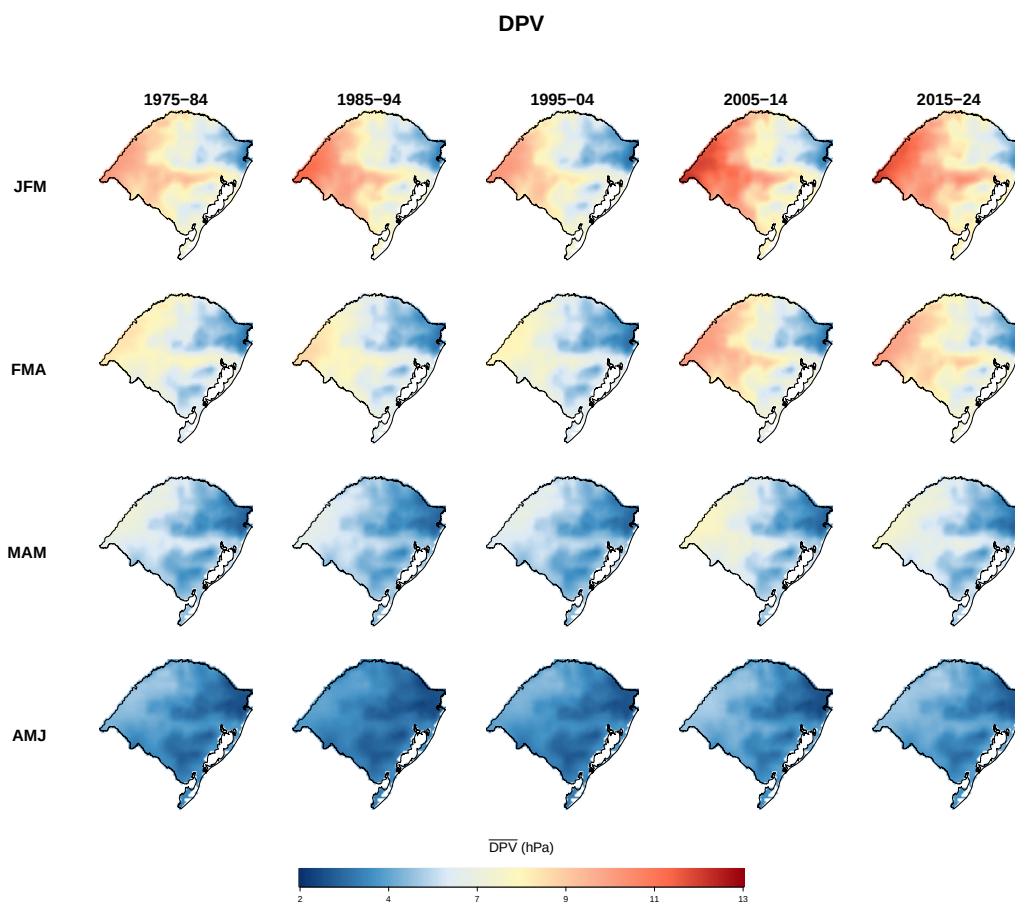
As Fig. 34 a 36 apresentam as médias trimestrais do déficit de pressão de vapor, organizadas por década, permitindo observar a variação sazonal do DPV no RS e sua distribuição espacial ao longo do tempo. Como o DPV integra os efeitos da temperatura e da umidade do ar, sua distribuição mostra com clareza os períodos do ano em que a atmosfera apresenta maior ou menor demanda evaporativa. Dessa forma, esse conjunto de figuras permite identificar tanto o contraste entre os trimestres quentes e frios quanto os padrões regionais mais persistentes no estado.

Nas três figuras, o sinal sazonal é bastante evidente. Os menores valores de DPV concentram-se nos trimestres mais frios, especialmente entre MJJ, JJA e JAS, quando predominam tonalidades associadas a valores baixos em praticamente todo o estado. Já os maiores valores aparecem nos trimestres mais quentes, principalmente em NDJ e DJF, quando a atmosfera se torna mais seca em termos relativos e a demanda evaporativa aumenta. Os trimestres de transição, como SON, OND, FMA e MAM, mostram valores intermediários, marcando a passagem entre esses dois regimes.

Outro aspecto que se mantém ao longo das décadas é o padrão espacial do DPV. Em termos gerais, os maiores valores tendem a se concentrar no oeste, noroeste e parte do centro do estado, enquanto os menores valores aparecem com mais frequência na faixa leste e costeira, além de setores mais ao sul. Esse contraste é coerente com a influência da continentalidade no interior e com a maior disponibilidade relativa de umidade próxima ao litoral, o que reduz o DPV nessas áreas.

Na Fig. 34, que reúne os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ, observa-se de forma clara a transição entre o final do verão e o avanço do outono. Em JFM, os valores de DPV ainda são elevados, com destaque para o oeste e o noroeste do estado, enquanto a faixa leste apresenta valores relativamente menores. Em FMA, esse padrão permanece, mas com redução gradual da intensidade. Já em MAM e, principalmente, em AMJ, ocorre diminuição mais acentuada do DPV em todo o estado, indicando o enfraquecimento da demanda atmosférica com a entrada no período mais frio do ano.

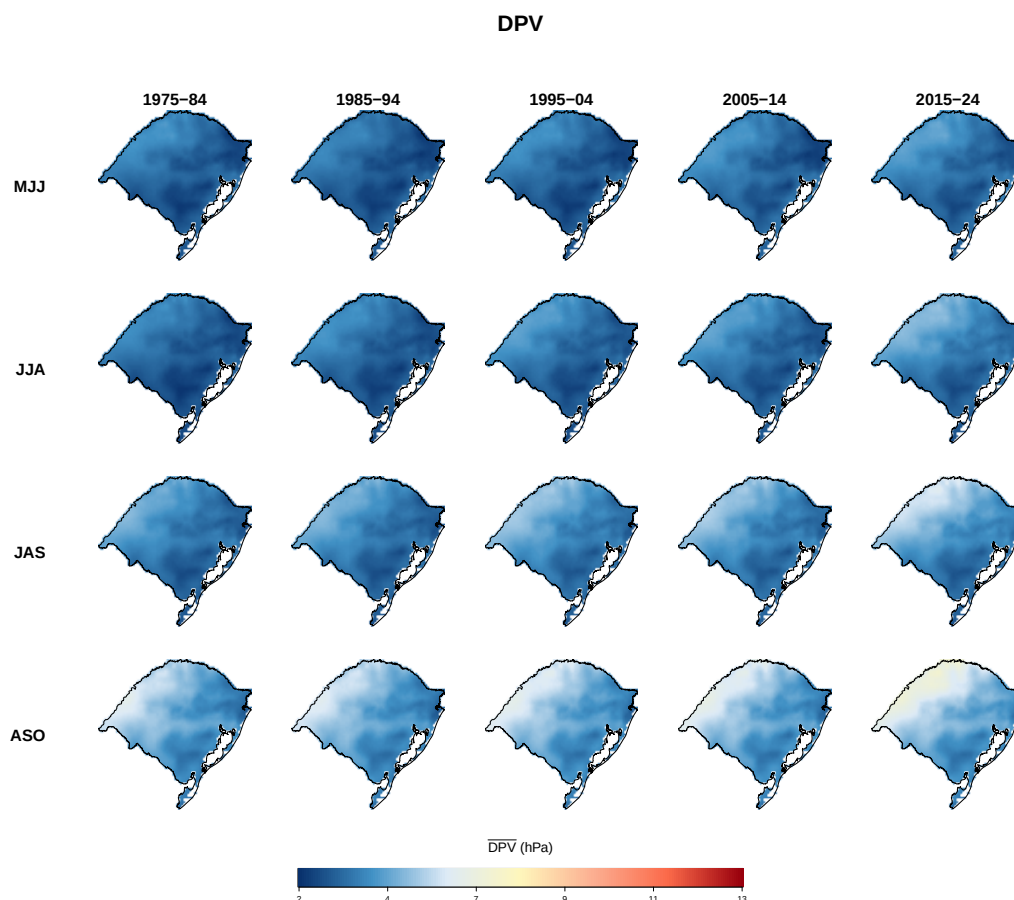
Figura 34 – Médias trimestrais do DPV no RS por década, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.



Fonte: Autor (2025).

Na Fig. 35, referente aos trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO, predominam os menores valores de DPV de todo o ciclo anual. Em MJJ e JJA, o estado apresenta distribuição bastante homogênea de baixos valores, refletindo a combinação entre temperaturas mais baixas e menor capacidade atmosférica de reter vapor d'água. Em JAS e ASO, observa-se início da retomada do DPV, embora ainda com valores relativamente baixos. Nesse período, o contraste espacial começa a reaparecer de forma gradual, especialmente com aumento mais perceptível no interior do estado.

Figura 35 – Médias trimestrais do DPV no RS por década, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.



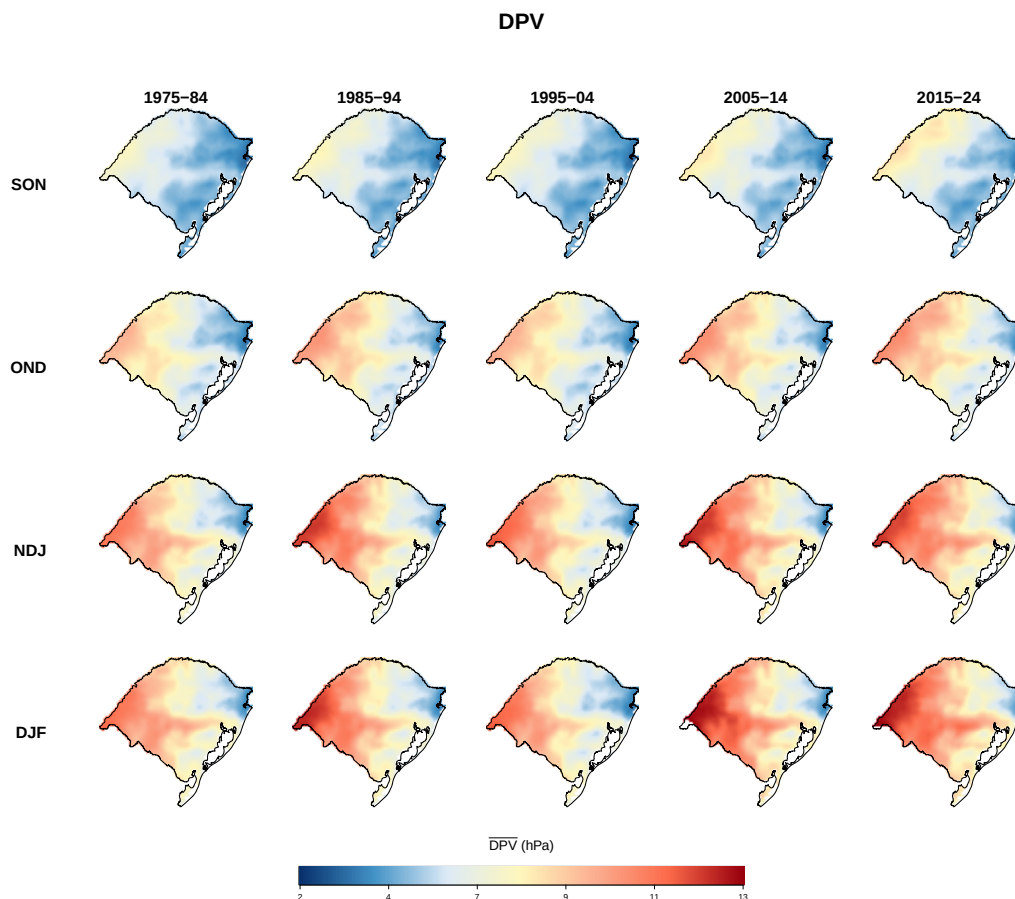
Fonte: Autor (2025).

A Fig. 36, que reúne os trimestres SON, OND, NDJ e DJF, mostra com maior clareza o aumento do DPV ao longo da primavera e do verão. Em SON, os valores ainda são intermediários, mas já se nota intensificação no oeste e no noroeste. Em OND, esse padrão se acentua, com expansão das áreas de DPV mais elevado. Em NDJ e DJF, aparecem os maiores valores de todo o conjunto, com destaque mais forte para o interior do estado, principalmente oeste, noroeste e parte da região central, enquanto o leste e o litoral permanecem com valores relativamente menores. Esse comportamento mostra que a primavera e o verão concentram o período de maior demanda atmosférica por água no RS.

Quando se comparam as décadas, o padrão espacial geral do DPV se mantém relativamente estável, mas nota-se que, em algumas décadas mais recentes, os valores elevados dos trimestres quentes se tornam mais amplos e mais intensos, especialmente em OND, NDJ e DJF. Essa diferença não é tão uniforme em todos os trimestres, mas sugere intensificação do DPV principalmente no período quente, o que é coerente com o aumento das temperaturas e com o fortalecimento da demanda evaporativa nas últimas

décadas.

Figura 36 – Médias trimestrais do DPV no RS por década, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.



Fonte: Autor (2025).

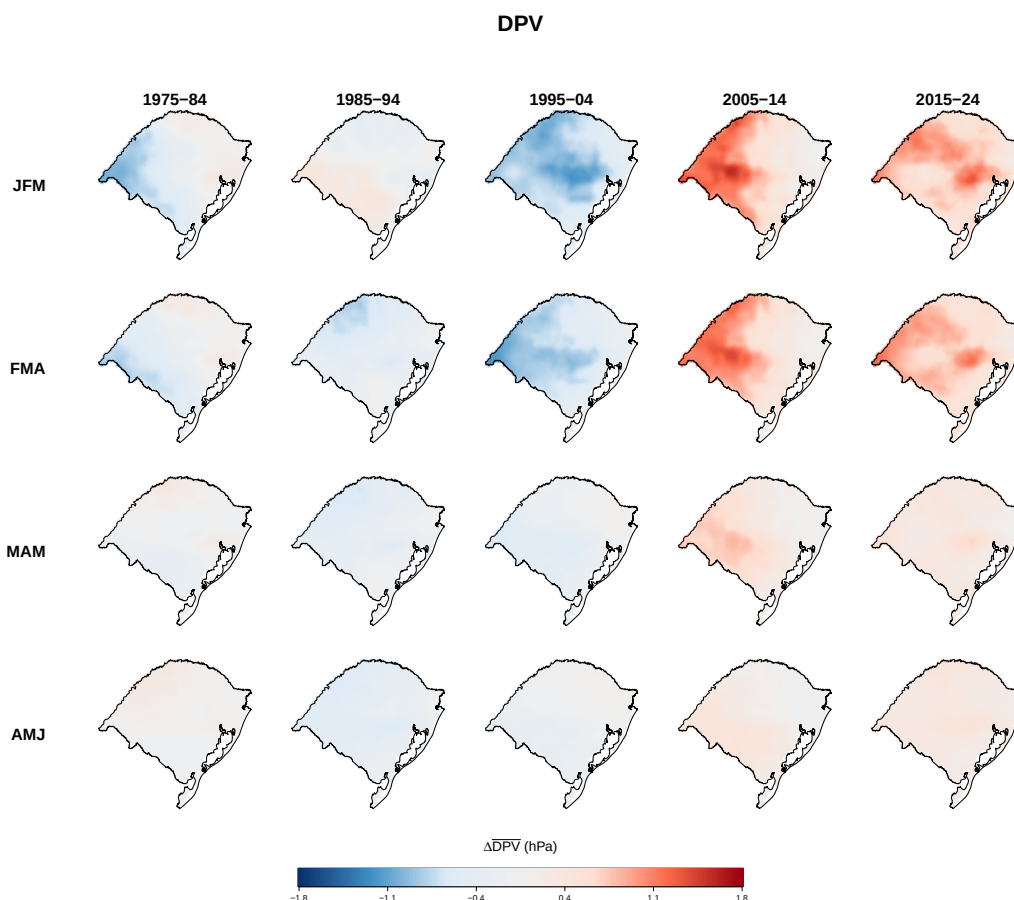
As Fig. 34 a 36 mostram, portanto, que o DPV no RS apresenta forte sazonalidade, com mínimos no inverno e máximos na primavera e no verão, além de um padrão espacial persistente de maiores valores no interior e menores valores na faixa leste e costeira. Esse comportamento é particularmente relevante para o estudo, pois indica que os períodos e regiões com maior DPV coincidem com condições atmosféricas mais favoráveis ao estresse hídrico das culturas, especialmente quando combinadas com deficiência de precipitação e redução da umidade do solo.

As Fig. 37 a 39 apresentam as anomalias trimestrais do déficit de pressão de vapor em relação à média, organizadas por década. Enquanto nas figuras anteriores foram mostrados os valores absolutos de DPV, aqui o foco está no quanto cada trimestre ficou acima ou abaixo do padrão climatológico. Essa representação permite identificar com mais clareza em quais períodos a atmosfera esteve relativamente mais seca ou mais úmida em termos de demanda evaporativa, além de mostrar como esse comportamento mudou ao longo das décadas.

Observa-se uma transição entre as décadas mais antigas e as mais recentes. Nas primeiras décadas, principalmente em 1975–84 e em parte 1995–04, aparecem com mais frequência anomalias negativas, sobretudo nos trimestres mais quentes, indicando DPV abaixo da média em grande parte do estado. Já nas décadas mais recentes, especialmente em 2005–14 e 2015–24, passam a predominar anomalias positivas, mostrando que o DPV se tornou mais elevado do que a média em vários trimestres do ano. Esse contraste é mais evidente na primavera e no verão, quando o DPV já é naturalmente mais alto.

Na Fig. 37, que reúne os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ, observa-se que as décadas 1975–84 e 1995–04 apresentam anomalias negativas mais visíveis em JFM e FMA, indicando final do verão relativamente menos seco em termos atmosféricos. Em 1985–94, o sinal fica mais próximo da neutralidade. A partir de 2005–14, ocorre mudança mais clara para anomalias positivas, principalmente em JFM e FMA, padrão que permanece em 2015–24. Em MAM e AMJ, o sinal aparece de forma mais fraca em todas as décadas, indicando que, na transição para o outono e início do inverno, o DPV tende a permanecer mais próximo da média.

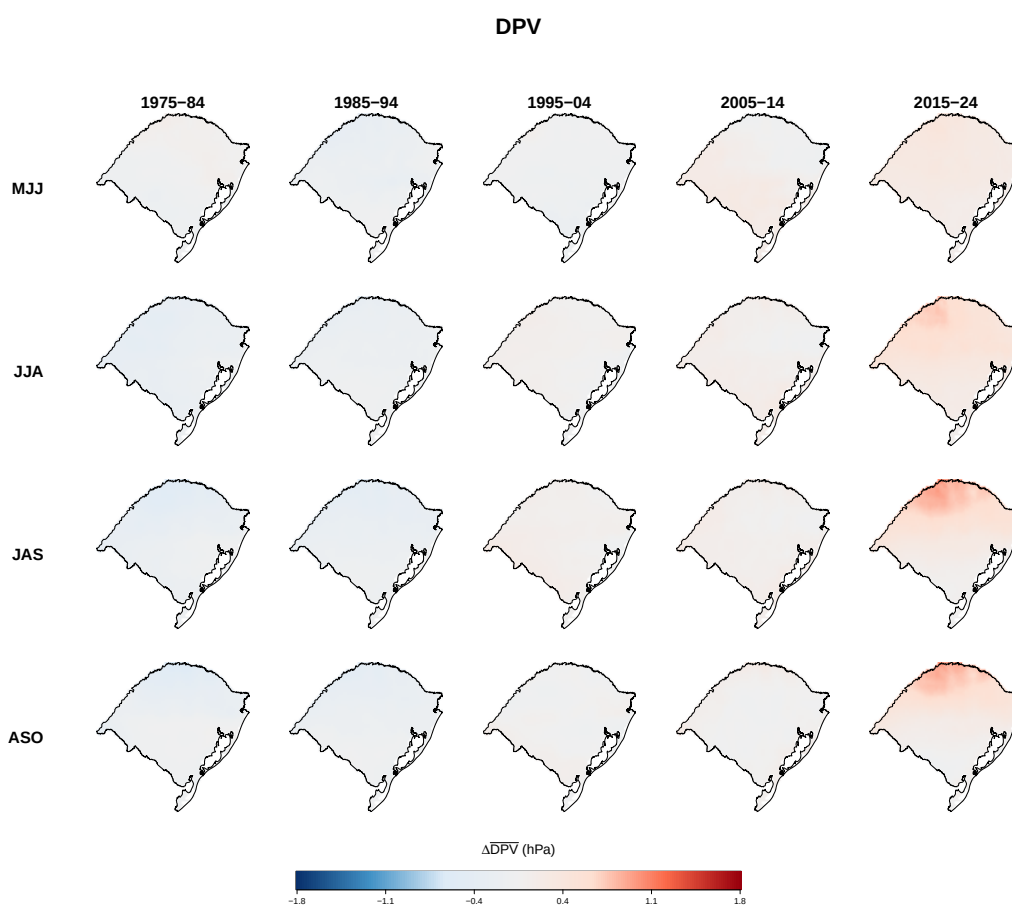
Figura 37 – Diferença entre a média decadal de DPV com relação à média para todo o período, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.



Fonte: Autor (2025).

Na Fig. 38, correspondente aos trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO, predominam anomalias de menor intensidade, o que é coerente com os menores valores absolutos de DPV no período frio do ano. Em 1975–84 e 1985–94, ainda aparecem anomalias negativas em parte do estado, principalmente em JJA, JAS e ASO. Nas décadas seguintes, esse sinal vai enfraquecendo, e em 2015–24 passam a surgir anomalias positivas mais visíveis, sobretudo em JAS e ASO, mostrando que o aumento do DPV também passou a atingir o final do inverno e a transição para a primavera, embora de forma mais moderada do que nos trimestres quentes.

Figura 38 – Diferença entre a média decadal de DPV com relação à média para todo o período, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.

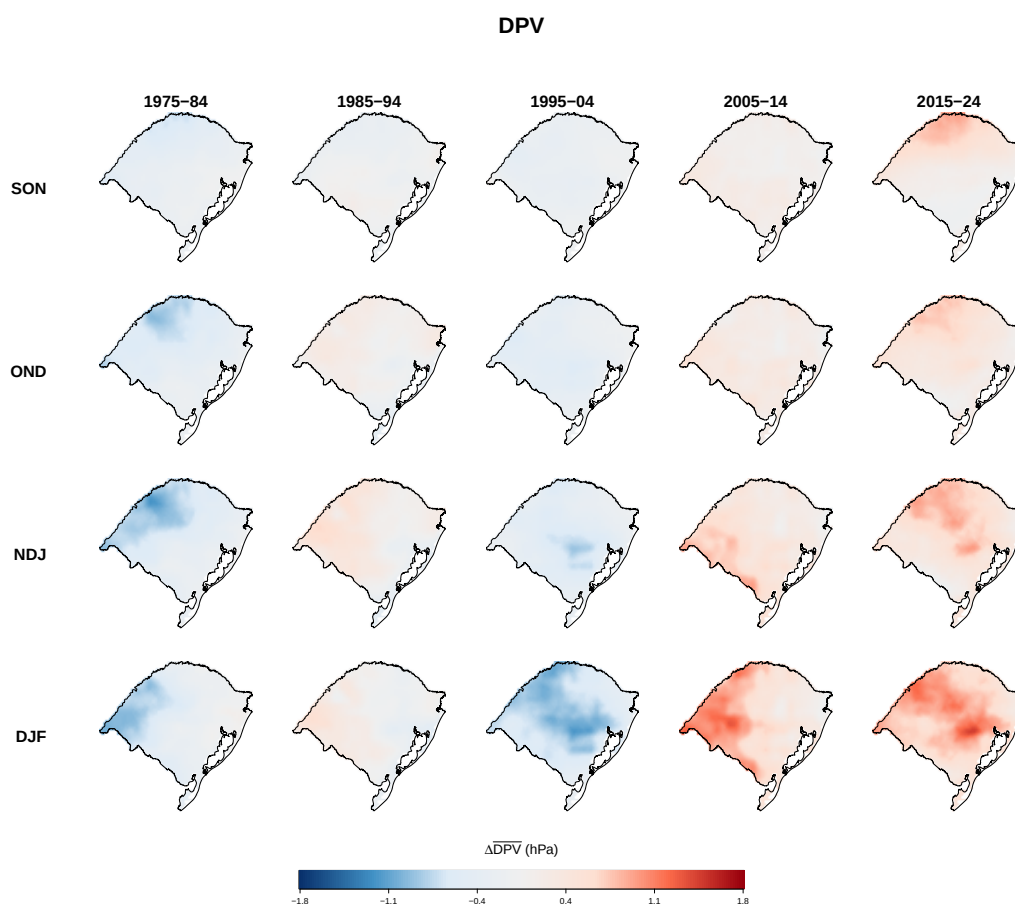


Fonte: Autor (2025).

A Fig. 39, que reúne os trimestres SON, OND, NDJ e DJF, é a que mostra de forma mais clara a mudança do sinal ao longo das décadas. Em 1975–84, predominam anomalias negativas, especialmente em OND, NDJ e DJF. Em 1985–94, o comportamento se aproxima mais da neutralidade, enquanto em 1995–04 voltam a aparecer anomalias negativas em parte importante do estado. A mudança mais evidente ocorre em 2005–14 e se intensifica em 2015–24, quando passam a predominar anomalias positivas em todos os trimestres da figura, especialmente em NDJ e DJF. Isso indica que o DPV aumentou

de forma mais clara justamente na primavera e no verão, períodos em que a demanda evaporativa já é naturalmente maior.

Figura 39 – Diferença entre a média decadal de DPV com relação à média para todo o período, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.



Fonte: Autor (2025).

As Fig. 37 a 39 mostram, portanto, uma transição entre décadas com maior presença de anomalias negativas e décadas recentes marcadas por anomalias positivas, principalmente na primavera e no verão. Esse resultado indica que o aumento do DPV no RS passou a se intensificar justamente no período em que a atmosfera apresenta maior potencial de secagem e, conseqüentemente, maior risco de estresse atmosférico para as culturas.

4.2.4 Umidade Volumétrica do Solo (SWVL1)

A variável umidade do solo L1 corresponde à umidade volumétrica da camada mais superficial do solo, estimada a partir do conjunto de dados ERA5-Land. No caso da variável SWVL1, essa camada representa aproximadamente os primeiros 7 cm do solo, ou seja, a porção mais diretamente influenciada pela precipitação recente, pela evaporação e pelas

trocas com a atmosfera.

A unidade utilizada é $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, a qual representa a fração do volume do solo ocupada por água. Dessa forma, valores mais elevados indicam maior armazenamento hídrico na camada superficial, enquanto valores menores indicam condições de maior secagem do solo. Por se referir à porção mais superficial, essa variável é particularmente relevante para a análise da disponibilidade hídrica mais imediata, especialmente nos períodos quentes, quando a perda de água por evaporação e transpiração tende a ser mais intensa.

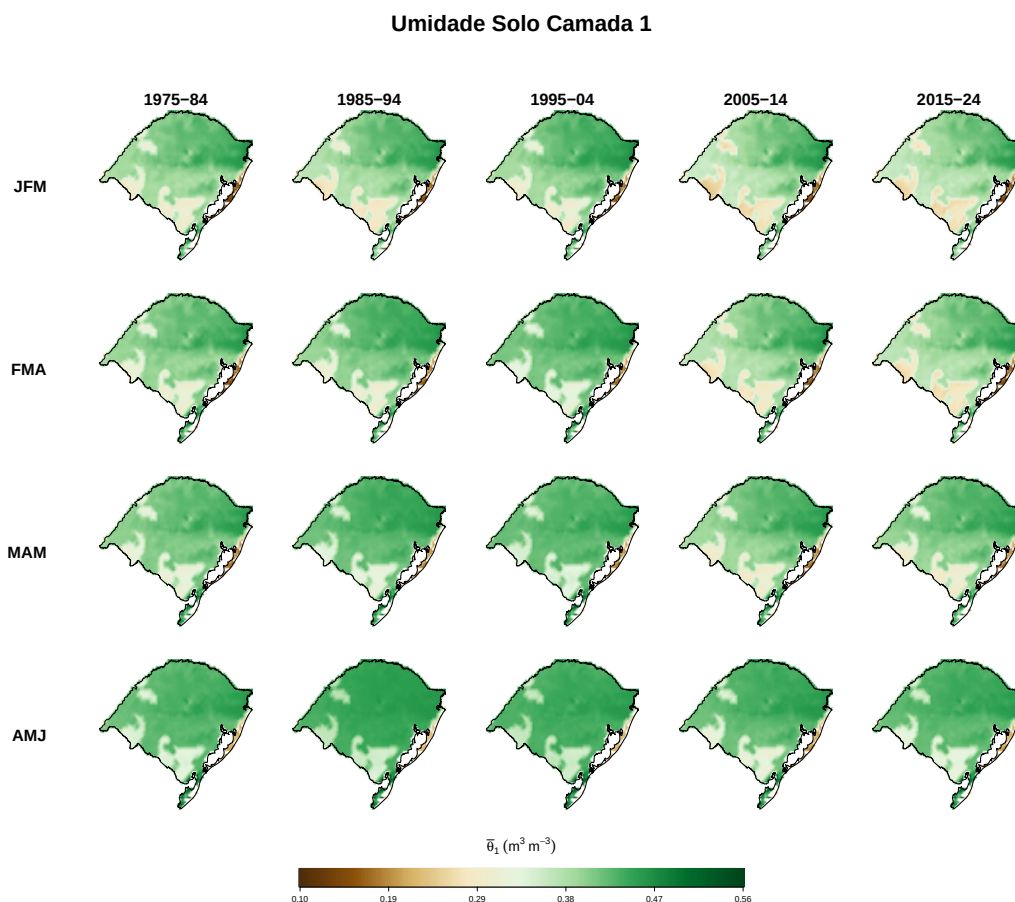
As Fig. 40 a 42 apresentam as médias trimestrais da umidade do solo L1 por década, permitindo analisar a sazonalidade da água armazenada na camada superficial e sua distribuição espacial no RS ao longo do tempo. Esse conjunto é importante porque possibilita identificar os períodos do ano em que o solo superficial tende a permanecer mais úmido ou mais seco, bem como reconhecer os padrões espaciais dominantes entre as diferentes regiões do estado.

O comportamento sazonal da variável é relativamente bem definido. Os maiores valores de umidade do solo superficial tendem a ocorrer nos trimestres mais frios, quando a demanda atmosférica é menor e a perda de água por evaporação é reduzida. Em contrapartida, os menores valores ocorrem com maior frequência nos trimestres mais quentes, sobretudo durante a primavera tardia e o verão, período em que o aumento da temperatura e do DPV favorece a secagem da camada superficial.

Também se observa um contraste espacial recorrente entre o norte e nordeste do estado, que em muitos trimestres apresentam valores relativamente mais elevados de umidade do solo, e as áreas do oeste, sudoeste e parte do sul, nas quais os menores valores aparecem com maior frequência. Esse padrão indica que a distribuição da água na camada superficial do solo resulta da interação entre precipitação, demanda atmosférica e características regionais do terreno, mantendo certa persistência espacial ao longo das décadas.

Na Fig. 40, que reúne os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ, observa-se a transição entre o final do verão e o avanço do outono. Em JFM e FMA, predominam os menores valores de umidade superficial, principalmente em áreas do interior do estado, evidenciando condições de maior secagem da camada mais rasa do solo. Em MAM e, sobretudo, em AMJ, a umidade tende a aumentar e sua distribuição espacial se torna mais homogênea, indicando a recuperação gradual do armazenamento hídrico superficial à medida que a demanda evaporativa diminui.

Figura 40 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L1 no RS por década, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.



Fonte: Autor (2025).

Na Fig. 41, correspondente aos trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO, predominam os maiores valores médios de umidade do solo L1 em praticamente todo o estado. Esse comportamento é mais evidente em MJJ e JJA, caracterizando o período de maior armazenamento hídrico na camada superficial. Em JAS e ASO, embora os valores ainda permaneçam relativamente elevados, já se observa, em algumas décadas, o início de uma redução em áreas do interior, acompanhando a transição para a primavera.

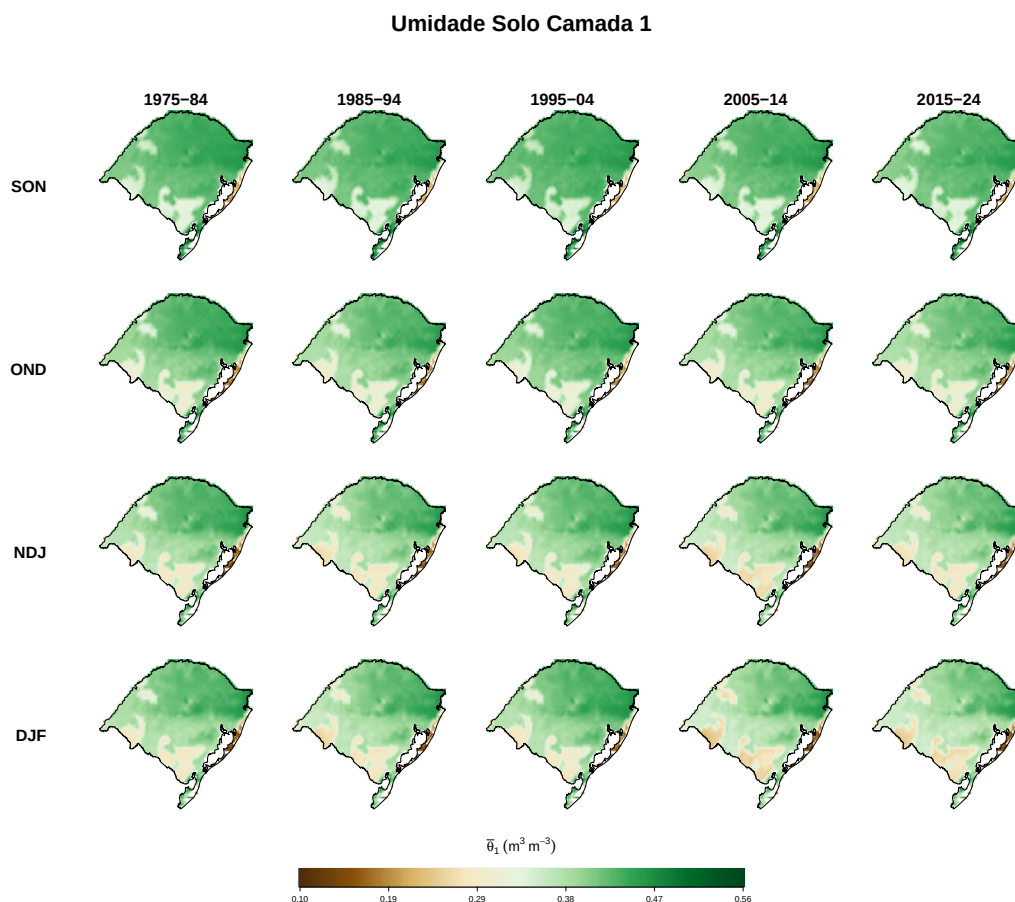
Figura 41 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L1 no RS por década, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 42, que reúne os trimestres SON, OND, NDJ e DJF, evidencia de forma mais clara a diminuição da umidade superficial ao longo da primavera e do verão. Em SON e OND, o solo ainda mantém valores intermediários em parte do estado, mas já se nota redução mais expressiva no oeste e sudoeste. Em NDJ e DJF, os menores valores tornam-se mais abrangentes, indicando intensificação da secagem superficial justamente no período de maior aquecimento e maior demanda atmosférica por água.

Figura 42 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L1 no RS por década, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.



Fonte: Autor (2025).

Considerando o conjunto das Fig. 40 a 42, quando comparadas as décadas, observa-se que o padrão sazonal e espacial da umidade do solo superficial se mantém relativamente estável, embora ocorram variações na intensidade dos valores entre os diferentes períodos. Em algumas décadas, os trimestres quentes apresentam áreas secas mais extensas, enquanto em outras a distribuição se mostra mais homogênea. Ainda assim, o comportamento dominante permanece o mesmo: maior umidade no período frio e menor umidade no período quente, com secagem mais acentuada nas áreas interiores do estado.

Assim, demonstram que a umidade do solo L1 apresenta forte controle sazonal e espacial no RS, com maiores valores no inverno e menores valores na primavera e no verão, além de um padrão recorrente de maior retenção hídrica no norte e nordeste e maior secagem superficial no oeste e sudoeste. Esse comportamento é particularmente relevante para o presente estudo, pois fornece a base para compreender, nas etapas seguintes, de que maneira a disponibilidade de água no solo interage com a precipitação e com o aumento do déficit de pressão de vapor ao longo do ano.

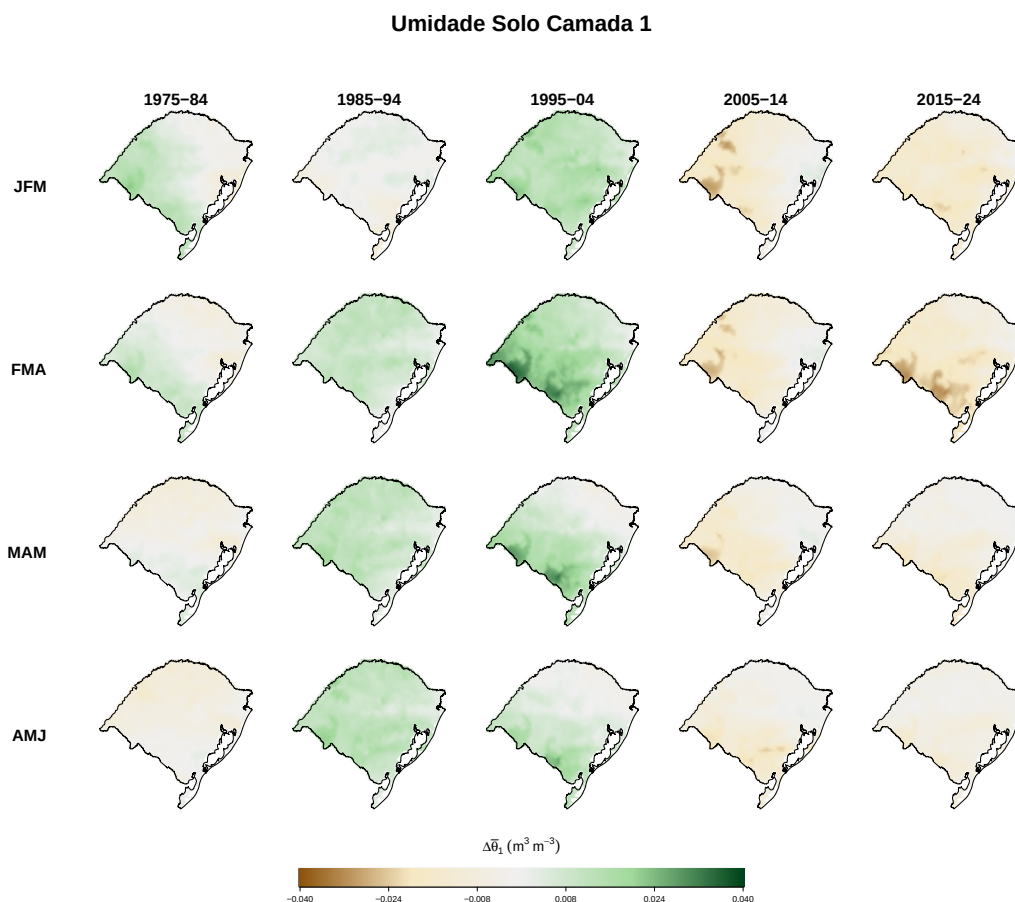
As Fig. 43 a 45 apresentam a diferença trimestral da umidade do solo na camada

L1 em relação à média, organizada por década. Enquanto nas figuras anteriores foram mostrados os valores absolutos da umidade do solo superficial, aqui o foco está no desvio em relação ao padrão climatológico. Essa representação permite identificar com maior clareza os períodos em que a camada mais superficial do solo esteve relativamente mais úmida ou mais seca do que a média e como esse comportamento variou ao longo das décadas.

Nas três figuras, observa-se uma mudança importante no sinal das diferenças entre as décadas. Nas décadas 1975–84, 1985–94 e 1995–04, predominam com maior frequência diferenças positivas em vários trimestres do ano, indicando maior armazenamento de água no solo superficial em relação à média. Já nas décadas mais recentes, principalmente em 2005–14 e 2015–24, passam a predominar diferenças negativas, mostrando redução da umidade superficial em grande parte do estado. Esse contraste é mais evidente nos trimestres quentes, quando a camada superficial do solo responde de forma mais direta ao aumento da demanda atmosférica.

Na Fig. 43, que reúne os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ, observa-se que as décadas 1975–84, 1985–94 e, principalmente, 1995–04 apresentam diferenças positivas mais amplas, sobretudo em JFM e FMA, indicando que o final do verão e o início do outono apresentavam solo superficial mais úmido do que a média em grande parte do estado. Em MAM e AMJ, esse comportamento ainda aparece, embora com intensidade um pouco menor. A partir de 2005–14, o sinal se inverte e passam a predominar diferenças negativas, padrão que se mantém em 2015–24, indicando maior secagem da camada superficial nesses trimestres.

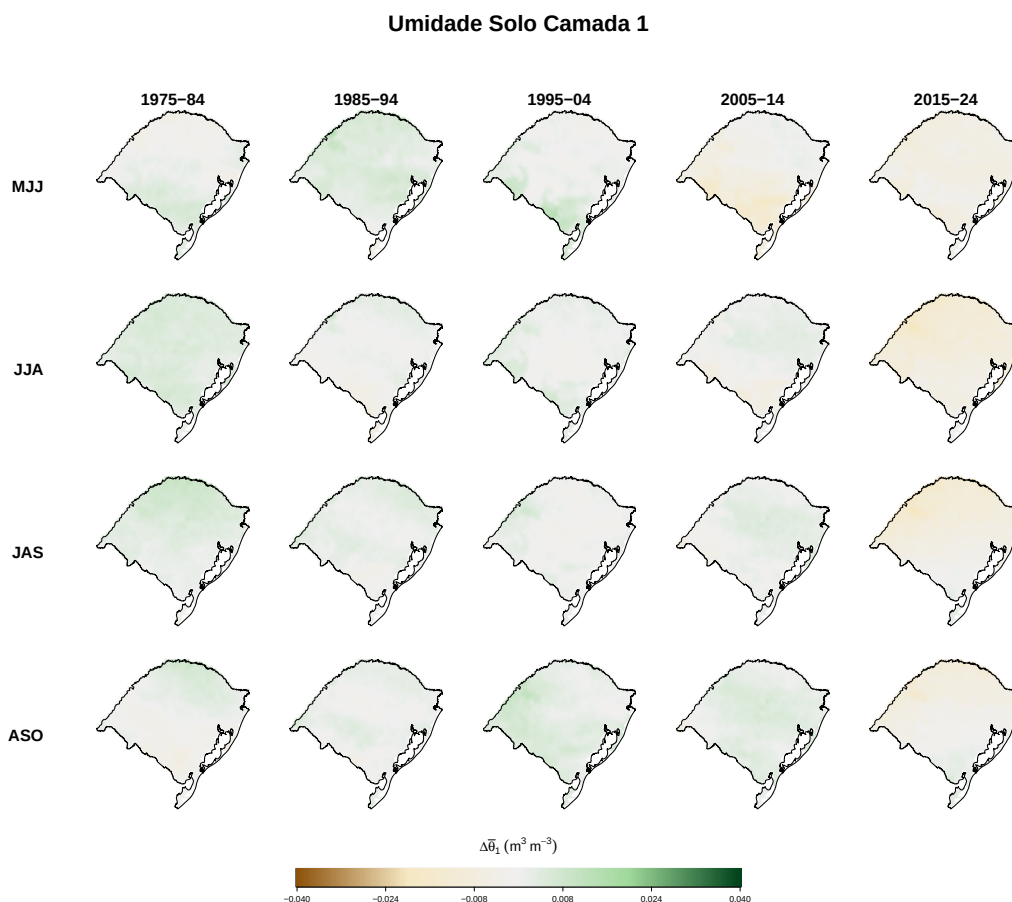
Figura 43 – Diferença da umidade do solo, por década na camada L1 no RS com relação à média de todo o período, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.



Fonte: Autor (2025).

Na Fig. 44, correspondente aos trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO, as diferenças tendem a ser menos intensas do que nos trimestres quentes, mas o contraste entre as décadas permanece visível. Em 1975-84 e 1985-94, predominam diferenças levemente positivas, principalmente em MJJ, JAS e ASO, sugerindo solo superficial mais úmido do que a média durante boa parte do período frio. Em 1995-04, o sinal continua próximo da neutralidade ou levemente positivo em parte do estado. Já em 2005-14, esse padrão se torna mais fraco e, em 2015-24, passam a aparecer diferenças negativas mais claras, especialmente em JJA, JAS e ASO, indicando menor armazenamento hídrico superficial também na transição entre inverno e primavera.

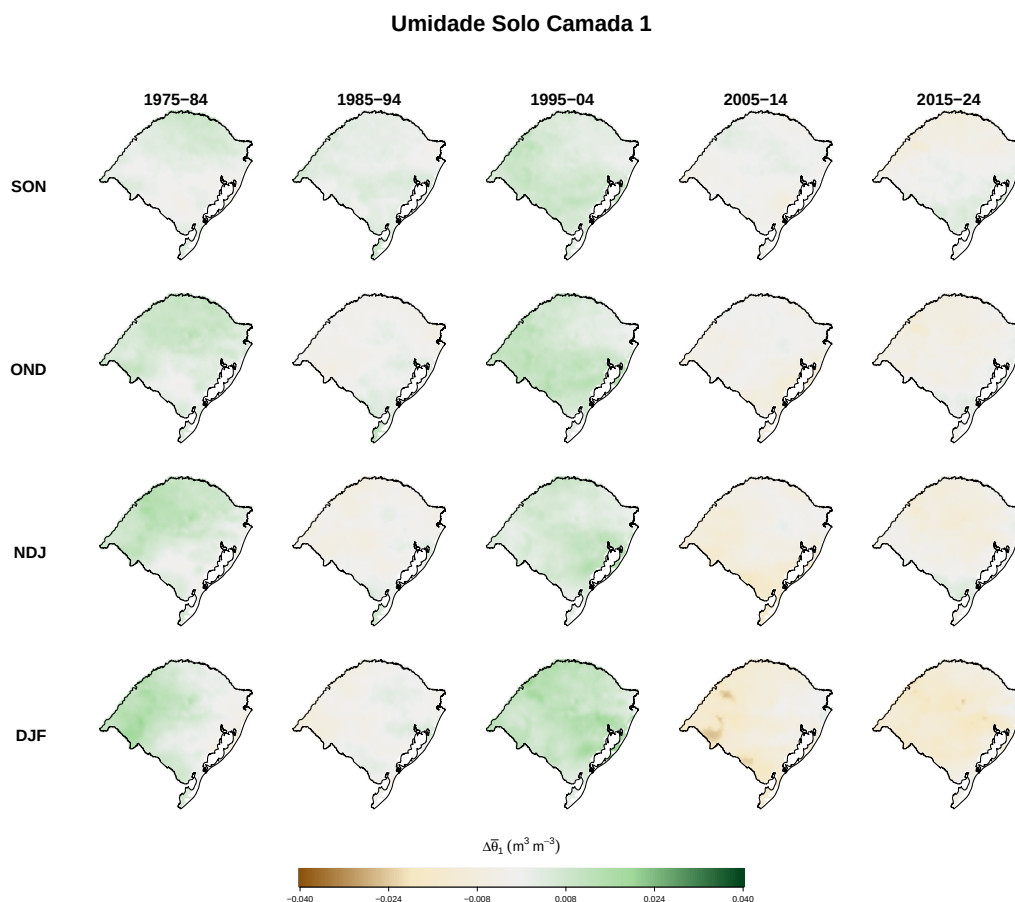
Figura 44 – Diferença da umidade do solo, por década na camada L1 no RS com relação à média de todo o período, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 45, que reúne os trimestres SON, OND, NDJ e DJF, mostra de forma mais nítida a mudança do comportamento da variável entre as décadas. Em 1975–84 e 1995–04, predominam diferenças positivas em praticamente todos os trimestres da figura, com destaque para OND, NDJ e DJF, indicando condições mais úmidas que a média na primavera e no verão. Em 1985–94, o sinal aparece mais enfraquecido, com valores próximos da neutralidade em parte do estado. Já em 2005–14 e, principalmente, em 2015–24, passam a predominar diferenças negativas, mais evidentes em OND, NDJ e DJF, mostrando que a primavera tardia e o verão recentes apresentam maior secagem da camada superficial do solo em relação ao padrão climatológico.

Figura 45 – Diferença da umidade do solo, por década na camada L1 no RS com relação à média de todo o período, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.



Fonte: Autor (2025).

As Fig. 43 a 45 mostram, portanto, uma transição entre décadas com maior presença de diferenças positivas e décadas recentes marcadas por diferenças negativas da umidade do solo L1 em relação à média. Esse comportamento se destaca principalmente na primavera e no verão, quando a secagem superficial se intensifica. Esse resultado é relevante porque indica que, nas décadas mais recentes, a camada mais superficial do solo passou a apresentar menor disponibilidade hídrica em relação à média justamente no período de maior aquecimento e maior demanda atmosférica por água.

As Fig. 70 a 72 do Apêndice C apresentam as médias trimestrais da umidade do solo na camada L2, permitindo avaliar a sazonalidade e a distribuição espacial do armazenamento hídrico em uma camada mais profunda do perfil. Em comparação com a camada superficial, a umidade em L2 apresenta padrão mais estável no espaço e menor contraste entre décadas, o que é compatível com a maior inércia hídrica dessa camada. Ainda assim, a sazonalidade é bem definida, com maiores valores nos trimestres mais frios, especialmente entre MJJ, JJA e JAS, e menores valores nos trimestres quentes, sobretudo em OND, NDJ e DJF. No padrão espacial, observa-se recorrência de maiores valores no

norte e nordeste e menores valores no oeste, sudoeste e parte do sul do estado.

A comparação entre décadas mostra que a organização espacial da umidade do solo L2 se mantém relativamente constante, sendo as diferenças mais evidentes na intensidade dos valores do que na estrutura do padrão regional. Em algumas décadas, os trimestres quentes apresentam expansão mais ampla das áreas relativamente secas no interior do estado, enquanto em outras a distribuição é mais homogênea. Ainda assim, o comportamento dominante permanece o mesmo: maior armazenamento hídrico no período frio e menor umidade na primavera e no verão, com secagem mais evidente nas áreas interiores. Esse resultado reforça que a camada L2 responde de forma mais amortecida à variabilidade atmosférica de curto prazo, preservando, porém, a sinalização sazonal e regional do balanço hídrico no estado.

As Fig. 73 a 75 do Apêndice C apresentam a diferença da umidade do solo L2 em relação à média, organizada por trimestre e por década. Por se tratar de uma camada subsuperficial, a L2 responde de forma mais amortecida do que a camada superficial, mas ainda preserva sinal claro de sazonalidade e variabilidade interdecadal. O padrão espacial mostra recorrência de diferenças negativas mais intensas no sul, sudoeste e parte do oeste, enquanto o norte e nordeste tendem a apresentar valores mais próximos da média ou, em algumas décadas, diferenças ligeiramente positivas. O aspecto mais importante do conjunto é a transição entre décadas antigas, nas quais ainda predominavam diferenças positivas ou próximas da neutralidade, e as últimas décadas, em que passam a prevalecer anomalias mais secas, especialmente nos trimestres quentes.

Na Fig. 73 do Apêndice C, que reúne JFM, FMA, MAM e AMJ, observa-se que 1975–84 e 1995–04 ainda apresentam diferenças positivas em parte importante do estado, sobretudo em JFM e FMA, indicando armazenamento hídrico em L2 acima da média no final do verão e início do outono. A partir de 2005–14, e com maior clareza em 2015–24, esse padrão se inverte, com predomínio de diferenças negativas, principalmente em JFM e FMA, mostrando que o final do verão recente passou a apresentar umidade abaixo da média nessa camada.

Na Fig. 74 do Apêndice C, correspondente a MJJ, JJA, JAS e ASO, o contraste é menos intenso, mas ainda assim se nota que as décadas antigas mantêm sinal mais úmido ou próximo da neutralidade, enquanto 2015–24 apresenta diferenças negativas mais amplas, indicando que o sinal de secagem relativa também avançou sobre parte do período frio.

E na Fig. 75 do Apêndice C, que reúne SON, OND, NDJ e DJF, é a que mostra a mudança mais evidente: nas décadas 1975–84 e 1995–04 predominam diferenças positivas, especialmente em OND, NDJ e DJF, ao passo que em 2005–14 e, sobretudo, em 2015–24, passam a predominar anomalias mais secas, mais extensas e mais contínuas espacialmente. Assim, o conjunto das figuras indica que a umidade do solo L2 tem apresentado desvios cada vez mais negativos nas últimas décadas, principalmente na pri-

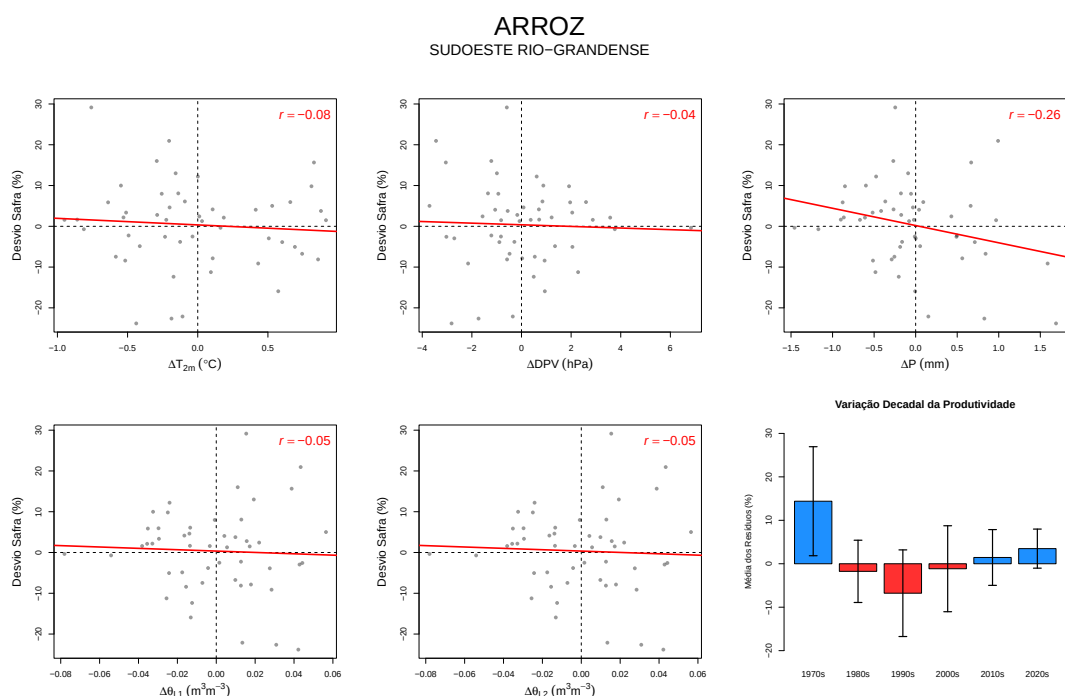
mavera e no verão, reforçando a presença de um sinal recente de secagem relativa nessa camada do solo.

Considerando que a discussão principal deste estudo foi concentrada na camada mais superficial da umidade do solo, em razão de sua resposta mais imediata às condições atmosféricas e de sua maior relação com os processos de superfície, optou-se por apresentar as médias climatológicas e as anomalias das camadas mais profundas, L3 e L4, da Fig. 76 a 87 no Apêndice C. Essa organização permite complementar a análise com informações sobre o comportamento hídrico em maiores profundidades.

4.3 Relação entre variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo com o desvio da produtividade do Arroz por mesorregiões do RS

A Fig. 46 apresenta a relação entre o desvio da produtividade do arroz na Região Sudoeste Rio-Grandense e as variações de temperatura a 2 m, DPV, precipitação, umidade do solo L1, umidade do solo L2 e a distribuição decadal dos resíduos de produtividade. Em conjunto, os diagramas de dispersão permitem avaliar a direção e a intensidade da associação linear entre a variabilidade ambiental e os desvios de safra observados na região.

Figura 46 – Relação entre o desvio da produtividade do arroz na região Sudoeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



Fonte: Autor (2025).

A relação com a temperatura a 2 m é fraca e negativa ($r = -0,08$). Embora a reta de ajuste apresente leve inclinação descendente, a ampla dispersão dos pontos indica

que os desvios térmicos não se associaram de forma linear consistente às variações da produtividade. Esse resultado sugere que, para o arroz irrigado na Região Sudoeste, a temperatura do ar, quando analisada isoladamente, não se destacou como um controlador direto da variabilidade produtiva. Ainda assim, sua relevância agrônômica não deve ser descartada, uma vez que a temperatura interfere em processos fisiológicos importantes, como desenvolvimento fenológico, duração do ciclo, floração e enchimento de grãos. O que a figura indica é que esse efeito, na escala regional e temporal considerada, não se expressou de forma simples e linear.

Para o déficit de pressão de vapor, a correlação também é muito fraca e negativa ($r = -0,04$). A reta de ajuste é praticamente horizontal, e a distribuição dos pontos permanece bastante difusa, sem formação de tendência bem definida. Isso indica que o DPV, isoladamente, teve baixa capacidade de explicar os desvios da produtividade nessa região. Do ponto de vista físico, esse resultado é coerente com o sistema de cultivo do arroz irrigado, no qual a limitação hídrica direta é atenuada pela lâmina de irrigação. Mesmo assim, o DPV continua sendo uma variável relevante, pois expressa a demanda atmosférica por água e pode influenciar o balanço energético, as trocas gasosas e o ambiente do dossel. No entanto, a figura sugere que sua influência sobre a produtividade depende mais da interação com outros fatores do que de um efeito linear isolado.

A precipitação foi o parâmetro que apresentou a associação mais evidente, com correlação negativa fraca ($r = -0,26$). Ainda que a força estatística da relação seja limitada, trata-se do sinal mais consistente entre os parâmetros analisados. Essa associação negativa indica que anos com maiores desvios positivos de precipitação tenderam, em média, a coincidir com desvios mais negativos de produtividade. Para o arroz irrigado, essa resposta é fisicamente plausível e agronomicamente relevante, pois a chuva adicional não representa necessariamente benefício hídrico direto, como em culturas de sequeiro. Nessa condição de cultivo, a precipitação excessiva pode atuar sobretudo por efeitos indiretos, como redução da radiação solar incidente devido ao aumento da nebulosidade, maior permanência de umidade no dossel, condições mais favoráveis a doenças e limitações operacionais no manejo da lavoura. Assim, a correlação negativa não deve ser interpretada como uma relação causal simples entre “mais chuva” e “menor produtividade”, mas como um indicativo de que a variabilidade pluviométrica pode afetar a safra por meio da alteração do ambiente de cultivo e das condições de manejo.

A umidade do solo L1 apresenta correlação fraca e negativa ($r = -0,05$). Como essa camada representa a porção mais superficial do solo, mais sensível à chuva recente e à evaporação, seria esperado algum grau de resposta às variações meteorológicas, porém no RS a cultura de arroz é predominantemente irrigada por alagamento. Assim, a dispersão dos pontos mostra que essa associação foi pouco expressiva para os desvios de produtividade, indicando baixa capacidade explicativa quando analisada isoladamente. Para a umidade do solo L2, a correlação também é fraca e negativa ($r = -0,05$). Mesmo

representando uma camada um pouco mais profunda e relativamente mais estável em termos de armazenamento hídrico, a relação com a produtividade permaneceu pouco definida. Isso sugere que, no contexto do arroz irrigado, a variação da água armazenada nessas camadas não se traduziu diretamente em resposta linear da safra.

O boxplot da variação decadal dos resíduos de produtividade permite comparar a posição central dos dados, a dispersão dos valores centrais da distribuição e a presença de valores extremos entre as décadas. Observa-se que a década de 1970 apresenta mediana positiva e dispersão relativamente ampla, indicando predominância de resíduos acima da neutralidade em parte desse período. As décadas de 1980 e 2000 mostram medianas próximas de zero ou levemente negativas, enquanto a década de 1990 se destaca por mediana mais negativa e maior amplitude para valores baixos, sugerindo fase relativamente menos favorável em termos de desvio produtivo. Nas décadas de 2010 e 2020, as medianas retornam para valores próximos de zero ou ligeiramente positivos, com dispersão moderada. Esse comportamento indica oscilação no padrão dos resíduos ao longo do tempo, sem evidenciar uma tendência contínua de aumento ou redução entre as décadas.

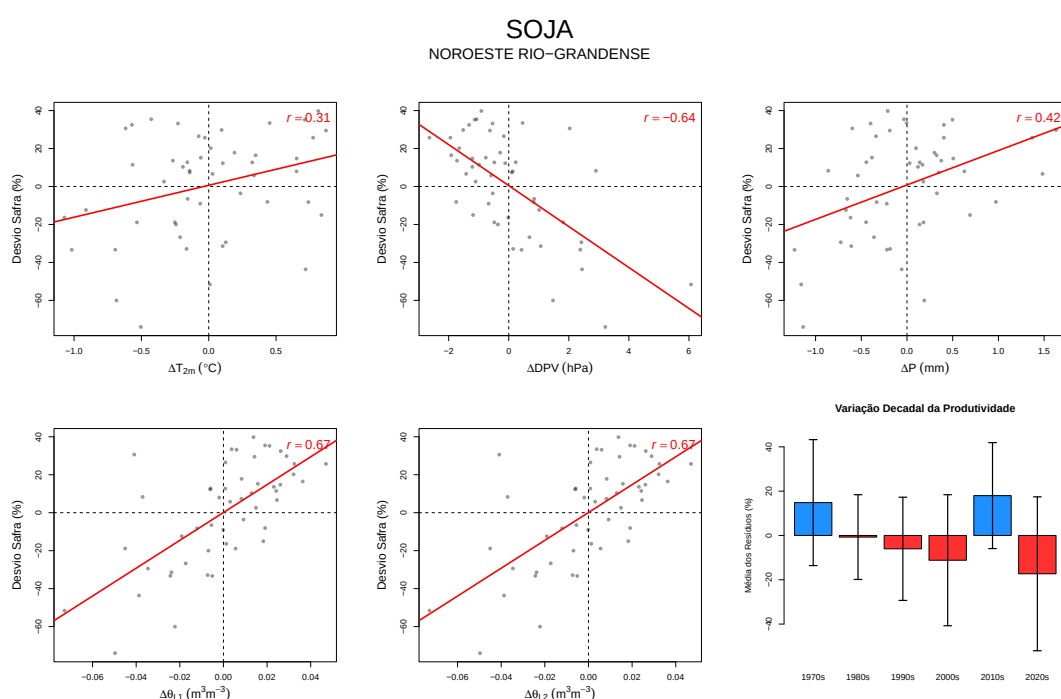
Em síntese, na Região Sudoeste Rio-Grandense, a precipitação foi a variável que apresentou a associação linear mais relevante com o desvio da produtividade do arroz, embora ainda de baixa magnitude. Já temperatura a 2 m, DPV, umidade do solo L1 e umidade do solo L2 exibiram relações lineares bastante fracas. Esse resultado sugere que a variabilidade da safra, nessa região, não depende de um único controlador ambiental isolado, mas da interação entre diferentes fatores meteorológicos, hídricos e operacionais ao longo do ciclo da cultura.

Para a cultura do arroz, a caracterização apresentada no corpo principal concentrou-se na mesorregião Sudoeste, em função de sua relevância no contexto produtivo estadual e de sua capacidade de evidenciar, de forma objetiva, a resposta da cultura às variações climáticas analisadas. As demais mesorregiões avaliadas, Centro Ocidental, Centro Oriental, Metropolitana de Porto Alegre, Nordeste, Noroeste e Sudeste, foram igualmente organizadas e disponibilizadas no Apêndice D, da Fig. 88 a 93, ampliando a visão regional do comportamento da produtividade do arroz e permitindo uma leitura comparativa entre diferentes porções do RS.

4.4 Relação entre variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo com o desvio da produtividade da Soja por mesorregiões do RS

A Fig. 47 apresenta a relação entre o desvio da produtividade da soja na Região Noroeste Rio-Grandense e as variações de temperatura a 2 m, DPV, umidade do solo L1, umidade do solo L2 e a distribuição decadal dos resíduos de produtividade. Nesse caso, os diagramas de dispersão mostram associações lineares mais expressivas, sobretudo para o DPV e para as duas camadas de umidade do solo, indicando maior sensibilidade da cultura às condições hídricas e atmosféricas nessa região.

Figura 47 – Relação entre o desvio da produtividade da soja na região Noroeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



Fonte: Autor (2025).

A relação com a temperatura a 2 m é positiva e de baixa a moderada magnitude ($r = 0,31$). A inclinação ascendente da reta de ajuste indica que desvios positivos de temperatura tenderam a coincidir com desvios positivos de produtividade. Ainda que a dispersão dos pontos permaneça considerável, esse resultado sugere que, no conjunto analisado, anos relativamente mais quentes estiveram associados a melhor desempenho produtivo. Para a soja na Região Noroeste, esse comportamento pode refletir a influência da temperatura sobre o ritmo de desenvolvimento da cultura e sobre a duração de fases fenológicas, desde que não acompanhada por condições atmosféricas excessivamente secas.

O DPV apresenta a associação linear mais forte entre os painéis meteorológicos, com correlação negativa moderada a forte ($r = -0,64$). A reta de ajuste descendente é bem

marcada, mostrando que aumentos no DPV tenderam a coincidir com reduções do desvio da produtividade. Esse resultado é agronomicamente coerente para a soja, sobretudo em sistema de sequeiro, pois valores mais elevados de DPV indicam maior demanda atmosférica por água, favorecendo fechamento estomático, redução da assimilação de carbono e intensificação do estresse hídrico. Assim, entre os parâmetros atmosféricos, o DPV se destaca como um dos principais indicadores da sensibilidade produtiva da soja nessa região.

A precipitação apresenta correlação positiva moderada ($r = 0,42$), indicando que desvios positivos de chuva tenderam a coincidir com desvios positivos de produtividade. A reta de ajuste ascendente e a distribuição dos pontos mostram uma associação mais consistente do que a observada para a temperatura. Esse resultado reforça a importância da disponibilidade hídrica para a soja na Região Noroeste, onde a produtividade é fortemente condicionada pela chuva ao longo do ciclo. Em termos agrônômicos, esse comportamento é esperado, já que maiores volumes de precipitação, quando bem distribuídos, tendem a favorecer o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da cultura, reduzindo o impacto do estresse hídrico.

A umidade do solo L1 apresenta correlação positiva forte ($r = 0,67$). Como essa variável representa a camada mais superficial do solo, mais diretamente influenciada pela chuva recente e pela evaporação, o resultado indica que maior armazenamento hídrico nessa porção do perfil esteve associado a maiores desvios positivos de produtividade. A inclinação acentuada da reta de ajuste e a organização dos pontos mostram que essa relação foi bastante consistente, sugerindo que a condição hídrica da camada superficial teve papel importante no desempenho da cultura na região.

Para a umidade do solo L2, a relação também é positiva forte ($r = 0,67$), com comportamento muito semelhante ao observado para L1. Como L2 corresponde a uma camada mais profunda e relativamente mais estável, essa associação indica que o armazenamento hídrico abaixo da superfície também exerceu influência relevante sobre a produtividade. O fato de L1 e L2 apresentarem correlações igualmente elevadas sugere que, para a soja na Região Noroeste, a disponibilidade de água ao longo do perfil superficial do solo foi um fator central para explicar a variabilidade produtiva entre os anos.

O boxplot da variação decadal da produtividade mostra diferenças tanto na posição central quanto na dispersão dos resíduos entre as décadas. As décadas de 1970 e 2010 apresentam medianas positivas e caixas relativamente elevadas em relação à linha de neutralidade, indicando predominância de resíduos mais favoráveis. Em contraste, as décadas de 1990, 2000 e especialmente 2020 exibem medianas negativas, sugerindo maior frequência de desvios produtivos abaixo da neutralidade. A década de 1980 aparece mais próxima de zero, com menor deslocamento do valor central. Além disso, observa-se amplitude considerável em algumas décadas, o que indica elevada variabilidade interanual da produtividade.

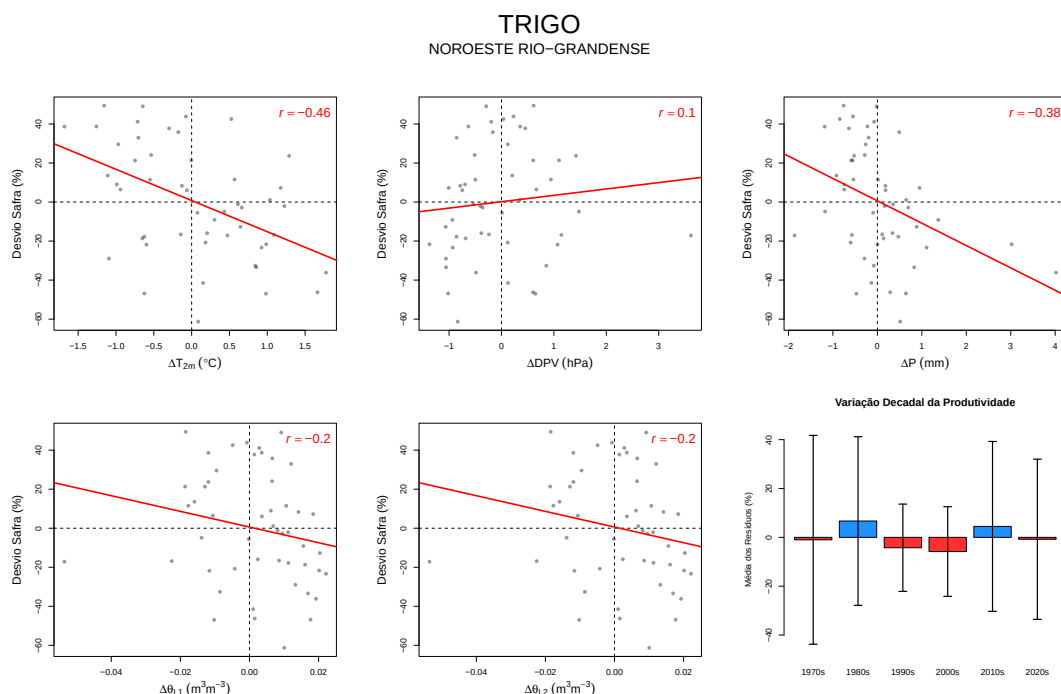
Assim na Região Noroeste Rio-Grandense, a produtividade da soja apresentou associação mais forte com variáveis ligadas à disponibilidade hídrica e ao estresse atmosférico, especialmente DPV, precipitação e umidade do solo. Entre elas, destacam-se a correlação negativa do DPV e as correlações positivas de L1 e L2, evidenciando que anos com maior seca atmosférica tenderam a reduzir a produtividade, enquanto anos com maior disponibilidade de água no solo favoreceram o desempenho da cultura. Esse conjunto de resultados reforça a elevada sensibilidade da soja às condições hídricas na Região Noroeste do RS.

Nesta subseção, a ênfase foi dada à mesorregião Noroeste, por constituir uma área representativa para a análise da variabilidade da produtividade da soja em associação com as condições meteorológicas avaliadas ao longo da série histórica. As demais mesorregiões consideradas para essa cultura, Centro Ocidental, Centro Oriental, Metropolitana de Porto Alegre, Nordeste, Sudeste e Sudoeste, também foram submetidas ao mesmo procedimento analítico e encontram-se reunidas no Apêndice D, da Fig. 94 a 99, possibilitando uma apreciação complementar da distribuição espacial dos padrões produtivos da soja no RS.

4.5 Relação entre variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo com o desvio da produtividade do Trigo por mesorregiões do RS

A Fig. 48 apresenta a relação entre o desvio da produtividade do trigo na Região Noroeste Rio-Grandense e as variações de temperatura a 2 m, DVP, precipitação, umidade do solo L1 e umidade do solo L2, além da distribuição decadal dos resíduos de produtividade. No conjunto, os diagramas de dispersão indicam que a produtividade do trigo, nessa região, apresentou associação linear mais evidente com a temperatura do ar e, em menor intensidade, com a precipitação, enquanto o DPV e a umidade do solo mostraram relações mais fracas.

Figura 48 – Relação entre o desvio da produtividade do trigo na região Noroeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



Fonte: Autor (2025).

A temperatura a 2 m apresentou correlação negativa moderada ($r = -0,46$), constituindo a associação mais nítida entre os parâmetros analisados. A inclinação negativa da reta de ajuste indica que desvios positivos de temperatura tenderam a coincidir com desvios negativos de produtividade. Ainda que a dispersão dos pontos permaneça considerável, o resultado sugere que a variabilidade térmica esteve associada de forma relevante à oscilação produtiva do trigo na região. Essa relação é consistente com a sensibilidade da cultura a condições térmicas desfavoráveis, embora a figura, isoladamente, não permita identificar em quais fases do ciclo esse efeito foi mais determinante.

Para o déficit de pressão de vapor, a correlação foi muito fraca e positiva ($r = 0,10$). A baixa inclinação da reta de ajuste e a elevada dispersão dos pontos indicam ausência

de relação linear bem definida entre o DPV e o desvio da produtividade do trigo na região analisada. Isso sugere que, no conjunto de anos considerado, a demanda atmosférica por água teve baixa capacidade explicativa quando avaliada isoladamente.

A precipitação apresentou correlação negativa fraca a moderada ($r = -0,38$), indicando que anos com desvios positivos de chuva tenderam a coincidir com desvios negativos de produtividade. Esse resultado sugere que a variabilidade pluviométrica esteve associada à resposta produtiva do trigo na região, embora de forma menos intensa que a temperatura. Como a correlação é negativa, a interpretação mais prudente é que maiores desvios de precipitação não corresponderam, necessariamente, a melhores resultados produtivos. Esse comportamento pode estar relacionado a efeitos indiretos da chuva sobre o ambiente de cultivo.

A umidade do solo L1, correspondente à camada mais superficial do solo, apresentou correlação fraca e negativa ($r = -0,20$). A dispersão dos pontos e a baixa inclinação da reta indicam que a variação da água armazenada nessa camada teve associação linear limitada com os desvios de produtividade. Resultado semelhante foi observado para a umidade do solo L2, também com $r = -0,20$, sugerindo que a variação do armazenamento hídrico nessas duas camadas, quando analisada isoladamente, teve baixa capacidade explicativa para a variabilidade produtiva do trigo na região.

O boxplot da variação decadal da produtividade mostra diferenças na posição central e na dispersão dos resíduos entre as décadas. A década de 1970 apresenta mediana próxima da neutralidade, com maior amplitude de valores, indicando maior variabilidade interanual. A década de 1980 mostra mediana levemente positiva, enquanto as décadas de 1990 e 2000 apresentam medianas negativas. Na década de 2010, os valores centrais voltam a se posicionar ligeiramente acima da neutralidade. Já a década de 2020 permanece próxima de zero, embora essa leitura deva ser feita com cautela em razão do menor número de anos representados. Esse comportamento indica oscilação dos resíduos produtivos entre as décadas, sem evidenciar tendência contínua de aumento ou redução.

Para a Região Noroeste Rio-Grandense, a produtividade do trigo apresentou associação linear mais evidente com a temperatura do ar e, em menor grau, com a precipitação, ambas com sinal negativo. Em contraste, o DPV e a umidade do solo nas camadas L1 e L2 mostraram relações lineares pouco expressivas. Esses resultados sugerem que a variabilidade da safra esteve mais associada às condições térmicas e pluviométricas do que à variação isolada do armazenamento hídrico superficial do solo, embora a figura não permita, por si só, estabelecer os mecanismos agrônômicos responsáveis por essas relações.

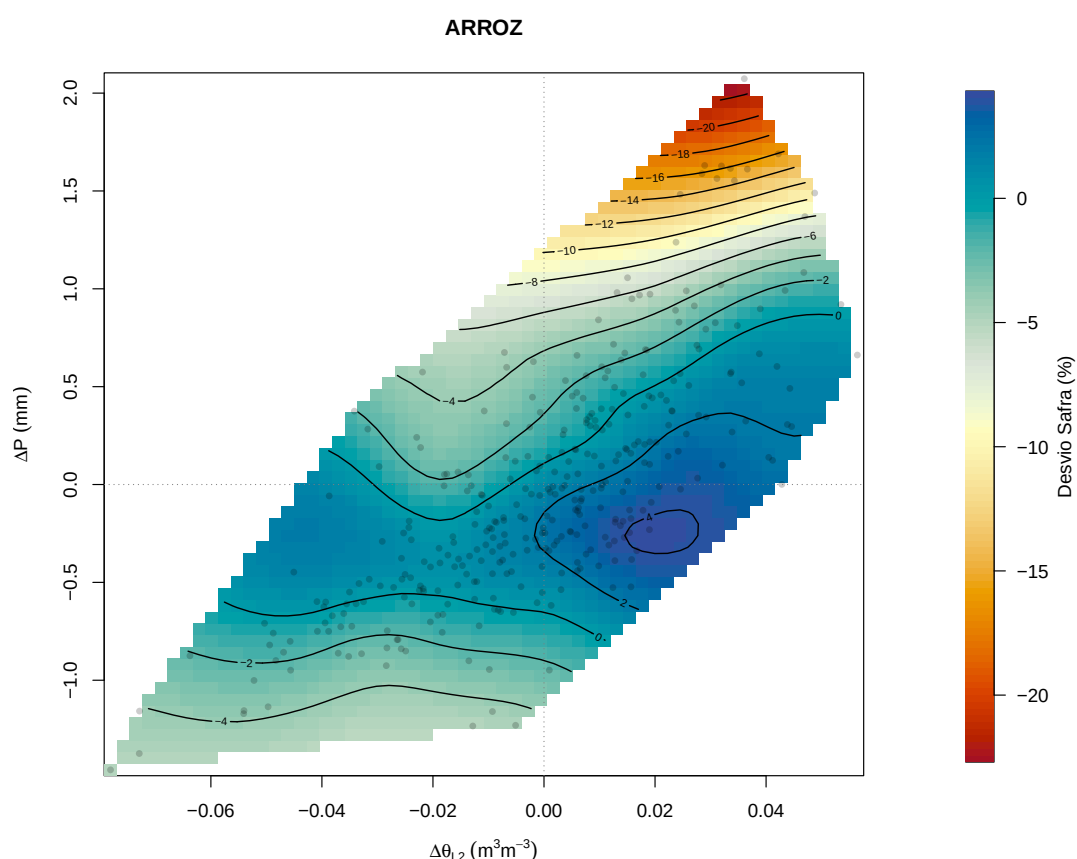
Neste item, optou-se por apresentar de forma mais detalhada a mesorregião Noroeste para o trigo, por representar de maneira clara a relação entre a variabilidade das condições meteorológicas e o comportamento da produtividade do trigo ao longo da série histórica analisada. As demais mesorregiões avaliadas para essa cultura, Centro Ocidental, Centro Oriental, Metropolitana de Porto Alegre, Nordeste, Sudeste e Sudoeste, também

foram processadas segundo o mesmo procedimento analítico e encontram-se apresentadas no Apêndice D, da Fig. 100 a 105, permitindo a consulta complementar dos padrões regionais de resposta da produtividade do trigo no RS.

4.5.1 Análise do impacto das Variáveis Meteorológicas nos desvios das safras no RS

A Fig. 49 mostra o desvio da produtividade do arroz em função da variação conjunta da umidade do solo L2 e da precipitação, evidenciando que os desvios menos negativos de produtividade tendem a se concentrar em faixas de precipitação próxima da média ou levemente abaixo dela, enquanto os desvios mais negativos passam a predominar à medida que a precipitação assume valores mais positivos. No caso da umidade do solo L2, o padrão é menos marcado, indicando contribuição mais secundária na configuração da superfície quando comparada ao gradiente de precipitação.

Figura 49 – Relação da interação entre a umidade do solo L2 e a precipitação sobre os desvios de produtividade do arroz.



Fonte: Autor (2025).

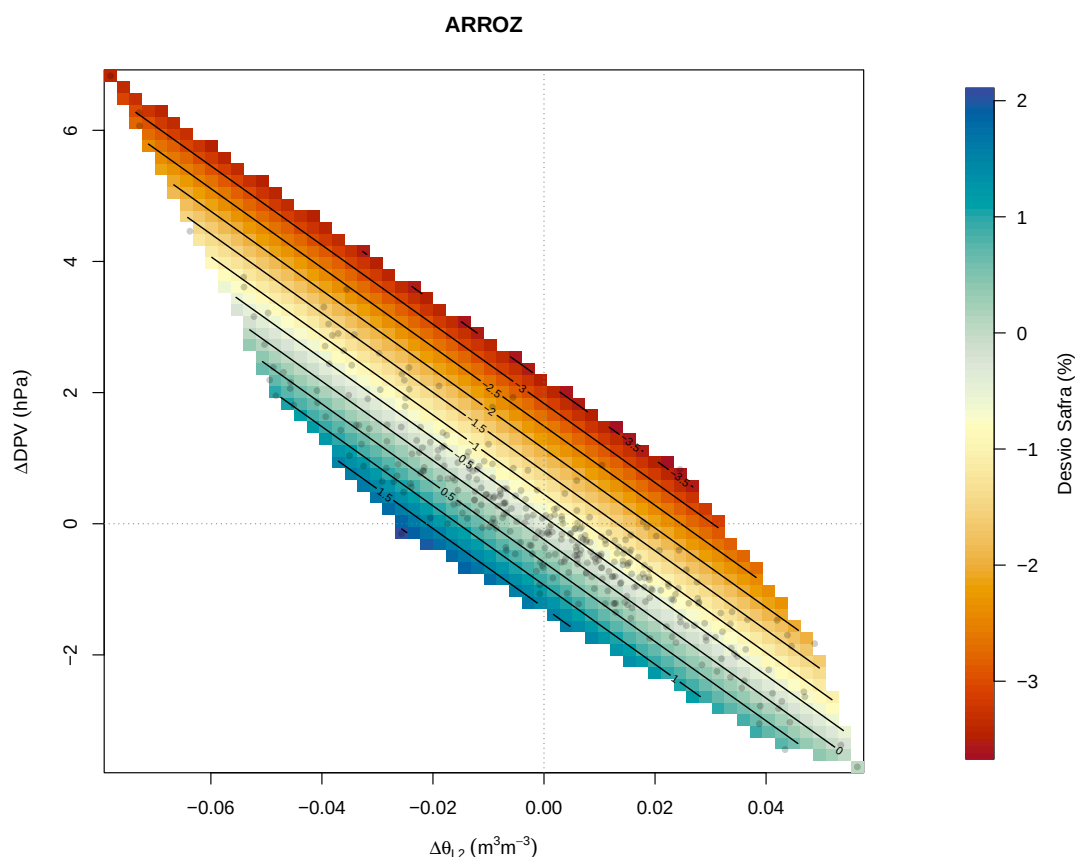
Como a análise foi realizada em escala regional, as variáveis de umidade do solo representadas na figura expressam o comportamento médio do armazenamento hídrico no solo para a região considerada, e não necessariamente as condições específicas das áreas efetivamente cultivadas com arroz irrigado. Nesse sentido, a interpretação desses resultados deve ser feita com cautela, uma vez que, para essa cultura, a disponibilidade de água no sistema produtivo não depende apenas da umidade natural do solo, mas principal-

mente do manejo da irrigação adotado em cada safra. Ainda assim, a superfície ajustada sugere que, para o arroz irrigado na escala analisada, anos com precipitação menos excessiva tenderam a estar associados a respostas produtivas relativamente mais favoráveis, enquanto valores mais elevados de precipitação se associaram a respostas menos favoráveis.

Esses resultados também têm relevância aplicada, pois podem servir de base para estudos futuros voltados à estimativa da necessidade de água para irrigação. Em uma abordagem complementar, a umidade do solo e a precipitação regional poderiam ser integradas para quantificar o volume de água a ser suplementado ao longo do ciclo da cultura. Como essa análise não faz parte do escopo do presente trabalho, os resultados devem ser interpretados principalmente como uma caracterização regional das condições hídricas associadas à produtividade, e não como uma estimativa direta da demanda de irrigação do arroz.

A Fig. 50 mostra a relação entre o desvio da produtividade do arroz e a variação conjunta da umidade do solo L2 e do DPV. O padrão representado é relativamente organizado, com isolinhas quase paralelas e gradiente mais acentuado ao longo do eixo do DPV, indicando que a produtividade varia de forma mais sensível com essa variável do que com a umidade do solo L2. Os desvios menos negativos de produtividade concentram-se nas faixas de DPV próximo da média ou abaixo dela, enquanto os desvios mais negativos passam a predominar à medida que o DPV assume valores mais positivos. Para a umidade do solo L2, a variação observada é mais discreta, sugerindo influência secundária na configuração do padrão quando comparada ao controle exercido pelo DPV.

Figura 50 – Relação da interação entre a umidade do solo L2 e o DPV sobre os desvios de produtividade do arroz.



Fonte: Autor (2025).

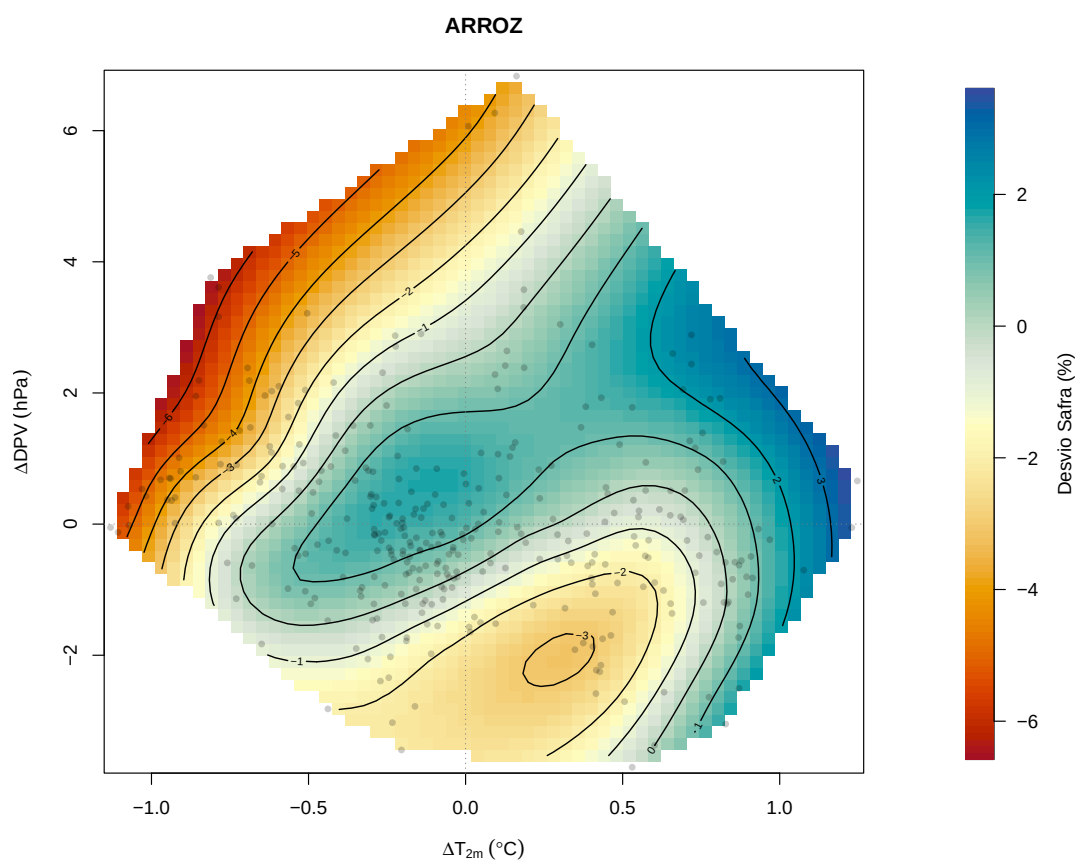
Como a análise foi realizada em escala regional, a variável umidade do solo L2 deve ser entendida como uma representação média do armazenamento hídrico no solo para a região, e não como uma medida direta das condições hídricas específicas das áreas cultivadas com arroz irrigado. Nesse contexto, a interpretação deve ser feita com cautela, pois, para essa cultura, a disponibilidade de água no sistema produtivo depende principalmente do manejo da irrigação. Ainda assim, a figura indica que maiores valores de DPV estiveram associados a respostas produtivas menos favoráveis, enquanto valores próximos da média ou negativos tenderam a coincidir com desvios menos negativos de safra. Esse comportamento sugere que, mesmo em cultivo irrigado, uma atmosfera relativamente mais seca pode estar associada a condições menos favoráveis ao desempenho da cultura.

Esses resultados têm utilidade principalmente como caracterização regional das condições atmosféricas e hídricas associadas à produtividade. Em uma abordagem futura, a combinação entre umidade do solo e DPV poderia ser incorporada a análises mais aplicadas sobre o manejo da irrigação, permitindo avaliar de forma mais precisa a relação entre demanda atmosférica, armazenamento hídrico regional e necessidade de suplementação de água. Como essa quantificação não faz parte do escopo do presente trabalho, a

Figura 65 deve ser interpretada sobretudo como uma representação da resposta produtiva regional à interação entre o estado hídrico médio do solo e a demanda atmosférica por água.

A Fig. 51 representa a interação entre o desvio da temperatura do ar e o desvio do DPV em relação ao desvio de safra do arroz, evidenciando uma resposta produtiva de caráter não linear. O eixo horizontal expressa as anomalias de temperatura, enquanto o eixo vertical representa as anomalias de DPV, permitindo avaliar de forma conjunta os efeitos térmicos e da demanda evaporativa atmosférica sobre a cultura. A distribuição das isolinhas e do gradiente de cores demonstra que a variação da safra não é explicada pela atuação isolada de uma dessas variáveis, mas pela combinação entre ambas. Em termos gerais, os menores desvios de safra concentram-se em condições de variação do DPV positivo, sobretudo quando associados a temperaturas próximas ou inferiores à média, indicando que o aumento da secra atmosférica esteve relacionado a respostas produtivas menos favoráveis.

Figura 51 – Relação da interação entre a temperatura do ar e o DPV sobre os desvios de produtividade do arroz.



Fonte: Autor (2025).

Esse padrão indica que o DPV exerce papel central na resposta produtiva do arroz, uma vez que valores mais elevados refletem maior demanda evaporativa da atmosfera.

Na figura, isso se expressa pela predominância de desvios negativos de safra nas faixas de variação do DPV mais alto, sugerindo que o aumento da secura atmosférica esteve associado a condições menos favoráveis ao desempenho da cultura.

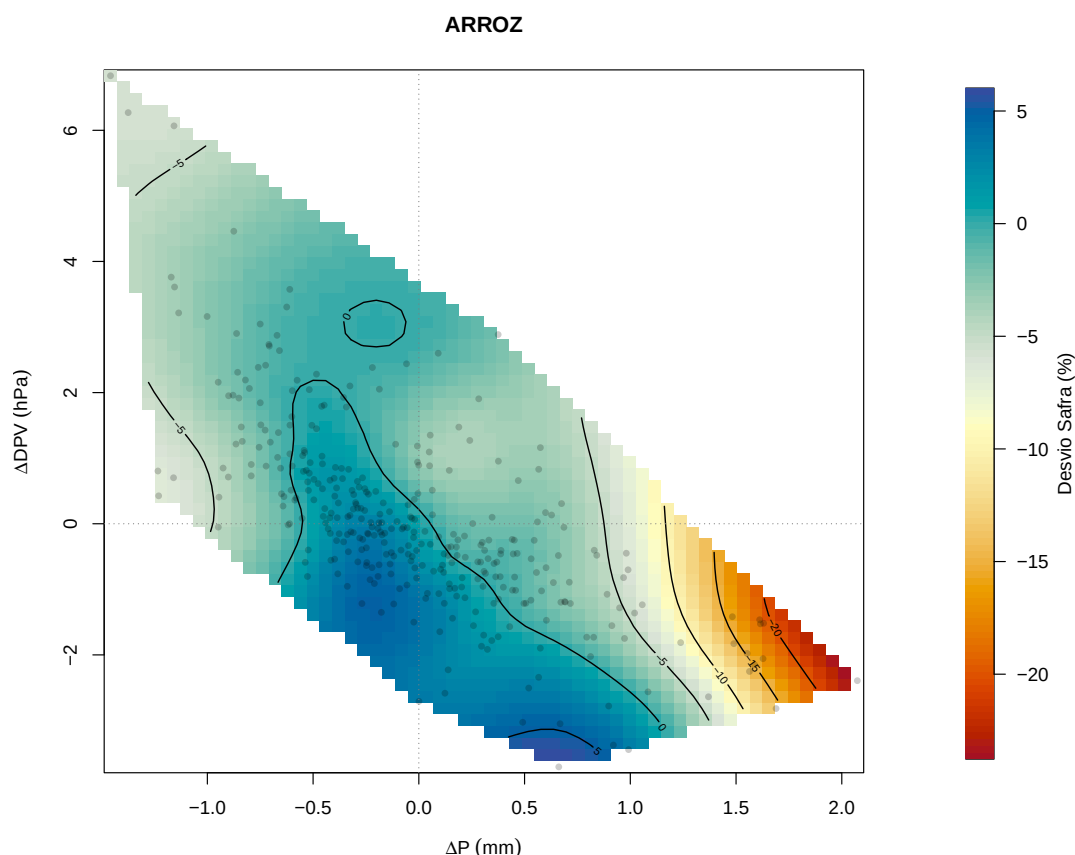
Com tudo, os desvios positivos de safra concentram-se em condições de temperatura levemente acima da média e variação do DPV próximo de zero ou negativo, indicando que temperaturas moderadamente elevadas não foram, isoladamente, limitantes à produtividade. Assim, os resultados mostram que o impacto da temperatura sobre o arroz depende da condição atmosférica associada, sendo o DPV o principal modulador do desvio de safra quando considerado em interação com a temperatura do ar.

Evidências experimentais indicam que, no arroz, a resposta produtiva ao regime térmico depende da interação entre temperatura e demanda evaporativa atmosférica, e não apenas do aquecimento isolado. Em condições controladas, verificou-se que o crescimento vegetativo foi mais sensível ao DPV do que à temperatura, de modo que temperaturas moderadamente elevadas, quando associadas a menor secura atmosférica, não necessariamente implicaram restrição ao desempenho da cultura. Além disso, há indícios de que o estado hídrico prévio da planta também condiciona sua resposta ao calor, uma vez que o déficit hídrico na fase vegetativa pode induzir maior tolerância térmica na antese. Esses resultados reforçam a interpretação da Fig. 51, ao sugerirem que o efeito da temperatura sobre o desvio de safra do arroz deve ser compreendido em associação com o estado atmosférico e fisiológico da cultura, sendo o DPV um importante modulador dessa resposta (KOBAYASI et al., 2010; STUERZ; ASCH, 2021; FEIJÓ et al., 2023).

De forma complementar, estudos sobre a fase reprodutiva mostram que processos fenológicos relevantes, como a abertura floral, também respondem à interação entre temperatura, radiação e DPV, observaram que temperaturas mais elevadas e maior radiação, sob menor DPV, tendem a antecipar a abertura das flores, evidenciando que a resposta do arroz ao ambiente térmico é condicionada pela secura atmosférica. Assim, o padrão observado na Fig. 51, em que os desvios mais negativos se concentram sob DPV elevado mesmo sem anomalias térmicas fortemente positivas, encontra respaldo na literatura ao indicar que a intensificação da demanda evaporativa pode ser mais restritiva ao desempenho produtivo do que a temperatura isoladamente (KOBAYASI et al., 2010; STUERZ; ASCH, 2021).

A Fig. 52 apresenta a relação entre o desvio da precipitação e o desvio do DPV em associação ao desvio de safra do arroz, evidenciando o efeito conjunto entre a oferta hídrica natural e a demanda evaporativa atmosférica. O eixo horizontal representa as anomalias de precipitação, enquanto o eixo vertical expressa as anomalias de DPV, permitindo identificar como diferentes combinações entre disponibilidade de água e secura atmosférica se associam ao desempenho produtivo.

Figura 52 – Relação da interação entre a precipitação e o DPV sobre os desvios de produtividade do arroz.



Fonte: Autor (2025).

Observa-se que os desvios mais negativos de safra concentram-se nas condições de precipitação acima da média combinadas com o desvio do DPV baixo, indicando que o maior aporte hídrico não esteve associado, nesse caso, a melhor desempenho produtivo. Esse comportamento sugere que o excesso de precipitação, mesmo sob menor demanda evaporativa atmosférica, pode ter representado condição desfavorável à cultura, possivelmente por refletir períodos de maior nebulosidade, menor disponibilidade de radiação ou mesmo excesso hídrico no sistema de cultivo. Em contraste, os desvios positivos de safra tendem a ocorrer em faixas intermediárias de precipitação e sob o desvio do DPV moderado a mais elevado, indicando que a resposta produtiva do arroz não depende apenas do aumento da chuva, mas do balanço entre disponibilidade hídrica e condição atmosférica.

De forma geral, se mostra que a relação entre precipitação e produtividade do arroz não é linear, e que maiores volumes precipitados não implicam necessariamente maiores desvios positivos de safra. Assim, os resultados indicam que o desvio de safra é melhor interpretado a partir da interação entre a precipitação e o DPV, uma vez que combinações de chuva acima da média com baixa demanda evaporativa estiveram associadas a respostas menos favoráveis da cultura.

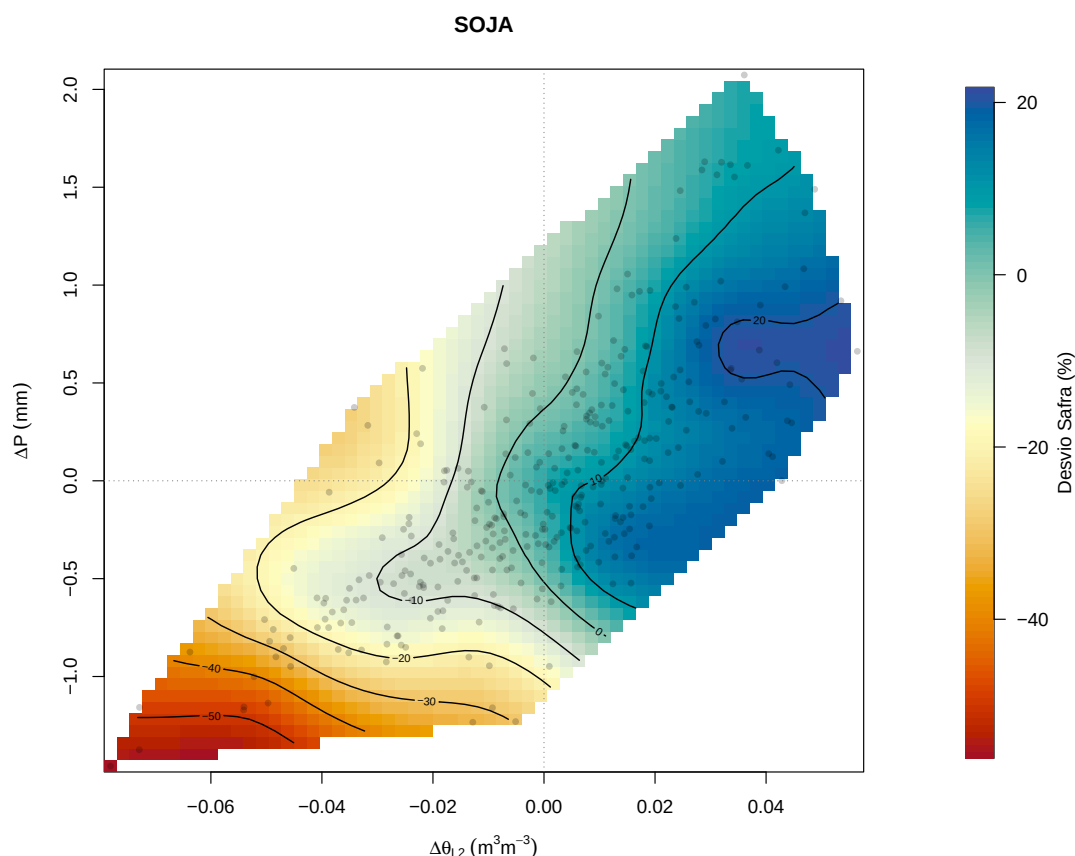
Os resultados da Fig 52 são coerentes com evidências de que o excesso de precipitação pode reduzir a produtividade do arroz, especialmente quando associado a baixa demanda evaporativa da atmosfera. Nessa condição, o maior aporte hídrico não implica, necessariamente, ambiente favorável à cultura, podendo estar relacionado à saturação do sistema, à menor disponibilidade de radiação e a condições menos adequadas ao desenvolvimento e à colheita. Esse entendimento é consistente com resultados que associam eventos de precipitação extrema à variabilidade interanual do rendimento do arroz, além de indicarem que o aumento da chuva intensa pode contribuir de forma expressiva para perdas produtivas em áreas orizícolas (JIAN et al., 2020; MAITI et al., 2024).

Ao mesmo tempo, a concentração dos desvios positivos em faixas intermediárias de precipitação, associadas a valores moderados de DPV, sugere que o melhor desempenho produtivo ocorre sob maior equilíbrio entre oferta hídrica e demanda atmosférica. Essa interpretação converge com resultados que indicam a existência de um limiar ótimo de precipitação para o arroz, acima do qual o aumento da chuva passa a reduzir o rendimento. Desse modo, a resposta produtiva da cultura não depende do aumento isolado da precipitação, mas do ajuste entre disponibilidade de água e condição atmosférica, de modo que precipitações excessivas, sobretudo sob baixa demanda evaporativa, tendem a se associar aos desvios negativos mais intensos de safra (FU et al., 2023; MAITI et al., 2024).

De forma geral, os resultados obtidos para o arroz indicam que a variabilidade produtiva da cultura, na escala analisada, esteve mais associada às condições atmosféricas e ao excesso hídrico do que à limitação de água no solo propriamente dita. As análises mostraram que desvios menos negativos ou mais favoráveis tenderam a ocorrer sob precipitação próxima da média ou moderadamente inferior, DPV baixo a moderado e temperaturas sem anomalias excessivas, enquanto condições de precipitação elevada, baixa demanda evaporativa e, em alguns casos, DPV elevado estiveram associadas a respostas menos favoráveis. Esse comportamento sugere que, para o arroz irrigado, o desempenho produtivo não depende do aumento isolado da disponibilidade hídrica, mas do equilíbrio entre oferta de água, condição atmosférica e ambiente energético, de modo que o excesso de chuva e a secura atmosférica, conforme a combinação observada, atuaram como os principais moduladores dos desvios de safra.

A Fig. 53 apresenta a relação entre o desvio da umidade do solo na camada L2 e o desvio da precipitação em associação ao desvio de safra da soja, evidenciando o efeito conjunto entre a disponibilidade hídrica no solo e o aporte pluviométrico sobre a resposta produtiva da cultura. O eixo horizontal representa as anomalias de umidade do solo, enquanto o eixo vertical expressa as anomalias de precipitação, permitindo identificar como diferentes combinações entre armazenamento hídrico no perfil e chuva se refletem no desempenho da soja. De forma geral, observa-se um gradiente bem definido de resposta, com transição de desvios negativos de safra nas condições de menor umidade do solo para desvios positivos à medida que o L2 se torna positivo.

Figura 53 – Relação da interação entre a umidade do solo L2 e a precipitação sobre os desvios de produtividade da soja.



Fonte: Autor (2025).

Os menores desvios de safra concentram-se na porção inferior esquerda do gráfico, onde coincidem anomalias negativas de umidade do solo e anomalias negativas de precipitação. Nessa região, os desvios de safra atingem valores próximos de -50%, associados a valores de L2 em torno de -0,05 a -0,06 m³ m⁻³ e anomalias de precipitação inferiores a aproximadamente -1,0 mm. Esse padrão indica que a combinação entre baixa precipitação e redução da água armazenada no solo esteve associada às condições mais restritivas ao desempenho produtivo da soja, caracterizando um cenário de deficiência hídrica simultâ-

nea no suprimento atmosférico e no reservatório edáfico. Além disso, a distribuição das isolinhas sugere que a transição entre perdas mais intensas e condições menos restritivas ocorre principalmente ao longo do eixo da umidade do solo, indicando que essa variável exerceu papel central na modulação da resposta produtiva.

Também, os desvios positivos de safra concentram-se predominantemente na metade direita da figura, sobretudo quando o L2 assume valores positivos entre aproximadamente 0,02 e 0,05 m³ m⁻³, alcançando respostas superiores a 20% em condições de precipitação próxima da média ou levemente acima dela. Esse comportamento sugere que, para a soja, a manutenção de água no perfil do solo foi mais determinante para o desempenho produtivo do que o aumento isolado da precipitação. Assim, a figura evidencia que a variabilidade da safra esteve fortemente condicionada à interação entre precipitação e umidade do solo, sendo esta última o parâmetro mais diretamente associado às respostas favoráveis da cultura.

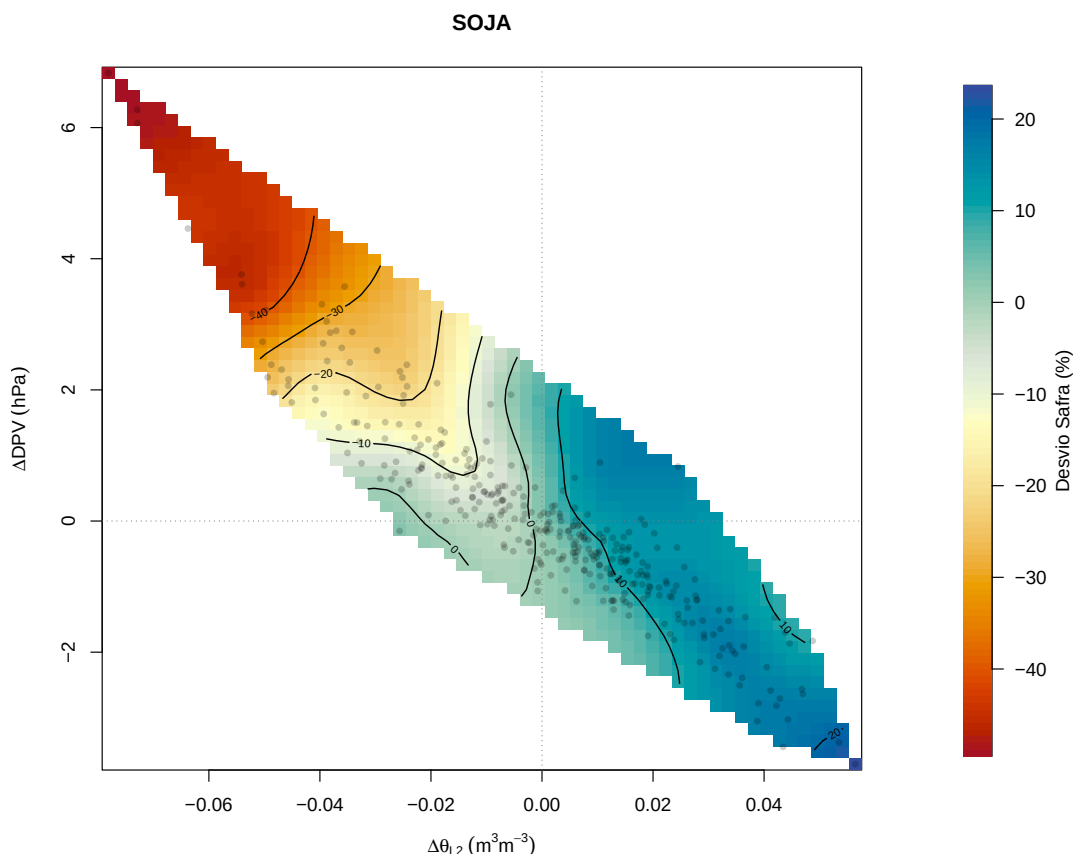
O padrão observado na Fig. 53 reforça que a deficiência hídrica constitui um dos principais fatores limitantes da produtividade da soja, sobretudo quando a redução da precipitação ocorre simultaneamente à diminuição da água armazenada no solo. Nessa situação, a restrição hídrica compromete diretamente processos de crescimento e formação de estruturas reprodutivas, o que ajuda a explicar a concentração dos desvios mais negativos de safra nas condições de precipitação abaixo da média e L2 negativo. Assim, seus resultados são coerentes com evidências de que o déficit de água pode causar perdas expressivas de rendimento e de que a resposta da cultura depende fortemente da reposição de água no perfil do solo (WANG et al., 2022)

Por outro lado, a ocorrência de desvios positivos sob valores positivos de L2, mesmo com precipitação próxima da média, indica que a manutenção da umidade no perfil pode ser mais importante do que o aumento isolado da chuva. Ainda assim, esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois o excesso hídrico também pode ser prejudicial à cultura. Estudos sobre encharcamento mostram que a saturação prolongada do solo reduz a fotossíntese, interrompe o desenvolvimento reprodutivo e compromete a formação de vagens e biomassa reprodutiva, especialmente quando o estresse ocorre em estágios reprodutivos, o que reforça que o melhor desempenho da soja está associado ao equilíbrio entre precipitação e água efetivamente armazenada no solo, e não ao aumento indiscriminado da umidade (LAPAZ et al., 2020; ADEGOYE et al., 2023; GOWDRA et al., 2025).

A Fig. 54 apresenta a relação entre o desvio da umidade do solo na camada L2 e o desvio do DPV em associação ao desvio de safra da soja, permitindo avaliar de forma integrada os efeitos da disponibilidade hídrica no solo e da demanda evaporativa atmosférica sobre a resposta produtiva da cultura. O eixo horizontal representa as anomalias de umidade do solo, enquanto o eixo vertical expressa as anomalias de DPV, evidenciando que a variabilidade da safra decorre da interação entre a condição hídrica do perfil e o grau de secura da atmosfera. De modo geral, observa-se um gradiente bem definido de resposta,

no qual os desvios negativos de safra se concentram em condições de menor umidade do solo associadas a DPV elevado, enquanto os desvios positivos ocorrem preferencialmente sob maior disponibilidade hídrica no solo e menor demanda evaporativa.

Figura 54 – Relação da interação entre a umidade do solo L2 e o DPV sobre os desvios de produtividade da soja.



Fonte: Autor (2025).

Os menores desvios de safra concentram-se na porção superior esquerda do gráfico, onde o L2 assume valores negativos, em torno de -0,05 a -0,06 $m^3 m^{-3}$, e o anomalias de DPV atinge valores elevados, próximos de 4 a 6 hPa. Nessa região, os desvios de safra alcançam aproximadamente -40% a -50%, evidenciando que a combinação entre déficit hídrico no solo e intensificação da demanda evaporativa atmosférica esteve associada às condições mais restritivas ao desempenho da soja.

A distribuição das isolinhas indica que o aprofundamento das perdas ocorre de forma progressiva à medida que o DPV se eleva sob condições de baixa umidade do solo, o que reforça o caráter sinérgico entre essas duas variáveis na determinação das respostas negativas da cultura. Do ponto de vista fisiológico, esse comportamento é consistente com situações em que a limitação de água no solo reduz a capacidade de suprimento hídrico às plantas, enquanto o aumento do DPV intensifica o gradiente de perda de água para a atmosfera, ampliando o estresse sobre os processos de crescimento e enchimento de

grãos.

Em contraste, os desvios positivos de safra concentram-se predominantemente na metade inferior direita da Fig. 54, especialmente quando o L2 assume valores positivos, entre aproximadamente 0,02 e 0,05 m³ m⁻³, e as anomalias do DPV se mantêm próximo de zero ou negativo, alcançando valores em torno de -2 a -3 hPa. Nessas condições, os desvios de safra superam 20%, indicando que a soja respondeu de forma mais favorável em ambientes caracterizados por maior armazenamento hídrico no solo e menor secura atmosférica. Assim, a figura evidencia que a variabilidade da safra da soja é mais bem explicada pela interação entre a condição hídrica do solo e o DPV do que pela atuação isolada dessas variáveis, destacando que a manutenção de umidade no perfil, associada à redução da demanda evaporativa, constitui a combinação mais favorável ao desempenho produtivo da cultura.

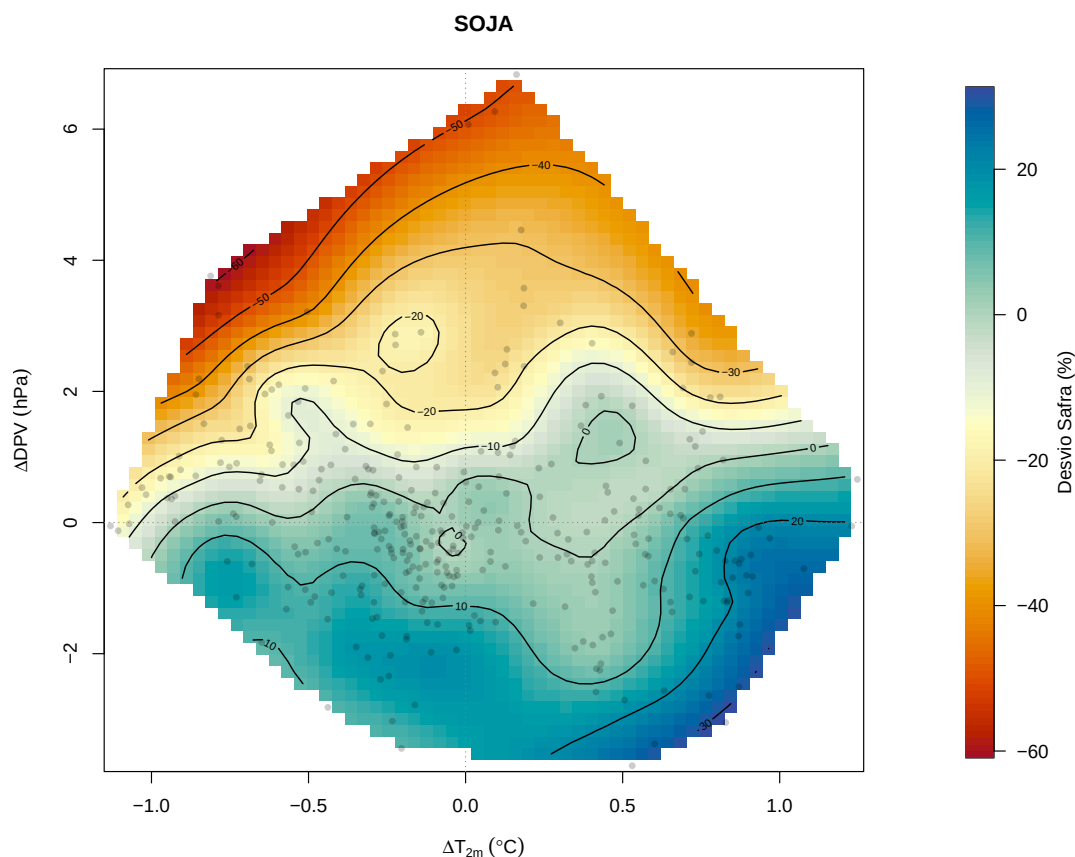
O padrão observado na Fig. 54 evidencia que a resposta produtiva da soja depende da interação entre a condição hídrica do solo e a demanda evaporativa atmosférica. A concentração dos desvios mais negativos sob L2 negativo e DPV elevado indica que a restrição hídrica se intensifica quando a baixa disponibilidade de água no perfil coincide com maior secura do ar, ampliando o estresse sobre o crescimento e o enchimento de grãos. Essa interpretação é coerente com evidências de que o DPV constitui um importante preditor do rendimento da soja e de que seus efeitos se tornam mais severos quando associados à limitação hídrica no solo, o que reforça o papel conjunto dessas variáveis na modulação das perdas produtivas (MOURTZINIS; SPECHT; CONLEY, 2019; HAMED et al., 2021; KUKAL et al., 2023).

De forma complementar, estudos sobre eventos compostos mostram que os impactos mais intensos sobre a soja ocorrem quando altas temperaturas e baixa umidade do solo se manifestam simultaneamente, produzindo efeitos mais severos do que aqueles observados sob calor ou secura isolados. Esse caráter sinérgico ajuda a explicar, na Fig. 54, tanto o aprofundamento das perdas sob solo seco e DPV elevado quanto a concentração dos desvios positivos em condições de maior umidade no perfil e menor demanda evaporativa. Desse modo, a variabilidade da safra da soja é mais bem compreendida a partir do acoplamento entre disponibilidade hídrica no solo e secura atmosférica, e não da atuação isolada de cada variável (HAMED et al., 2021; KUKAL et al., 2023).

A Fig. 55 apresenta a relação entre o desvio da temperatura do ar a 2 m e o desvio do DPV em associação ao desvio de safra da soja, evidenciando a atuação conjunta do regime térmico e da demanda evaporativa atmosférica sobre a resposta produtiva da cultura. O eixo horizontal representa as anomalias de temperatura, enquanto o eixo vertical expressa as anomalias de DPV, permitindo identificar os diferentes padrões de desempenho da soja sob combinações contrastantes entre aquecimento do ar e secura atmosférica. De modo geral, observa-se uma separação relativamente nítida entre as faixas de resposta, com predominância de desvios negativos de safra nas condições de variação positiva do

DPV e de desvios positivos nas condições de variação negativa do DPV.

Figura 55 – Relação da interação entre a temperatura do ar e o DPV sobre os desvios de produtividade da soja.



Fonte: Autor (2025).

Os menores desvios de safra concentram-se principalmente na porção superior esquerda do gráfico, onde a variação do DPV atinge valores em torno de 4 hPa e a temperatura do ar apresenta anomalias negativas, aproximadamente entre -0,7 e -0,5 °C. Nessa região, os desvios de safra alcançam valores próximos de -60% evidenciando que as respostas mais negativas da cultura estiveram associadas à intensificação da demanda evaporativa atmosférica, em combinação com temperaturas ligeiramente inferiores à média. Esse comportamento mostra que o agravamento das perdas ocorreu de forma mais consistente ao longo do eixo do DPV do que ao longo do eixo térmico, indicando maior sensibilidade da produtividade da soja à secura atmosférica do que às oscilações de temperatura.

A distribuição das isolinhas reforça esse padrão, ao indicar transição progressiva para valores mais negativos de desvio de safra à medida que a variação do DPV se eleva, mesmo sob variações moderadas de temperatura. Do ponto de vista fisiológico, esse resultado é coerente com a maior sensibilidade da soja ao estresse atmosférico, uma vez que valores elevados de DPV ampliam o gradiente de vapor entre a planta e a atmosfera,

intensificam a transpiração e tendem a aumentar a restrição estomática, comprometendo processos relacionados ao crescimento e ao enchimento de grãos. Assim, a figura evidencia que o DPV foi o principal modulador das respostas negativas de safra, superando o efeito isolado da temperatura do ar.

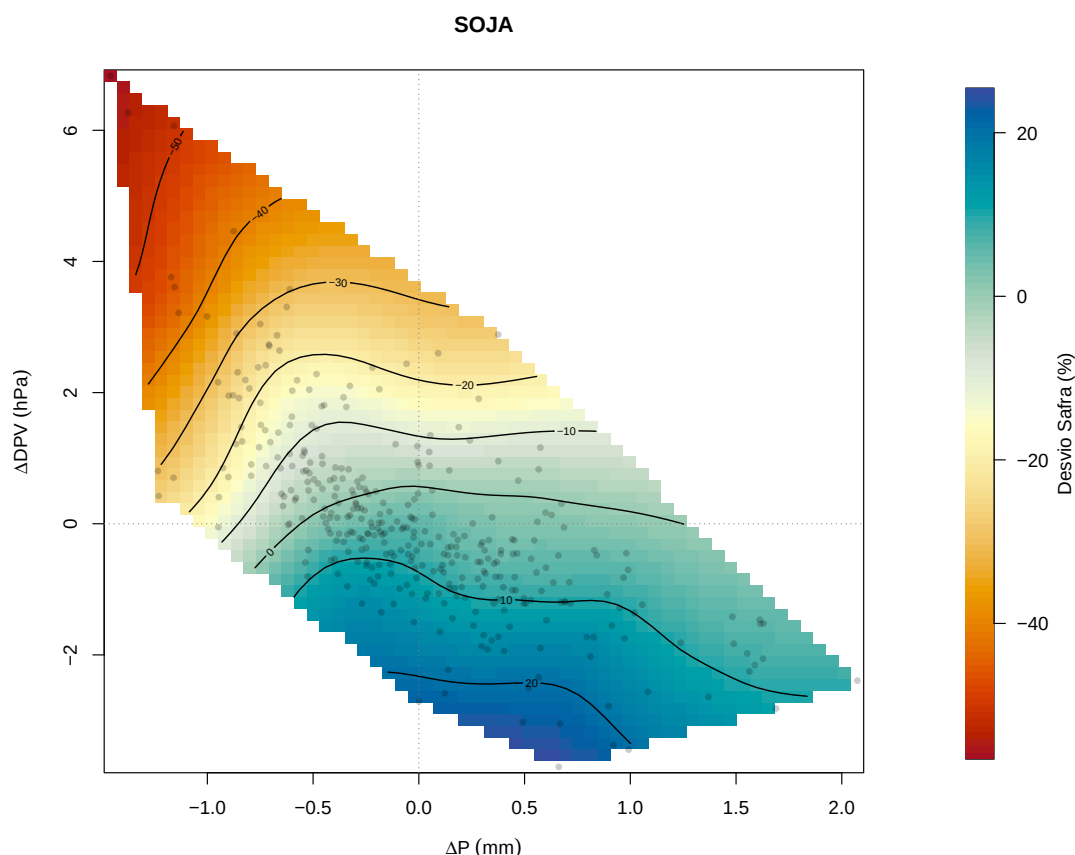
Por outro lado, os desvios positivos de safra concentram-se predominantemente na metade inferior da figura, especialmente sob variação do DPV negativo e com maior expressão nas faixas de temperatura próxima da média ou levemente acima da média. Isso sugere que a soja apresentou resposta mais favorável em ambientes com menor secura atmosférica, mesmo quando acompanhados de aquecimento moderado. Assim, os resultados indicam que a variabilidade da safra da soja é mais bem explicada pela interação entre temperatura e DPV do que pela temperatura isoladamente, sendo o DPV o principal modulador do sinal produtivo observado.

O padrão observado na Fig. 60 indica que a resposta produtiva da soja ao regime térmico depende mais da secura atmosférica do que da temperatura isolada. Evidências experimentais mostram que aumentos moderados de temperatura tendem a causar perdas relativamente limitadas quando não acompanhados de restrição hídrica, enquanto a combinação entre aquecimento e deficiência de água intensifica fortemente os prejuízos ao rendimento. Nesse sentido, a concentração dos desvios mais negativos sob DPV elevado reforça a interpretação de que a maior demanda evaporativa da atmosfera constitui o principal fator de agravamento do estresse, superando o efeito isolado da temperatura do ar (JUMRANI; BHATIA, 2018; MOURTZINIS; SPECHT; CONLEY, 2019; HAMED et al., 2021).

Esse comportamento também é coerente com estudos sobre eventos compostos, nos quais a ocorrência simultânea de aquecimento e limitação hídrica produz perdas superiores à soma dos efeitos individuais. Assim, a concentração dos desvios positivos sob DPV negativo, mesmo com temperatura próxima ou levemente acima da média, sugere que a variabilidade da safra da soja é mais bem explicada pela interação entre temperatura e secura atmosférica, com o DPV exercendo papel central na modulação das respostas produtivas (HAMED et al., 2021; HAMED et al., 2025).

A Fig. 56 apresenta a relação entre o desvio da precipitação e o desvio do DPV em associação ao desvio de safra da soja, evidenciando a atuação conjunta da oferta hídrica atmosférica e da demanda evaporativa sobre a resposta produtiva da cultura. O eixo horizontal representa as anomalias de precipitação, enquanto o eixo vertical expressa as anomalias de DPV, permitindo avaliar como diferentes combinações entre chuva e secura atmosférica se refletem no desempenho da soja. De forma geral, observa-se um gradiente bem definido de resposta, com desvios negativos de safra predominando nas condições de desvios de DPV positivo, sobretudo quando associados a precipitação abaixo da média, e desvios positivos concentrando-se nas condições de desvios de DPV negativo combinadas com precipitação próxima ou acima da média.

Figura 56 – Relação da interação entre a precipitação e o DPV sobre os desvios de produtividade da soja.



Fonte: Autor (2025).

Os menores desvios de safra concentram-se principalmente na porção superior esquerda do gráfico, onde o desvio de DPV atinge valores elevados, próximos de 6 hPa, e o desvio de precipitação assume anomalias negativas, em torno de -1,0 mm ou inferiores. Nessa região, os desvios de safra alcançam aproximadamente -50%, indicando que a combinação entre menor precipitação e maior demanda evaporativa atmosférica esteve associada às condições mais restritivas ao desempenho produtivo da soja. A distribuição das isolinhas evidencia que, à medida que o DPV se eleva, ocorre aprofundamento progressivo das perdas, mesmo quando a variação da precipitação não é extrema, reforçando o papel central da secura atmosférica na modulação das respostas negativas da cultura.

Também, os desvios positivos de safra concentram-se predominantemente na metade inferior direita da figura, especialmente sob condições de desvios de DPV negativo, entre aproximadamente -1 e -3 hPa, associadas a precipitação próxima da média ou acima dela, com o desvio de precipitação entre cerca de 0 e 2,0 mm. Nessas condições, os desvios de safra superam 20%, sugerindo que a soja respondeu de forma mais favorável em ambientes com menor demanda evaporativa e maior disponibilidade hídrica atmosférica. Assim, a figura evidencia que a variabilidade da safra da soja é mais bem explicada pela

interação entre precipitação e DPV do que pela precipitação isoladamente, destacando o DPV como variável determinante para a intensificação das perdas produtivas quando associado a condições de menor precipitação.

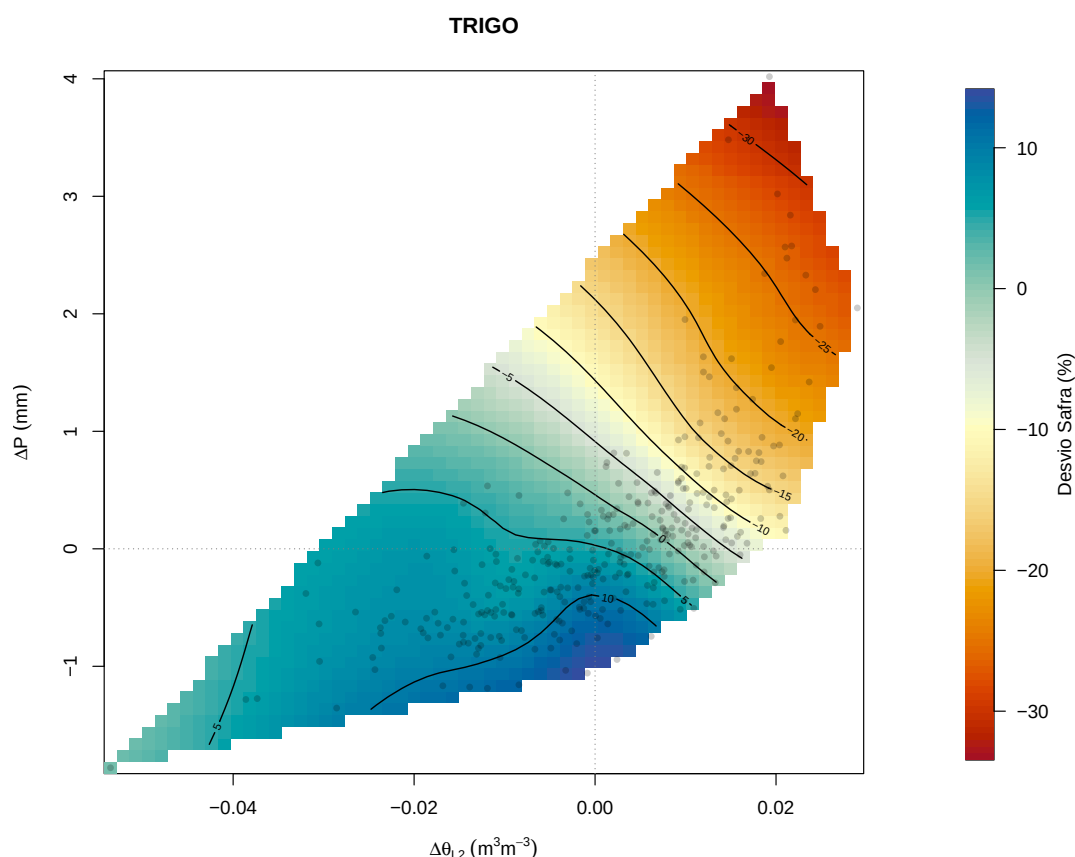
O comportamento observado na Fig. 56 reforça que a resposta produtiva da soja depende do balanço entre a oferta hídrica atmosférica e a demanda evaporativa, e não apenas do volume de precipitação isoladamente. A concentração das maiores perdas sob precipitação abaixo da média e DPV elevado indica que a restrição hídrica se intensifica quando a menor reposição de água pela chuva coincide com maior secura atmosférica, ampliando o estresse sobre o crescimento e o enchimento de grãos. Esse padrão é coerente com evidências de que o DPV constitui um dos principais moduladores do rendimento da soja, com forte redução da produtividade em condições de maior demanda evaporativa, sobretudo quando associadas à baixa precipitação e à menor disponibilidade de água no sistema (MOURTZINIS; SPECHT; CONLEY, 2019; KUKAL et al., 2023).

Por outro lado, a concentração dos desvios positivos sob DPV negativo e precipitação próxima ou acima da média sugere que o melhor desempenho da cultura ocorre em condições de maior equilíbrio hídrico. Ainda assim, esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois o benefício associado ao aumento da precipitação não é ilimitado. Estudos sobre encharcamento mostram que a soja é sensível ao excesso de água, com reduções expressivas de rendimento, especialmente na fase inicial (estabelecimento da cultura), pois pode ocorrer morte de plantas, o que acarretará em menor produtividade final e na fase reprodutiva, indicando que chuvas muito elevadas ou saturação prolongada do solo podem reverter o ganho produtivo. Desse modo, a variabilidade da safra resulta da interação entre precipitação e DPV, sendo favoráveis as condições de maior disponibilidade hídrica apenas quando não associadas a excesso de água no sistema (JUMRANI; BHATIA, 2018; MOURTZINIS; SPECHT; CONLEY, 2019; KUKAL et al., 2023; GOWDRA et al., 2025).

Para a soja, os resultados evidenciaram de forma mais nítida o papel central da restrição hídrica na definição da variabilidade produtiva, com forte dependência da interação entre precipitação, umidade do solo, temperatura e DPV. Os maiores desvios negativos concentraram-se sob condições de baixa precipitação, menor armazenamento hídrico no perfil e elevada demanda evaporativa, indicando que a combinação entre seca no solo e secura atmosférica configurou o cenário mais restritivo à cultura. Em contraste, os desvios positivos tenderam a ocorrer quando houve maior disponibilidade de água no solo, precipitação próxima ou acima da média e DPV reduzido, evidenciando que o melhor desempenho da soja esteve associado a condições de maior equilíbrio hídrico e menor pressão evaporativa. Assim, os resultados indicam que, entre as culturas analisadas, a soja apresentou a resposta mais sensível ao acoplamento entre disponibilidade hídrica e atmosfera, com o DPV exercendo papel decisivo na intensificação das perdas.

A Fig. 57 apresenta a relação entre o desvio da umidade do solo na camada L2 e o desvio da precipitação em associação ao desvio de safra do trigo, evidenciando a interação entre a disponibilidade hídrica no solo e o aporte pluviométrico sobre a resposta produtiva da cultura. O eixo horizontal representa as anomalias de umidade do solo, enquanto o eixo vertical expressa as anomalias de precipitação, permitindo avaliar como diferentes combinações entre armazenamento hídrico no perfil e chuva se associam ao desempenho do trigo. De modo geral, observa-se um gradiente de resposta bem definido, com desvios positivos de safra concentrando-se nas condições de menor precipitação se comparada a média e umidade do solo próxima da média ou levemente abaixo dela, enquanto os desvios negativos predominam nas combinações de precipitação acima da média e umidade do solo positiva.

Figura 57 – Relação da interação entre a umidade do solo L2 e a precipitação sobre os desvios de produtividade do trigo.



Fonte: Autor (2025).

Os maiores desvios positivos de safra concentram-se na porção inferior do gráfico, especialmente em condições de anomalia de precipitação negativa, entre aproximadamente -1,5 e -0,5 mm, associadas a valores de desvio da umidade do solo na camada L2 próximos de -0,02 m³ m⁻³ até ligeiramente positivos. Nessa região, os desvios de safra atingem valores superiores a 10%, indicando que o trigo respondeu de forma mais

favorável em cenários de menor precipitação, sem que isso implicasse depleção hídrica acentuada no solo. Esse comportamento sugere que, para a cultura, a redução da precipitação pode ter se associado a condições atmosféricas e edáficas mais adequadas ao desenvolvimento, possivelmente relacionadas a menor excesso de água, melhor aeração do solo e menor limitação ao crescimento radicular.

Em contraste, os menores desvios de safra concentram-se na porção superior direita da figura, onde o a anomalia de precipitação assume valores positivos elevados, alcançando cerca de 3 a 4 mm, e o desvio da umidade do solo na camada L2 se mantém positivo, em torno de 0,01 a 0,03 m³ m⁻³. Nessa região, os desvios de safra atingem aproximadamente -30%, evidenciando que a combinação entre maior precipitação e maior umidade do solo esteve associada às condições mais desfavoráveis ao desempenho produtivo do trigo. Assim, a figura indica que a variabilidade da safra da cultura não respondeu linearmente ao aumento da disponibilidade hídrica, mas foi fortemente condicionada pelo equilíbrio entre precipitação e umidade no perfil, sendo o excesso de água o principal fator associado às respostas negativas observadas.

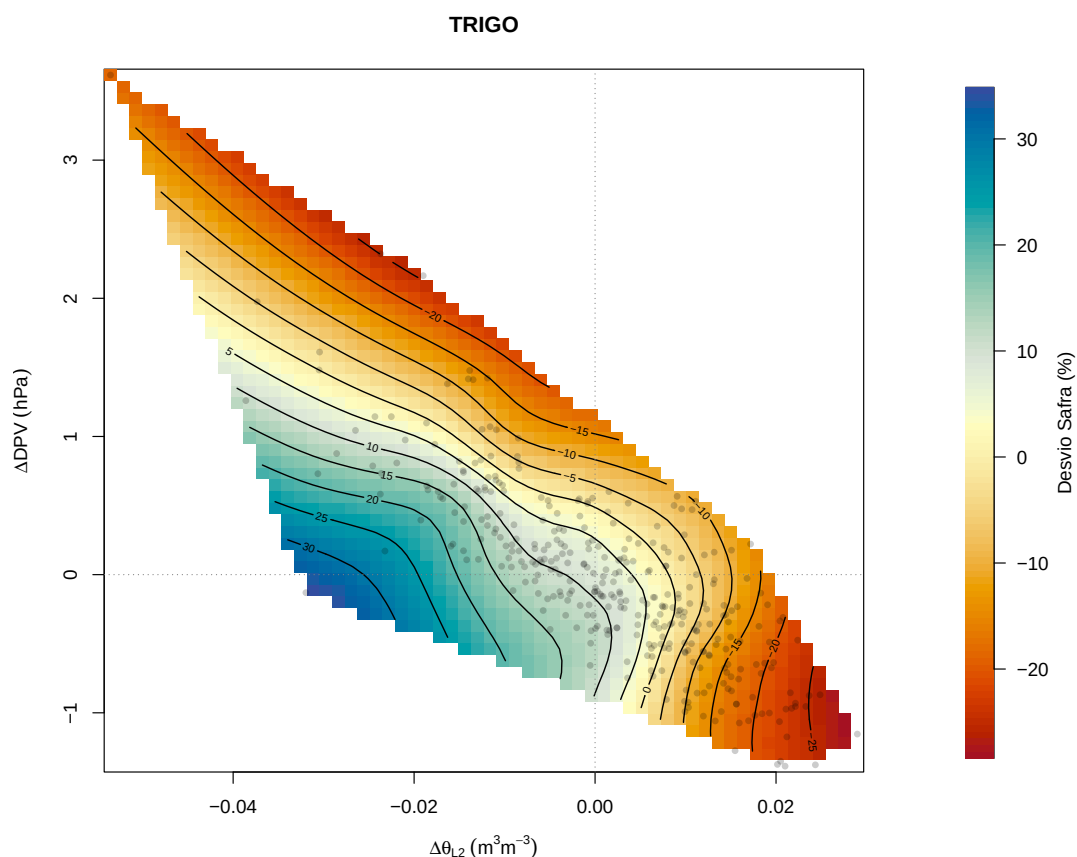
O comportamento observado na Fig. 57 indica que a resposta produtiva do trigo depende do equilíbrio entre precipitação e condição hídrica do solo, e não do aumento isolado da disponibilidade de água. A concentração dos desvios positivos sob precipitação abaixo ou próxima da média, com L2 ligeiramente negativo, sugere que reduções moderadas de chuva podem favorecer a cultura quando não implicam depleção hídrica acentuada, possivelmente por evitarem excesso de água no solo. Em contraste, a associação entre precipitação acima da média, umidade do solo positiva e desvios negativos de safra reforça que o excesso hídrico constitui importante fator de limitação produtiva (LIU et al., 2021; HAFIZA et al., 2025).

Esse resultado também é compatível com estudos que mostram que o excesso de água no solo prejudica diretamente o desenvolvimento do trigo. Em condições de encharcamento, o solo perde aeração, as raízes absorvem menos nutrientes e a atividade fotossintética da planta é reduzida, comprometendo o rendimento. Assim, a Fig. 57 sugere que o trigo responde melhor a condições de umidade moderada, suficientes para sustentar o crescimento sem induzir saturação prolongada do perfil, enquanto a combinação entre chuva elevada e maior umidade do solo configura a condição mais desfavorável à produtividade (LIU et al., 2021; TIAN et al., 2021; PAIS et al., 2022; HAFIZA et al., 2025).

A Fig. 58 apresenta a relação entre o desvio da umidade do solo na camada L2 e o desvio do DPV em associação ao desvio de safra do trigo, evidenciando a interação entre a condição hídrica do solo e a demanda evaporativa atmosférica sobre a resposta produtiva da cultura. O eixo horizontal representa as anomalias de umidade do solo, enquanto o eixo vertical expressa as anomalias de DPV, permitindo avaliar como diferentes combinações entre armazenamento hídrico no perfil e secura atmosférica se associam ao desempenho do trigo. De modo geral, observa-se um gradiente bem definido de resposta,

com desvios positivos de safra concentrados sob anomalias de DPV baixo ou negativo e desvios negativos associados ao aumento do DPV e, em parte, também a condições de umidade do solo acima da média.

Figura 58 – Relação da interação entre a umidade do solo L2 e o DPV sobre os desvios de produtividade do trigo.



Fonte: Autor (2025).

Os maiores desvios positivos de safra concentram-se principalmente na porção inferior esquerda do gráfico, onde o desvio de umidade em L2 assume valores negativos, em torno de -0,03 a -0,02 mm³mm⁻³, e o desvio do DPV se mantém próximo de 0 hPa ou levemente negativo. Nessa região, os desvios de safra superam 30%, indicando que o trigo respondeu de forma mais favorável em condições de menor secura atmosférica, mesmo quando a umidade do solo se encontrava ligeiramente abaixo da média. Em contraste, à medida que o desvio do DPV se eleva para valores entre aproximadamente 2 e 3 hPa, observa-se transição progressiva para desvios negativos de safra, evidenciando que o aumento da demanda evaporativa atmosférica exerceu papel central na redução do desempenho produtivo da cultura.

Adicionalmente, os desvios negativos também se intensificam na porção inferior direita da figura, onde o desvio de umidade em L2 se torna positivo, alcançando valores próximos de 0,02 mm³mm⁻³, ainda sob o desvio do DPV baixo ou negativo. Esse compor-

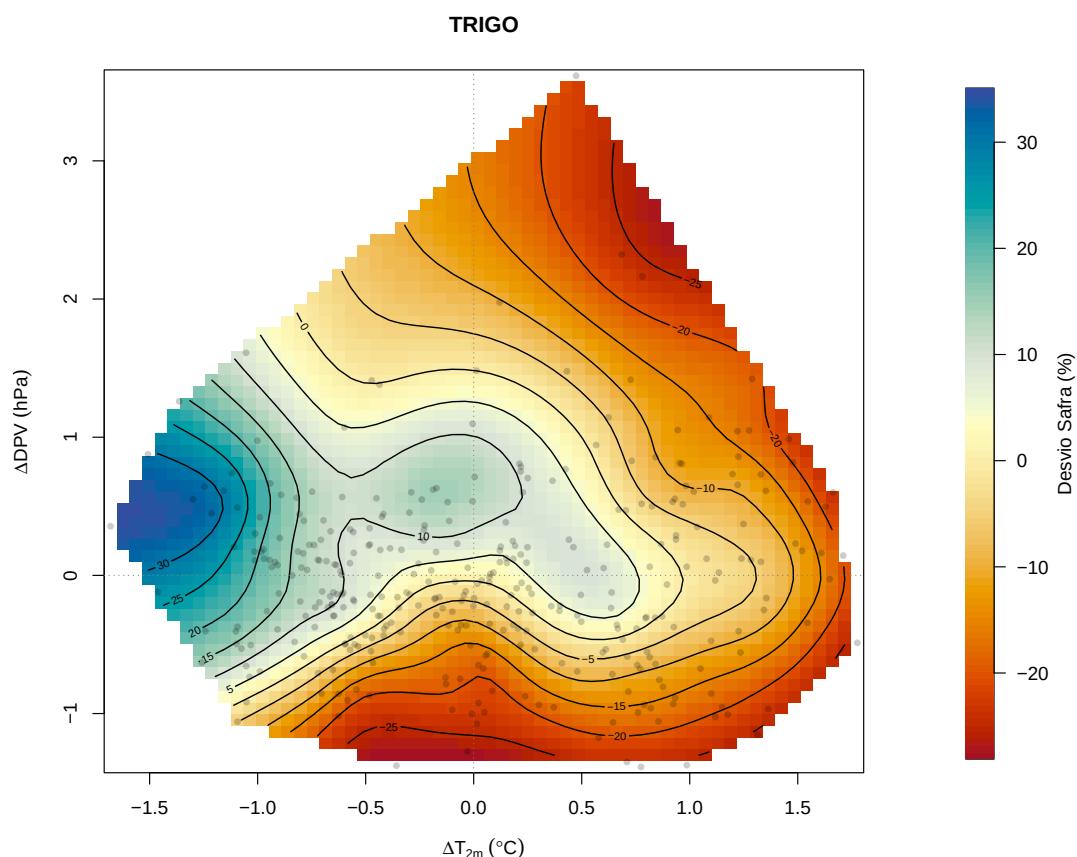
tamento indica que a resposta do trigo à disponibilidade hídrica não foi linear, uma vez que condições de maior umidade do solo não estiveram necessariamente associadas a melhores resultados produtivos. Assim, a figura evidencia que a variabilidade da safra do trigo foi condicionada pela interação entre umidade do solo e DPV, destacando o DPV como variável-chave na modulação das respostas produtivas e sugerindo que tanto a elevação da secura atmosférica quanto o excesso de água no solo podem estar associados a reduções no rendimento.

O comportamento observado na Fig. 58 indica que a resposta produtiva do trigo depende da interação entre a condição hídrica do solo e a demanda evaporativa atmosférica, com forte predominância do DPV na modulação das perdas. A concentração dos desvios positivos sob L2 ligeiramente negativo e DPV baixo sugere que pequenas reduções na umidade do solo não são necessariamente prejudiciais à cultura, desde que não estejam associadas a elevada secura atmosférica. Em contraste, a transição para desvios negativos à medida que o DPV aumenta reforça que a maior demanda evaporativa pode intensificar o estresse mesmo quando a disponibilidade hídrica no solo não é crítica (FAKHET et al., 2021; HAFIZA et al., 2025).

Esse padrão também é consistente com resultados que apontam efeito sinérgico entre deficiência hídrica e condições atmosféricas mais secas ou quentes, produzindo perdas superiores às aquelas observadas sob estresses isolados. Assim, a intensificação dos desvios negativos sob DPV mais elevado, inclusive em faixas de umidade do solo menos restritivas, sugere que a secura atmosférica atua como importante fator de agravamento do estresse, enquanto o melhor desempenho sob L2 levemente negativo e DPV baixo indica que o trigo pode responder favoravelmente a condições de disponibilidade hídrica moderada, desde que a demanda evaporativa permaneça limitada (QASEEM; QURESHI; SHAHEEN, 2019; FAKHET et al., 2021; HAFIZA et al., 2025).

A Fig. 59 apresenta a relação entre o desvio da temperatura do ar a 2 m e o desvio do DPV em associação ao desvio de safra do trigo, evidenciando a atuação conjunta do regime térmico e da demanda evaporativa atmosférica sobre a resposta produtiva da cultura. O eixo horizontal representa as anomalias de temperatura, enquanto o eixo vertical expressa as anomalias de DPV, permitindo avaliar como diferentes combinações entre aquecimento do ar e secura atmosférica se refletem no desempenho do trigo. De modo geral, observa-se um gradiente bem definido de resposta, com desvios positivos de safra concentrando-se em condições de temperatura abaixo da média e DPV baixo a moderado, enquanto os desvios negativos predominam em combinações de temperatura acima da média e DPV positivo.

Figura 59 – Relação da interação entre a temperatura do ar e o DPV sobre os desvios de produtividade do trigo.



Fonte: Autor (2025).

Os maiores desvios positivos de safra concentram-se principalmente na porção esquerda da figura, onde o desvio de temperatura assume valores entre aproximadamente -1,5 e -1,0 °C, associados a variação do DPV entre 0 e 1 hPa. Nessa região, os desvios de safra superam 30%, indicando que o trigo respondeu de forma mais favorável em condições de temperaturas inferiores à média e demanda evaporativa relativamente moderada. Esse comportamento sugere que, para a cultura, ambientes termicamente mais amenos estiveram associados a condições mais adequadas ao desenvolvimento produtivo, desde que não acompanhados por elevação expressiva da secura atmosférica.

Em contraste, os menores desvios de safra concentram-se na porção superior direita do gráfico, onde a temperatura do ar assume anomalias positivas e o desvio do DPV atinge valores elevados, próximos de 2 a 3 hPa. Nessa região, os desvios de safra alcançam aproximadamente -20% a -25%, evidenciando que a combinação entre aquecimento do ar e maior demanda evaporativa atmosférica esteve associada às condições mais restritivas ao desempenho produtivo do trigo. Além disso, a presença de uma faixa negativa sob desvio do DPV negativo e temperatura próxima da média indica que a resposta da cultura não depende de forma linear do DPV isoladamente, mas da interação entre as variáveis.

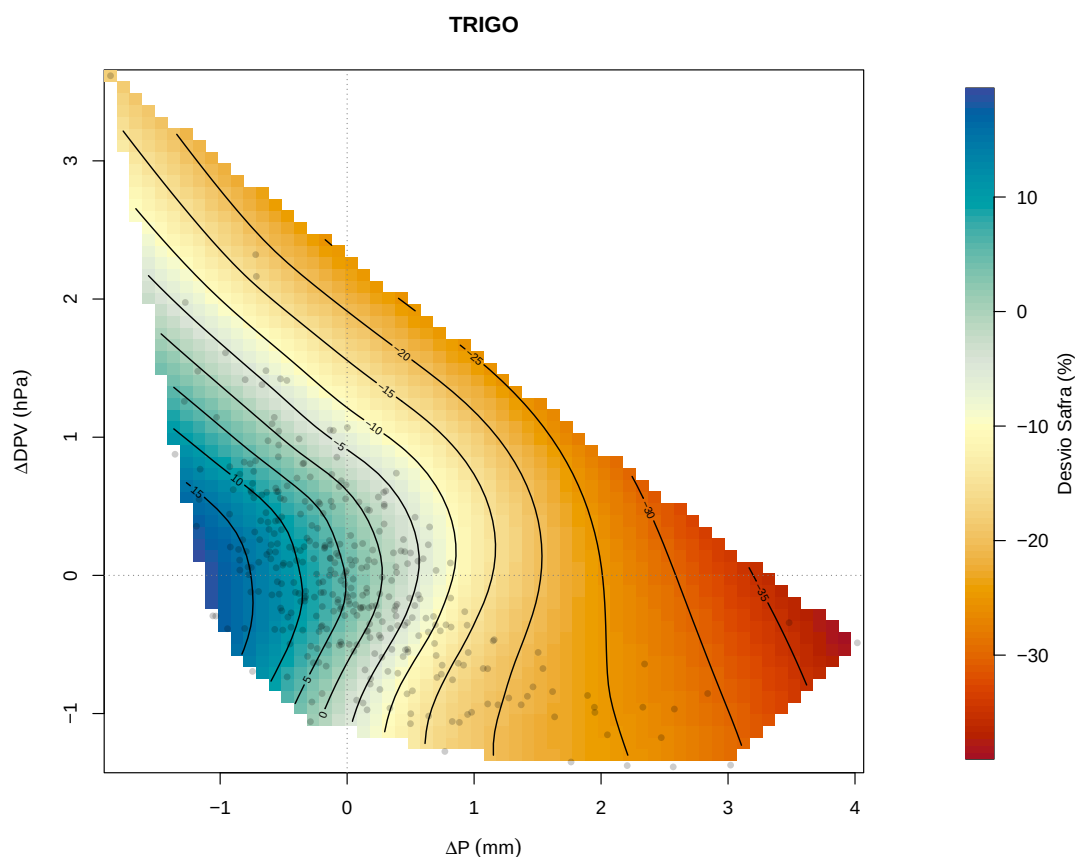
Assim, fica evidente que a variabilidade da safra do trigo foi condicionada pela combinação entre temperatura e DPV, destacando que temperaturas acima da média associadas à elevação do DPV configuram o cenário mais desfavorável à produtividade.

O comportamento observado na Fig. 59 indica que a resposta produtiva do trigo ao regime térmico depende da condição atmosférica associada, com forte influência do DPV na modulação das perdas. A concentração dos desvios positivos sob temperaturas abaixo da média e DPV baixo ou moderado sugere que ambientes termicamente mais amenos favorecem a cultura quando não acompanhados de elevada secura atmosférica. Em contraste, a ocorrência de desvios negativos sob temperaturas acima da média combinadas com DPV elevado reforça que o aumento da demanda evaporativa intensifica o estresse e agrava o efeito do aquecimento sobre o desempenho produtivo, configurando uma condição mais restritiva à cultura (QASEEM; QURESHI; SHAHEEN, 2019; FAKHET et al., 2021).

Esse padrão é coerente com evidências de que calor e secura atmosférica atuam de forma combinada sobre o trigo, produzindo perdas superiores às observadas sob estresses isolados. Estudos experimentais indicam que o aquecimento, quando associado à deficiência hídrica, amplia a redução do rendimento, enquanto trabalhos com DPV mostram que a elevação da demanda evaporativa pode comprometer a assimilação fotossintética, induzir fechamento estomático e limitar o crescimento mesmo na ausência de restrição hídrica edáfica acentuada. Desse modo, a Fig. 59 sugere que a variabilidade da safra do trigo esteve menos relacionada à temperatura isoladamente e mais ao efeito conjunto entre aquecimento e secura atmosférica, com o DPV exercendo papel decisivo na intensificação das perdas produtivas (QASEEM; QURESHI; SHAHEEN, 2019; FAKHET et al., 2021).

A Fig. 60 apresenta a relação entre o desvio da precipitação e o desvio do DPV em associação ao desvio de safra do trigo, permitindo avaliar de forma integrada os efeitos da oferta hídrica atmosférica e da demanda evaporativa sobre a resposta produtiva da cultura. O eixo horizontal representa as anomalias de precipitação, enquanto o eixo vertical expressa as anomalias de DPV, e a superfície de resposta evidencia um comportamento não linear, no qual o sinal produtivo varia conforme a combinação entre essas duas variáveis. De modo geral, observa-se que os desvios positivos de safra se concentram em condições de precipitação abaixo da média ou próxima da média, associadas a DPV baixo a moderado, ao passo que os desvios negativos predominam à medida que a precipitação se eleva.

Figura 60 – Relação da interação entre a precipitação e o DPV sobre os desvios de produtividade do trigo.



Fonte: Autor (2025).

Os maiores desvios positivos de safra concentram-se aproximadamente na faixa entre a variação da precipitação de -1,0 a 0 mm e variação do DPV de -0,5 a 1 hPa, onde os valores superam 10% e atingem máximos próximos de 15%. Esse padrão indica que o trigo respondeu de forma mais favorável em condições de menor precipitação, desde que a demanda evaporativa atmosférica não se elevasse excessivamente. Nessas condições, o DPV exerce papel importante na modulação da resposta, uma vez que o aumento de seus valores reduz progressivamente o benefício produtivo observado sob precipitação próxima ou inferior à média.

Por outro lado, os desvios mais negativos de safra concentram-se nas condições de precipitação acima da média, principalmente quando a anomalia de precipitação assume valores entre 3 e 4 mm, onde os desvios de safra atingem aproximadamente -35%. Nessa faixa, a resposta negativa se mantém mesmo com variações no DPV, indicando que, sob condições de chuva acima da média, o comportamento da safra passa a ser determinado principalmente pela precipitação, com menor influência relativa do déficit de pressão de vapor. Em contraste, o efeito do DPV torna-se mais evidente nas faixas em que a precipitação se mantém próxima ou abaixo da média, modulando a transição entre desvios

positivos e negativos de safra. Assim, se evidencia que a variabilidade da safra do trigo resulta da interação entre precipitação e DPV, mas que a influência mais no desvio de safra negativo foi o excesso de chuva.

O comportamento observado na Fig. 60 indica que a resposta produtiva do trigo depende do balanço entre a oferta hídrica atmosférica e a demanda evaporativa, com predomínio dos desvios positivos sob precipitação igual ou abaixo da média e DPV baixo a moderado. Esse padrão sugere que a cultura responde favoravelmente a condições de disponibilidade hídrica moderada, desde que a secura atmosférica não se eleve de forma expressiva. Em contraste, a concentração dos desvios negativos sob precipitação acima da média reforça que o excesso de chuva constitui importante fator de limitação produtiva, em consonância com evidências de que a precipitação excessiva pode ser mais prejudicial ao trigo do que a deficiência hídrica moderada (LIU et al., 2021; HAFIZA et al., 2025).

Além disso, a distribuição dos desvios negativos sob baixa precipitação e DPV elevado indica que a secura atmosférica intensifica o estresse quando a reposição hídrica pela chuva é limitada. Esse resultado é coerente com estudos que mostram que o aumento do DPV amplia a transpiração, favorece o fechamento estomático e agrava a restrição hídrica da cultura, mesmo quando a precipitação não é extremamente baixa. Desse modo, a Fig. 60 sugere que a variabilidade produtiva do trigo resulta da interação entre precipitação e demanda evaporativa, sendo favoráveis as condições de chuva moderada e DPV baixo a moderado, enquanto o excesso de precipitação ou a combinação entre pouca chuva e elevada secura atmosférica configuram os cenários mais desfavoráveis à produtividade (FAKHET et al., 2021; LIU et al., 2021; HAFIZA et al., 2025).

No caso do trigo, os resultados mostraram um comportamento distinto das demais culturas, com respostas produtivas mais favoráveis associadas, em vários casos, a condições de precipitação próxima ou abaixo da média, umidade do solo moderada e menor secura atmosférica. Em contrapartida, o excesso de precipitação e a elevação da umidade no perfil apareceram de forma recorrente entre as combinações ligadas aos desvios negativos de safra, indicando que o excesso hídrico constituiu importante fator de limitação ao desempenho da cultura. Além disso, as interações com DPV e temperatura mostraram que o trigo respondeu de forma mais favorável sob demanda evaporativa baixa a moderada e temperaturas mais amenas, enquanto a combinação entre aquecimento, maior secura atmosférica e, em alguns casos, excesso de água no sistema esteve associada às condições mais desfavoráveis. Em conjunto, os resultados sugerem que a produtividade do trigo foi condicionada sobretudo pelo equilíbrio entre aeração do solo, regime térmico e demanda evaporativa, com destaque para os efeitos negativos do excesso de chuva sobre a cultura.

5 CONCLUSÃO

A variabilidade climática constitui um dos principais condicionantes da produtividade agrícola no RS, atuando de forma distinta entre culturas, regiões e combinações atmosféricas ao longo da série histórica analisada.

A avaliação das safras de arroz, soja e trigo mostrou que a resposta produtiva às fases do ENOS não é homogênea, sendo observada tendência de melhor desempenho da soja em anos de El Niño, ao passo que arroz e trigo apresentaram respostas mais favoráveis em anos de La Niña. Esses resultados reforçam que a atuação desse fenômeno depende não apenas do sinal médio das anomalias climáticas, mas também da forma como elas incidem sobre os períodos fenológicos mais sensíveis de cada cultura.

Por outro lado, o aumento da produtividade média ao longo das décadas, associado ao progresso tecnológico, ao melhoramento genético e ao aperfeiçoamento do manejo, não eliminou a influência da variabilidade meteorológica sobre o desempenho das safras. As culturas de sequeiro, especialmente soja e trigo, apresentaram maior amplitude dos desvios interanuais, enquanto o arroz irrigado revelou maior estabilidade produtiva relativa, com desvios mais contidos em diferentes mesorregiões do estado. Esse contraste evidencia que os ganhos estruturais do sistema produtivo coexistem com forte sensibilidade às oscilações ambientais, sobretudo quando ocorrem combinações desfavoráveis entre temperatura, precipitação, secura atmosférica e condição hídrica do solo.

No que se refere à base meteorológica utilizada, a validação do ERA5-Land com dados observacionais do INMET demonstrou boa consistência para as variáveis analisadas nas comparações apresentadas, especialmente para temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho, o que reforça a adequação do uso dessa reanálise em estudos agroclimáticos com abordagem espacializada no RS. Tal resultado é particularmente relevante diante das limitações de cobertura espacial das estações meteorológicas e da necessidade de séries contínuas para investigar a interação entre variáveis atmosféricas e produtividade agrícola em escala regional.

Por fim, as análises integradas entre precipitação, temperatura, DPV e umidade do solo evidenciaram que a produtividade agrícola no RS não pode ser explicada por uma variável isolada. Para o arroz, os resultados indicaram maior associação com as condições atmosféricas e com a precipitação, ressaltando, contudo, que maiores volumes de chuva não implicam necessariamente melhor desempenho produtivo. Além disso, os desvios negativos na produção associados a períodos com maior precipitação, podem estar relacionado com a influência da cobertura de nuvens na radiação incidente em superfície, que tem influência direta na produtividade do arroz.

Por outro lado, a soja apresenta de forma mais nítida o papel da limitação hídrica combinada à elevada demanda evaporativa. Safras em anos com grande estresse hídrico atmosférico, alto DPV, apresentaram os maiores desvios de produção. O que também é

indicado pela significativa correlação entre o desvio percentual das safras e a diferença média do DVP em torno da média histórica.

Com relação ao trigo, é notada a importância do equilíbrio entre precipitação, aeração do solo, regime térmico e secura atmosférica, com efeitos negativos recorrentes do excesso de chuva e altas temperaturas. As maiores quebras nas safras de trigo aconteceram em anos nos quais tendências de temperatura, com relação a média histórica foram positivas e também em anos com alta umidade atmosférica, intensa precipitação e baixo DPV.

Finalmente, estas análises demonstram que a variabilidade do rendimento agrícola no RS é governada pelo balanço entre a oferta hídrica e a demanda atmosférica, superando a métrica isolada de anos chuvosos ou secos. Dessa forma, os resultados aqui apresentados podem ser utilizados para fundamentar o desenvolvimento de modelos de previsão de safra, baseados no processamento de séries históricas, visando a quantificação do impacto real da variabilidade climática na produtividade agrícola.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEGOYE, G. A. et al. Waterlogging effects on soybean physiology and hyperspectral reflectance during the reproductive stage. **Agriculture**, MDPI, v. 13, n. 4, p. 844, 2023.
- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.
- ALMEIDA, M.; COELHO, P. A first assessment of ERA5 and ERA5-Land reanalysis air temperature in Portugal. **International Journal of Climatology**, John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, UK, v. 43, n. 14, p. 6643–6663, 2023.
- ALVARES, C. A. et al. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and applied climatology**, Springer, v. 113, p. 407–427, 2013.
- ALVES, K. S.; PONTE, E. M. D. El Niño fuels the spread of soybean rust in Southern Brazil. **OSF**, 2021.
- ARRUDA, A. M. d.; CENTENO, L. N.; NUNES, A. B. Relation Between Major Climatic Indices and Subseasonal Precipitation in Rio Grande do Sul state, Brazil. **Meteorology**, MDPI, v. 4, n. 1, p. 5, 2025.
- ARSEGO, D. A. et al. Índices climáticos associados a variabilidade interanual da produtividade de arroz no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 35, n. 2, p. 209–218, 2020.
- BECK, H. E. et al. MSWEP V2 global 3-hourly 0.1 precipitation: methodology and quantitative assessment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 100, n. 3, p. 473–500, 2019.
- BELL, B. et al. The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Wiley Online Library, v. 147, n. 741, p. 4186–4227, 2021.
- BERLATO, M. et al. El Niño Oscilação Sul: clima, vegetação e agricultura. **Embrapa Trigo**, 2024.
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. El Niño e a agricultura da região Sul do Brasil. **Passo Fundo: Embrapa**, 2011.
- BERTÊ, A. M. et al. Atlas Socioeconômico do Estado do Rio Grande do Sul. **Rio Grande do Sul**, v. 6, 2021.
- C3S; ECMWF. **Copernicus Climate Change Service. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. ERA5-Land: Reanalysis dataset**. 2019. <<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land>>. Acesso em: 02 fev. 2026.

C3S, C. **ERA5-Land hourly time-series data from 1950 to present**. 2024. Acesso em: 05 fev. 2026. Disponível em: <<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land-timeseries>>.

CAI, W. et al. Climate impacts of the El Niño–southern oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, Nature Publishing Group UK London, v. 1, n. 4, p. 215–231, 2020.

CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **An introduction to environmental biophysics**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1998.

COMAS, L. H. et al. Root traits contributing to plant productivity under drought. **Frontiers in plant science**, Frontiers Media SA, v. 4, p. 442, 2013.

COUTINHO, F. S. et al. Alterations in the root phenylpropanoid pathway and root–shoot vessel system as main determinants of the drought tolerance of a soybean genotype. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, Springer, v. 29, n. 4, p. 559–577, 2023.

CRESPO, F. C.; FONTANA, D. C.; SCHIRMBECK, J. Effects of a Strong ENSO Phenomenon on Evapotranspiration Flux Dynamics in the State of Rio Grande do Sul (RS), Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 39, p. e39240034, 2024.

DEE, D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the royal meteorological society**, Wiley Online Library, v. 137, n. 656, p. 553–597, 2011.

DEVI, M. J.; SINCLAIR, T. R.; TALIERCIO, E. Comparisons of the effects of elevated vapor pressure deficit on gene expression in leaves among two fast-wilting and a slow-wilting soybean. **PloS one**, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 10, n. 10, p. e0139134, 2015.

DIAZ, A. F.; STUDZINSKI, C. D.; MECHOSO, C. R. Relationships between precipitation anomalies in Uruguay and southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. **Journal of Climate**, v. 11, n. 2, p. 251–271, 1998.

ECMWF, E. **IFS Documentation – Cy41r2: Observations, Data Assimilation and Physical Processes**. Reading, UK, 2016. Integrated Forecasting System documentation (Parts I, II and IV).

FAKHET, D. et al. Short-term exposure to high atmospheric vapor pressure deficit (VPD) severely impacts durum wheat carbon and nitrogen metabolism in the absence of edaphic water stress. **Plants**, MDPI, v. 10, n. 1, p. 120, 2021.

FAOOFTHEUN. **The State of Food and Agriculture 2021: Making Agrifood Systems More Resilient to Shocks and Stresses**. [S.l.]: FAOoftheUN, 2021.

FEDERIZZI, L. C. et al. **Melhoramento de Espécies Cultivadas: Melhoramento do trigo**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 439–470 p.

FEIJÓ, A. d. R. et al. Water deficit at vegetative stage induces tolerance to high temperature during anthesis in rice. **Plants**, MDPI, v. 12, n. 17, p. 3133, 2023.

FENG, S.; HAO, Z. Quantitative contribution of ENSO to precipitation-temperature dependence and associated compound dry and hot events. **Atmospheric Research**, Elsevier, v. 260, p. 105695, 2021.

FERNANDES, L. G.; GRIMM, A. M. Global ENSO modulation of MJO and its impacts on South America. 2022.

_____. ENSO modulation of global MJO and its impacts on South America. **Journal of Climate**, American Meteorological Society, v. 36, n. 22, p. 7715–7738, 2023.

FU, J. et al. Extreme rainfall reduces one-twelfth of china's rice yield over the last two decades. **Nature Food**, Nature Publishing Group UK London, v. 4, n. 5, p. 416–426, 2023.

GOMES, M. S.; CAVALCANTI, I. F. d. A.; MÜLLER, G. V. Droughts in Homogeneous Areas of South America and Associated Processes during the Months of Austral Spring and Summer. **Advances in Atmospheric Sciences**, Springer, v. 41, n. 12, p. 2337–2353, 2024.

GOUFO, P. et al. Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) Metabolomics: Osmoprotection as a Physiological Strategy for Drought Stress Resistance and Improved Yield. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 586, 2017.

GOWDRA, V. M. G. et al. Root growth, yield and stress tolerance of soybean to transient waterlogging under different climatic regimes. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 15, n. 1, p. 6968, 2025.

GREEN, J. K. et al. Regionally strong feedbacks between the atmosphere and terrestrial biosphere. **Nature geoscience**, Nature Publishing Group UK London, v. 10, n. 6, p. 410–414, 2017.

GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Springer, v. 25, n. 4, p. 537–554, 2011.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E.; GOMES, J. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal of climate**, American Meteorological Society, v. 11, n. 11, p. 2863–2880, 1998.

GROSSIORD, C. et al. Plant responses to rising vapor pressure deficit. **New phytologist**, Wiley Online Library, v. 226, n. 6, p. 1550–1566, 2020.

HAFIZA, B. S. et al. Optimizing wheat productivity and water productivity through deficit irrigation strategies in semi-arid environments. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 15, n. 1, p. 20630, 2025.

HAMED, R. et al. One-third of the global soybean production failure in 2012 is attributable to climate change. **Communications Earth & Environment**, Nature Publishing Group UK London, v. 6, n. 1, p. 199, 2025.

_____. Impacts of hot-dry compound extremes on US soybean yields. **Earth System Dynamics Discussions**, v. 12, p. 1–26, 2021.

HATFIELD, J. L. et al. Climate impacts on agriculture: implications for crop production. **Agronomy journal**, Wiley Online Library, v. 103, n. 2, p. 351–370, 2011.

HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly journal of the royal meteorological society**, Wiley Online Library, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020.

HOBSON, D. J. et al. The establishment of winter wheat root system architecture in field soils: The effect of soil type on root development in a temperate climate. **Soil use and Management**, Wiley Online Library, v. 39, n. 1, p. 198–208, 2023.

HOSSAIN, M. S. et al. Differential drought responses of soybean genotypes in relation to photosynthesis and growth-yield attributes. **Plants**, MDPI, v. 13, n. 19, p. 2765, 2024.

HU, X. et al. Combined impact of ENSO and Antarctic Oscillation on austral spring precipitation in Southeastern South America (SESA). **Climate Dynamics**, Springer, v. 61, n. 1, p. 399–412, 2023.

IBGE, I. **Divisões Regionais do Brasil**. 2019. <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/divisao-regional/15778-divisoes-regionais-do-brasil.html?edicao=15905&t=downloads>>. Acesso em: 09 set. 2025.

_____. **Cidades e Estados: Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs.html>>. Acesso em: 12 ago. 2025.

INMET, I. **BDMEP: Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. 2025. <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 21 jul. 2025.

IPCC. Summary for Policymakers. In: Core Writing Team and Hoesung Lee and José Romero (Ed.). **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. p. 1–34.

JIAN, Y. et al. Increased extreme hourly precipitation over china's rice paddies from 1961 to 2012. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 10, n. 1, p. 10609, 2020.

JUMRANI, K.; BHATIA, V. S. Impact of combined stress of high temperature and water deficit on growth and seed yield of soybean. **Physiology and Molecular biology of Plants**, Springer, v. 24, n. 1, p. 37–50, 2018.

JUNIOR, A. d. M.; GOMES, A. d. S.; SANTOS, A. d. Sistema de cultivo de arroz irrigado no Brasil. **Enbrapa Temperate Agriculture**, 2004.

JÚNIOR, R. d. S. N. 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**, Elsevier, v. 290, p. 108038, 2020.

KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 77, n. 3, p. 437–471, 1996.

KIBLER, C. L. et al. Evapotranspiration regulates leaf temperature and respiration in dryland vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 339, p. 109560, 2023.

- KOBAYASI, K. et al. Effects of temperature, solar radiation, and vapor-pressure deficit on flower opening time in rice. **Plant Production Science**, Crop Science Society of Japan, v. 13, n. 1, p. 21–28, 2010.
- KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas**, v. 2, n. 1, p. 171–182, 2001.
- KUKAL, M. et al. Atmospheric dryness impacts on crop yields are buffered in soils with higher available water capacity. **Geoderma**, Elsevier, v. 429, p. 116270, 2023.
- LAPAZ, A. d. M. et al. Response of soybean to soil waterlogging associated with iron excess in the reproductive stage. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, Springer, v. 26, n. 8, p. 1635–1648, 2020.
- LEE, H. et al. Climate change 2023 synthesis report summary for policymakers. **CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report: Summary for Policymakers**, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2024.
- LIN, C. et al. The pyramiding of three key root traits aid breeding of flood-tolerant rice. **Plants**, MDPI, v. 11, n. 15, p. 2033, 2022.
- LIU, W. et al. Excessive rainfall is the key meteorological limiting factor for winter wheat yield in the middle and lower reaches of the Yangtze River. **Agronomy**, MDPI, v. 12, n. 1, p. 50, 2021.
- LOBELL, D. B.; FIELD, C. B. Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. **Environmental research letters**, v. 2, n. 1, p. 014002, 2007.
- LONGO-MINNOLO, G. et al. Assessing the use of ERA5-Land reanalysis and spatial interpolation methods for retrieving precipitation estimates at basin scale. **Atmospheric Research**, Elsevier, v. 271, p. 106131, 2022.
- LÓPEZ, J.; WAY, D. A.; SADOK, W. Systemic effects of rising atmospheric vapor pressure deficit on plant physiology and productivity. **Global Change Biology**, Wiley Online Library, v. 27, n. 9, p. 1704–1720, 2021.
- LORENZ, C.; KUNSTMANN, H. The hydrological cycle in three state-of-the-art reanalyses: Intercomparison and performance analysis. **Journal of Hydrometeorology**, v. 13, n. 5, p. 1397–1420, 2012.
- MAITI, A. et al. Optimal rainfall threshold for monsoon rice production in India varies across space and time. **Communications Earth & Environment**, Nature Publishing Group UK London, v. 5, n. 1, p. 302, 2024.
- MAPA, M. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) – estado do Rio Grande do Sul**. 2023. <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/zoneamento-agricola>>. Publicado via portarias do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento e elaborado com base em modelagem agrometeorológica validada pela Embrapa. Acesso em 11 ago. 2025.
- MARTÍNEZ, C. P. et al. Rice breeding in latin America. **Plant Breeding Reviews: Volume 38**, Wiley Online Library, p. 187–278, 2014.

MARTINEZ, D. M.; SOLMAN, S. A. Synoptic patterns associated with extreme precipitation events over southeastern South America during spring and summer seasons. **Int J Climatol**, v. 42, n. 16, p. 10387–10406, 2022.

MATZENAUER, R.; RADIN, B.; MALUF, J. R. T. O fenômeno ENOS e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul. **Agrometeoros**, v. 25, n. 2, 2017.

MISHRA, R. K. Fresh water availability and its global challenge. **British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies**, v. 4, n. 3, p. 1–78, 2023.

MONTEITH, J.; UNSWORTH, M. **Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere**. [S.l.]: Academic press, 2013.

MOURTZINIS, S.; SPECHT, J. E.; CONLEY, S. P. Defining optimal soybean sowing dates across the US. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 9, n. 1, p. 2800, 2019.

MUÑOZ-SABATER, J. et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. **Earth system science data**, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 13, n. 9, p. 4349–4383, 2021.

NAUDTS, K. et al. A vertically discretised canopy description for ORCHIDEE (SVN r2290) and the modifications to the energy, water and carbon fluxes. **Geoscientific Model Development**, Copernicus GmbH, v. 8, n. 7, p. 2035–2065, 2015.

NOAA, Climate Prediction Center (CPC). **Historical El Niño / La Niña Episodes – Oceanic Niño Index (ONI v5)**. 2025. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php>. Página atualizada automaticamente no primeiro mês de cada mês. Acesso em 13 ago. 2025.

NOVICK, K. A. et al. The impacts of rising vapour pressure deficit in natural and managed ecosystems. **Plant, Cell & Environment**, Wiley Online Library, v. 47, n. 9, p. 3561–3589, 2024.

_____. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes. **Nature climate change**, Nature Publishing Group UK London, v. 6, n. 11, p. 1023–1027, 2016.

ODONE, A.; CHANGDAR, S.; THORUP-KRISTENSEN, K. Winter wheat phenotyping for deep root growth and function, reduced water stress and increased uptake of deep N and water. **Annals of Botany**, Oxford University Press, v. 136, n. 5-6, p. 1101–1114, 2025.

OHSUMI, A. et al. Response of leaf photosynthesis to vapor pressure difference in rice (*Oryza sativa* L) varieties in relation to stomatal and leaf internal conductance. **Plant production science**, Crop Science Society of Japan, v. 11, n. 2, p. 184–191, 2008.

PAIS, I. P. et al. Wheat crop under waterlogging: potential soil and plant effects. **Plants**, MDPI, v. 12, n. 1, p. 149, 2022.

PANDA, D.; BARIK, J. Flooding tolerance in rice: focus on mechanisms and approaches. **Rice Science**, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 43–57, 2021.

PÁNTANO, V. C.; PENALBA, O. C.; IACOVONE, M. F. Precipitation variability at sub-seasonal scale under the ENSO influence in southeastern South America. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Springer, v. 38, n. 12, p. 4697–4707, 2024.

PARKER, W. S. Reanalyses and observations: What's the difference? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, n. 9, p. 1565–1572, 2016.

PASQUALOTTO, G. et al. Assessment of canopy conductance responses to vapor pressure deficit in eight hazelnut orchards across continents. **Frontiers in Plant Science**, Frontiers Media SA, v. 12, p. 767916, 2021.

PINTO, R. S. et al. Physiological traits for improving heat tolerance in wheat. **Euphytica**, v. 174, n. 3, p. 423–435, 2010.

QASEEM, M. F.; QURESHI, R.; SHAHEEN, H. Effects of pre-anthesis drought, heat and their combination on the growth, yield and physiology of diverse wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes varying in sensitivity to heat and drought stress. **Scientific reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 9, n. 1, p. 6955, 2019.

RADONS, S. Z. et al. Climate risk of Asian soybean rust occurrence in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Tropical Plant Pathology**, Springer, v. 46, p. 435–442, 2021.

REBOITA, M. S. et al. Impacts of teleconnection patterns on South America climate. **Annals of the New York Academy of Sciences**, Wiley Online Library, v. 1504, n. 1, p. 116–153, 2021.

_____. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, SciELO Brasil, v. 25, p. 185–204, 2010.

REHBEIN, A.; AMBRIZZI, T. ENSO teleconnections pathways in South America. **Climate Dynamics**, Springer, v. 61, n. 3, p. 1277–1292, 2023.

SAKHRAOUI, F.; ARRA, A. A.; ŞİŞMAN, E. Assessing reanalysis ERA-5 LAND precipitation data for soil erosion modeling: Performance, challenges, and insights. **Earth Science Informatics**, Springer, v. 18, n. 3, p. 450, 2025.

SANTOS, M. S. N. dos et al. A comparative relation of distinct reference crop evapotranspiration models for Southern Brazil. In: **Colloquium Agrariae**. ISSN: 1809-8215. [S.l.: s.n.], 2023. v. 19, n. 1, p. 261–282.

SCHEEREN, P. L. et al. Melhoramento de trigo no Brasil. **Trigo no Brasil**, p. 427–452, 2012.

SILVA, F. et al. **Soja: do plantio à colheita**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2022.

SIMMONS, A. et al. A reassessment of temperature variations and trends from global reanalyses and monthly surface climatological datasets. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Wiley Online Library, v. 143, n. 702, p. 101–119, 2017.

SPGG, D. D. **PIBVis: Visualização de Dados sobre o Produto Interno Bruto do Estado do Rio Grande do Sul**. 2025. <<https://pibvis.dee.rs.gov.br/>>. Acesso em: 12 ago. 2025.

STUERZ, S.; ASCH, F. Responses of rice growth to day and night temperature and relative air humidity—leaf elongation and assimilation. **Plants**, MDPI, v. 10, n. 1, p. 134, 2021.

THENVEETIL, N. et al. Drought and high nighttime temperature impact on soybean seed yield and quality under ambient and elevated CO₂ environments. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 15, n. 1, p. 36679, 2025.

TIAN, L.-x. et al. How does the waterlogging regime affect crop yield? a global meta-analysis. **Frontiers in Plant Science**, Frontiers Media SA, v. 12, p. 634898, 2021.

TONG, S. et al. Responses of key root traits in the genus *Oryza* to soil flooding mimicked by stagnant, deoxygenated nutrient solution. **Journal of Experimental Botany**, Oxford University Press UK, v. 74, n. 6, p. 2112–2126, 2023.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; MACKARO, J. Atmospheric moisture transports from ocean to land and global energy flows in reanalyses. **Journal of climate**, American Meteorological Society, v. 24, n. 18, p. 4907–4924, 2011.

UGA, Y. et al. Control of root system architecture by DEEPER ROOTING 1 increases rice yield under drought conditions. **Nature genetics**, Nature Publishing Group US New York, v. 45, n. 9, p. 1097–1102, 2013.

VALENTE, P. T. et al. Classification of precipitation anomalies in the Rio Grande do Sul in ENSO events in the 20th century. **Sociedade & Natureza**, SciELO Brasil, v. 35, p. e66073, 2023.

VANELLA, D. et al. Comparing the use of ERA5 reanalysis dataset and ground-based agrometeorological data under different climates and topography in Italy. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, Elsevier, v. 42, p. 101182, 2022.

WANG, X. et al. Physiological response of soybean plants to water deficit. **Frontiers in Plant Science**, Frontiers Media SA, v. 12, p. 809692, 2022.

WASSON, A. P. et al. Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. **Journal of experimental botany**, Oxford University Press, v. 63, n. 9, p. 3485–3498, 2012.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

XIONG, R. et al. Root system architecture, physiological and transcriptional traits of soybean (*Glycine max* L.) in response to water deficit: A review. **Physiologia Plantarum**, Wiley Online Library, v. 172, n. 2, p. 405–418, 2021.

YUAN, W. et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. **Science advances**, American Association for the Advancement of Science, v. 5, n. 8, p. eaax1396, 2019.

ZHANG, Y. et al. Changed relationship between compound dry-hot events and ENSO at the global scale. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 621, p. 129 – 559, 2023.

Apêndice A – Validação dados Era5–Land

A.1 Temperatura do ar

Tabela 2 – Índices estatísticos da validação do ERA5-Land para a temperatura do ar (T). N é o número de pares de dados utilizados. r é o coeficiente de correlação de Pearson. RMSE é a raiz do erro quadrático médio, MBE é o viés médio (ERA5-Land menos observações) e MAE é o erro absoluto médio (todas as métricas em °C). * indica $p < 0,05$ e ** indica $p < 0,01$, calculado a partir de r e N .

Estação	N	r	RMSE (°C)	MBE (°C)	MAE (°C)
Alegrete (EMA)	154670	0.97**	1.63	0.32	1.19
Alegrete (EMC)	14365	0.95**	1.98	0.06	1.48
Bage (EMA)	157670	0.97**	1.49	-0.12	1.12
Bage (EMC)	43531	0.96**	1.83	-0.48	1.41
Bento Goncalves (EMA)	158388	0.96**	1.69	-0.01	1.26
Bento Goncalves (EMC)	33265	0.95**	1.83	0.06	1.36
Bom Jesus (EMC)	41328	0.95**	1.71	0.08	1.29
Cacapava Do Sul (EMA)	161823	0.96**	1.91	0.66	1.47
Cacapava Do Sul (EMC)	4643	0.94**	2.01	0.56	1.51
Cachoeira Do Sul (EMC)	9486	0.95**	1.83	-0.11	1.38
Camaqua (EMA)	153608	0.97**	1.51	0.30	1.15
Camaqua (EMC)	8588	0.93**	1.96	-0.14	1.33
Cambara Do Sul (EMA)	73802	0.96**	1.55	0.30	1.16
Cambara Do Sul (EMC)	17969	0.95**	1.62	0.07	1.21
Campo Bom (EMC)	19562	0.95**	2.28	-1.05	1.82
Canela (EMC)	9849	0.94**	2.03	0.86	1.55
Cangucu (EMA)	151309	0.96**	1.70	0.58	1.30
Capao Do Leao Pelotas (EMA)	50081	0.97**	1.33	0.02	1.00
Caxias Do Sul (EMC)	40643	0.95**	1.79	-0.05	1.34
Cruz Alta (EMA)	155005	0.97**	1.72	0.51	1.28
Cruz Alta (EMC)	37910	0.95**	1.82	0.09	1.38
Dom Pedrito (EMA)	112780	0.97**	1.53	0.03	1.15
Dom Pedrito (EMC)	1637	0.95**	1.88	-0.22	1.39

Continua na próxima página

Estação			<i>N</i>	<i>r</i>	RMSE (°C)	MBE (°C)	MAE (°C)
Encruzilhada (EMA)	Do	Sul	60139	0.97**	1.57	-0.11	1.15
Encruzilhada (EMC)	Do	Sul	39791	0.96**	1.68	-0.11	1.27
Erechim (EMA)			146976	0.95**	1.82	0.21	1.36
Frederico (EMA)	Westphalen		150784	0.95**	1.84	0.37	1.37
Guapore (EMC)			9282	0.94**	2.21	-0.69	1.74
Ibiruba (EMA)			101066	0.97**	1.64	0.28	1.22
Ibiruba (EMC)			19781	0.95**	1.94	-0.02	1.45
Irai (EMC)			36280	0.94**	2.27	0.02	1.78
Itaqui (EMC)			12989	0.91**	2.65	-0.69	1.94
Jaguarao (EMA)			154936	0.98**	1.35	0.27	1.00
Lagoa Vermelha (EMA)			156584	0.96**	1.54	-0.09	1.13
Lagoa Vermelha (EMC)			32622	0.94**	1.88	-0.19	1.41
Lajeado (EMC)			6449	0.95**	2.34	-1.31	1.90
Novo Hamburgo (EMC)			5792	0.95**	1.88	-0.39	1.42
Palmeira (EMA)	Das Missoes		143716	0.95**	1.79	0.04	1.33
Palmeira (EMC)	Das Missoes		9183	0.94**	2.05	-0.42	1.57
Panambi (EMC)			7195	0.95**	2.14	-0.68	1.66
Passo Fundo (EMA)			160614	0.97**	1.52	0.17	1.11
Passo Fundo (EMC)			44062	0.95**	1.82	-0.04	1.37
Pelotas (EMC)			33499	0.96**	1.58	-0.13	1.18
Porto Alegre (EMC)			44967	0.96**	1.65	-0.50	1.26
Porto Alegre Novo (EMA)	Belem		21858	0.97**	1.32	0.07	0.98
Porto Alegre Jardim Botânico (EMA)			210403	0.97**	1.40	-0.32	1.04
Quarai (EMA)			148970	0.97**	1.89	0.22	1.47
Rio Grande (EMA)			184811	0.95**	1.79	0.11	1.33
Rio Grande (EMC)			34852	0.95**	1.62	-0.20	1.21
Rio Pardo (EMA)			156727	0.97**	1.51	-0.10	1.11

Continua na próxima página

Estação	<i>N</i>	<i>r</i>	RMSE (°C)	MBE (°C)	MAE (°C)
Santa Maria (EMA)	199282	0.96**	1.78	-0.09	1.28
Santa Maria (EMC)	45677	0.96**	1.91	-0.26	1.43
Santa Rosa (EMA)	142083	0.97**	1.78	0.32	1.35
Santa Vitoria Do Palmar (EMA)	42633	0.96**	1.63	0.00	1.25
Santa Vitoria Do Palmar Barra Do Chui (EMA)	138252	0.96**	1.50	0.16	1.11
Santana Da Boa Vista (EMA)	0				
Santana Do Livramento (EMA)	167295	0.97**	1.70	0.59	1.26
Santana Do Livramento (EMC)	22949	0.96**	1.76	0.09	1.32
Santiago (EMA)	134471	0.96**	1.76	0.22	1.31
Santo Augusto (EMA)	179831	0.96**	1.61	0.04	1.19
Sao Borja (EMA)	143739	0.97**	1.64	0.11	1.18
Sao Gabriel (EMA)	148473	0.97**	1.70	-0.55	1.32
Sao Gabriel (EMC)	7118	0.95**	2.05	0.09	1.61
Sao Jose Dos Ausentes (EMA)	152716	0.95**	2.09	1.20	1.67
Sao Luiz Gonzaga (EMA)	141229	0.96**	1.86	-0.18	1.43
Sao Luiz Gonzaga (EMC)	42079	0.95**	2.06	-0.40	1.60
Sao Vicente Do Sul (EMA)	76034	0.97**	1.54	0.32	1.11
Serafina Correa (EMA)	80226	0.96**	1.94	0.10	1.53
Soledade (EMA)	145725	0.95**	1.81	-0.13	1.35
Teutonia (EMA)	106039	0.96**	1.83	-0.79	1.41
Teutonia (EMC)	8452	0.94**	2.20	-0.72	1.71
Torres (EMA)	0				
Torres (EMC)	0				
Triunfo (EMC)	25817	0.96**	1.74	-0.41	1.29
Tupancireta (EMA)	75695	0.97**	1.61	0.01	1.18
Uruguaiana (EMA)	157725	0.97**	1.56	0.14	1.16

Continua na próxima página

Estação	N	r	RMSE (°C)	MBE (°C)	MAE (°C)
Uruguaiana (EMC)	34738	0.96**	1.88	-0.15	1.42
Vacaria (EMA)	145404	0.97**	1.49	0.30	1.12
Vacaria (EMC)	9561	0.95**	1.68	-0.13	1.25

A.2 Temperatura do ponto do orvalho

Tabela 3 – Índices estatísticos da validação do ERA5-Land para a temperatura do ponto de orvalho (Td). N é o número de pares de dados utilizados. r é o coeficiente de correlação de Pearson. RMSE é a raiz do erro quadrático médio, MBE é o viés médio (ERA5-Land menos observações) e MAE é o erro absoluto médio (todas as métricas em °C). * indica $p < 0,05$ e ** indica $p < 0,01$, calculado a partir de r e N .

Estação	N	r	RMSE (°C)	MBE (°C)	MAE (°C)
Alegrete (EMA)	154668	0.96**	1.55	0.40	1.14
Bage (EMA)	157670	0.96**	1.49	0.26	1.10
Bage (EMC)	18457	0.94**	1.88	-0.48	1.36
Bento Goncalves (EMA)	158387	0.95**	1.78	0.90	1.28
Bom Jesus (EMC)	17314	0.94**	1.64	-0.04	1.16
Cacapava Do Sul (EMA)	161661	0.96**	1.57	0.28	1.15
Camaqua (EMA)	142443	0.97**	1.40	-0.57	1.09
Cambara Do Sul (EMA)	73783	0.94**	1.62	0.18	1.15
Cangucu (EMA)	141026	0.95**	1.65	0.43	1.16
Capao Do Leao Pelotas (EMA)	40350	0.97**	1.44	-0.75	1.14
Caxias Do Sul (EMC)	19137	0.95**	1.52	0.39	1.09
Cruz Alta (EMA)	155004	0.95**	1.75	0.77	1.26
Cruz Alta (EMC)	15146	0.89**	2.67	-1.15	1.88
Dom Pedrito (EMA)	113465	0.96**	1.45	0.25	1.06
Encruzilhada Do Sul (EMA)	53008	0.96**	1.52	0.09	1.12
Encruzilhada Do Sul (EMC)	14695	0.96**	1.48	0.12	1.05
Erechim (EMA)	146974	0.95**	1.66	0.67	1.21

Continua na próxima página

Estação		<i>N</i>	<i>r</i>	RMSE (°C)	MBE (°C)	MAE (°C)
Frederico Westphalen (EMA)		150783	0.95**	1.71	0.74	1.26
Ibiruba (EMA)		97693	0.95**	1.60	0.42	1.14
Irai (EMC)		10835	0.94**	1.71	-0.20	1.28
Jaguarao (EMA)		154754	0.97**	1.40	-0.43	1.09
Lagoa Vermelha (EMA)		156583	0.95**	1.65	0.66	1.15
Lagoa Vermelha (EMC)		17716	0.94**	1.65	0.22	1.13
Palmeira Das Missoes (EMA)		143705	0.94**	1.93	0.82	1.34
Passo Fundo (EMA)		160614	0.95**	1.59	0.53	1.12
Passo Fundo (EMC)		17670	0.95**	1.66	0.69	1.20
Porto Alegre (EMC)		19277	0.96**	1.54	-0.71	1.16
Porto Alegre Belem Novo (EMA)		21858	0.95**	1.51	-0.42	1.12
Porto Alegre Jardim Botânico (EMA)		210391	0.96**	1.42	0.38	1.04
Quarai (EMA)		148964	0.96**	1.64	0.51	1.21
Rio Grande (EMA)		176344	0.96**	1.51	0.52	1.10
Rio Grande (EMC)		9622	0.93**	1.87	-0.58	1.35
Rio Pardo (EMA)		156676	0.96**	1.46	0.19	1.08
Santa Maria (EMA)		190662	0.95**	1.58	-0.01	1.18
Santa Maria (EMC)		19516	0.95**	1.86	-0.83	1.42
Santa Rosa (EMA)		142083	0.95**	1.82	0.83	1.31
Santa Vitoria Do Palmar (EMC)		16904	0.97**	1.45	-0.59	1.09
Santa Vitoria Do Palmar Barra Do Chui (EMA)		134639	0.96**	1.63	-0.58	1.25
Santana Do Livramento (EMA)		163442	0.95**	1.92	0.94	1.43
Santana Do Livramento (EMC)		8753	0.93**	2.14	-0.59	1.53
Santiago (EMA)		134471	0.96**	1.64	0.63	1.19
Santo Augusto (EMA)		179812	0.90**	2.71	1.44	2.22
Sao Borja (EMA)		143739	0.96**	1.75	0.72	1.29
Sao Gabriel (EMA)		148447	0.96**	1.51	-0.31	1.16

Continua na próxima página

Estação	<i>N</i>	<i>r</i>	RMSE (°C)	MBE (°C)	MAE (°C)
Sao Jose Dos Ausentes (EMA)	140656	0.93**	1.89	0.76	1.31
Sao Luiz Gonzaga (EMA)	140636	0.94**	1.97	0.89	1.43
Sao Luiz Gonzaga (EMC)	17227	0.95**	1.62	-0.23	1.20
Sao Vicente Do Sul (EMA)	70431	0.96**	1.47	0.06	1.10
Serafina Correa (EMA)	79169	0.95**	1.50	0.33	1.10
Soledade (EMA)	145725	0.95**	1.55	0.49	1.10
Teutonia (EMA)	106039	0.95**	1.48	0.21	1.09
Tupancireta (EMA)	75684	0.96**	1.42	0.05	1.03
Uruguaiana (EMA)	157674	0.96**	1.57	0.27	1.17
Uruguaiana (EMC)	12165	0.91**	2.41	-0.38	1.78
Vacaria (EMA)	145245	0.95**	1.45	0.20	1.05

A.3 Precipitação

Tabela 4 – Índices estatísticos da validação do ERA5-Land para a precipitação mensal total. *N* é o número de pares de dados utilizados. *r* é o coeficiente de correlação de Pearson. RMSE é a raiz do erro quadrático médio, MBE é o viés médio (ERA5-Land menos observações) e MAE é o erro absoluto médio (todas as métricas em mm). PBIAS (%) é o viés percentual, e * indica $p < 0,05$, ** indica $p < 0,01$ e *** indica $p < 0,001$, calculado a partir de *r* e *N*.

Estação	<i>r</i>	RMSE	MBE	MAE	PBIAS (%)	<i>N</i>
Alegrete (EMA)	0.72***	66.61	11.19	48.01	8.61	207
Bage (EMA)	0.80***	51.17	11.16	39.54	9.29	215
Bento Goncalves (EMA)	0.71***	65.20	16.54	49.14	11.55	213
Cacapava Do Sul (EMA)	0.74***	65.30	-3.53	48.14	-2.38	217
Camaqua (EMA)	0.74***	50.57	-0.87	38.63	-0.67	205
Cambara Do Sul (EMA)	0.74***	71.24	29.73	56.56	21.23	99
Cangucu (EMA)	0.78***	50.62	2.50	37.95	1.95	202

Continua na próxima página

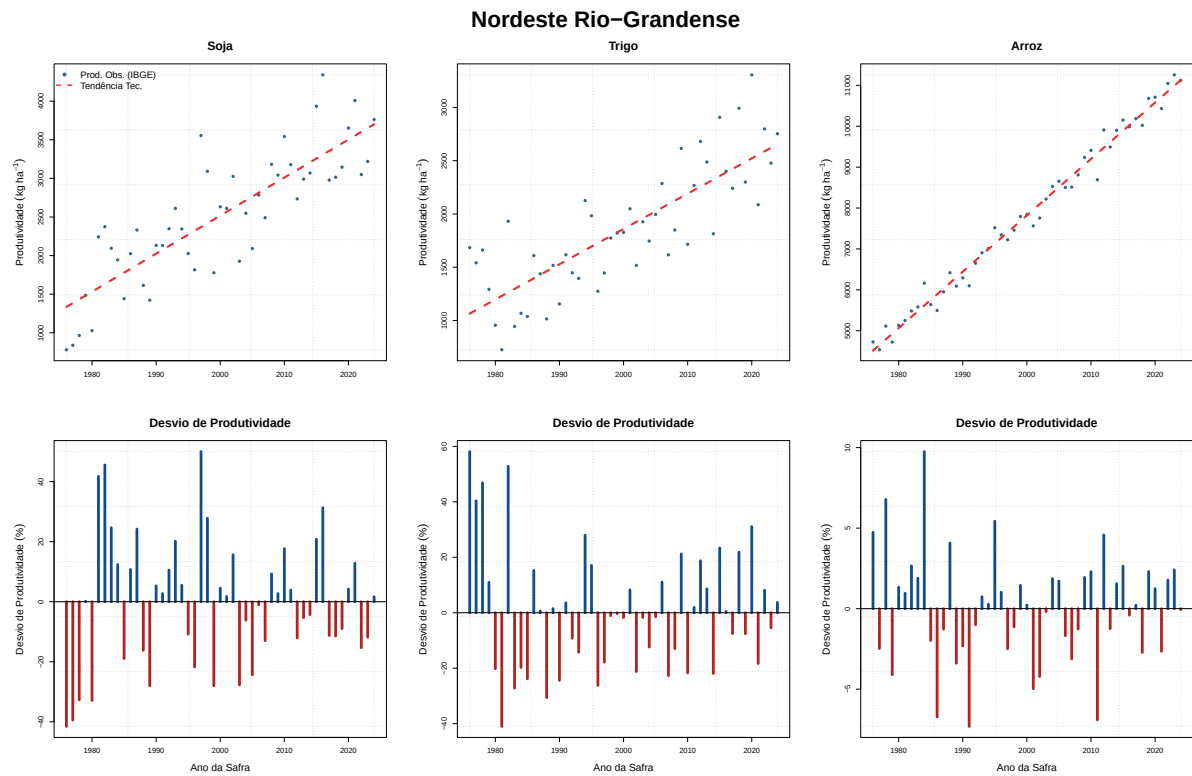
Estação	r	RMSE	MBE	MAE	PBIAS (%)	N
Capao Do Leao Pelotas (EMA)	0.85***	45.77	-1.10	34.15	-0.88	67
Cruz Alta (EMA)	0.83***	54.95	4.98	41.21	3.31	210
Dom Pedrito (EMA)	0.74***	69.06	24.69	47.03	21.97	139
Encruzilhada Do Sul (EMA)	0.83***	50.91	-13.54	36.57	-9.83	79
Erechim (EMA)	0.80***	65.70	30.04	48.04	20.43	191
Frederico Westphalen (EMA)	0.78***	67.78	3.88	49.46	2.34	205
Ibiruba (EMA)	0.81***	59.90	5.83	45.33	3.65	134
Jaguarao (EMA)	0.82***	46.40	3.95	35.67	3.42	208
Lagoa Vermelha (EMA)	0.79***	57.70	18.90	42.99	13.19	211
Palmeira Das Missoes (EMA)	0.79***	71.56	34.01	54.26	23.64	177
Passo Fundo (EMA)	0.79***	59.46	15.46	44.02	10.01	218
Porto Alegre Belem Novo (EMA)	0.86***	53.77	-1.36	36.53	-0.92	28
Porto Alegre Jardim Botânico (EMA)	0.71***	54.52	13.09	40.63	10.58	284
Quarai (EMA)	0.78***	71.66	21.67	51.65	17.88	196
Rio Grande (EMA)	0.72***	52.55	11.69	39.57	10.95	241
Rio Pardo (EMA)	0.74***	60.58	12.57	43.52	9.65	209
Santa Maria (EMA)	0.65***	76.96	13.25	51.53	9.69	266
Santa Rosa (EMA)	0.80***	67.43	24.30	51.08	17.21	179
Santa Vitoria Do Palmar Barra Do Chui (EMA)	0.73***	50.34	10.52	36.20	10.45	179
Santana Do Livramento (EMA)	0.76***	61.99	4.49	43.18	3.43	215
Santiago (EMA)	0.81***	62.11	3.96	46.76	2.57	175
Santo Augusto (EMA)	0.81***	58.52	9.14	44.93	5.71	238
Sao Borja (EMA)	0.65***	86.39	33.78	60.50	27.93	175
Sao Gabriel (EMA)	0.75***	63.49	14.79	47.28	11.41	198
Sao Jose Dos Ausentes (EMA)	0.72***	69.50	38.55	52.16	29.44	203

Continua na próxima página

Estação	r	RMSE	MBE	MAE	PBIAS (%)	N
Sao Luiz Gonzaga (EMA)	0.81***	66.27	11.74	48.24	7.44	186
Sao Vicente Do Sul (EMA)	0.82***	58.97	-14.83	45.15	-10.21	102
Serafina Correa (EMA)	0.84***	69.99	-22.50	46.43	-13.52	110
Soledade (EMA)	0.78***	63.29	1.86	46.80	1.19	194
Teutonia (EMA)	0.83***	50.39	-8.46	38.77	-5.41	123
Tupancireta (EMA)	0.86***	55.83	-19.25	40.32	-11.82	100
Uruguiana (EMA)	0.78***	70.41	32.31	52.36	28.60	212
Vacaria (EMA)	0.82***	51.00	3.73	38.58	2.36	193

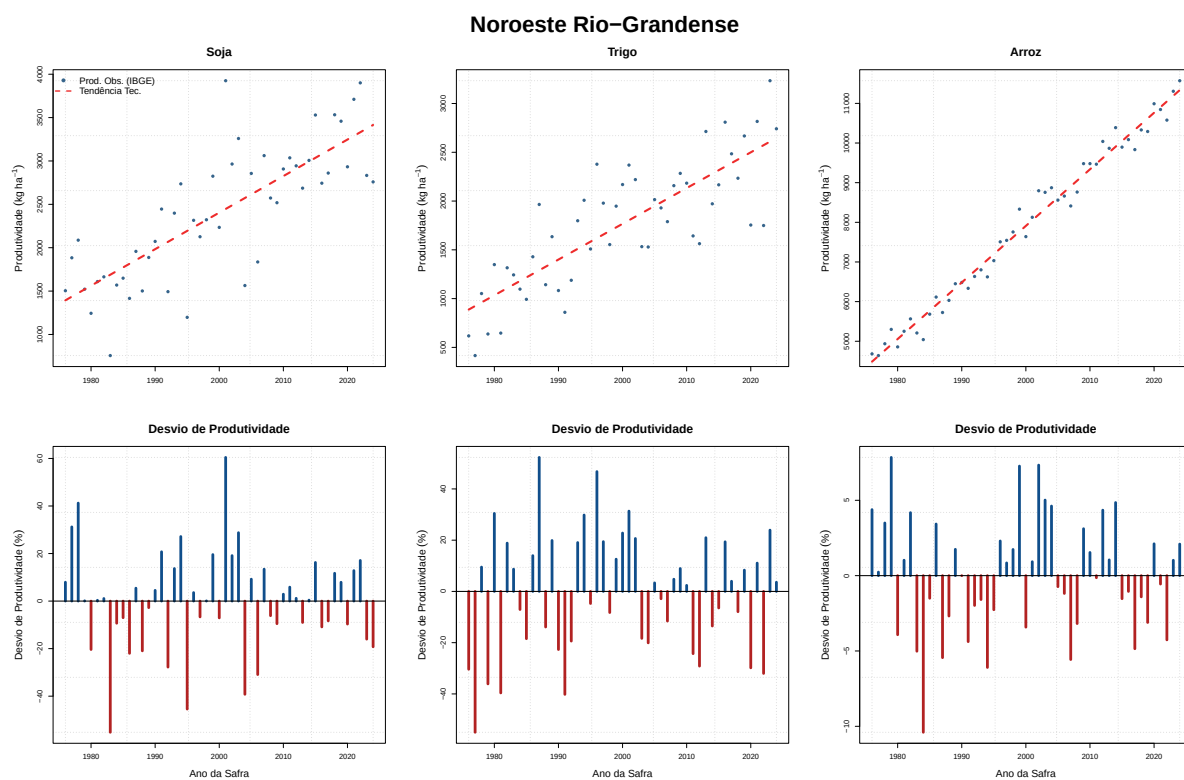
Apêndice B – Evolução temporal e desvios percentuais das Safras no RS

Figura 61 – Mesmo que Fig. 6, porém para a mesorregião Nordeste do RS.



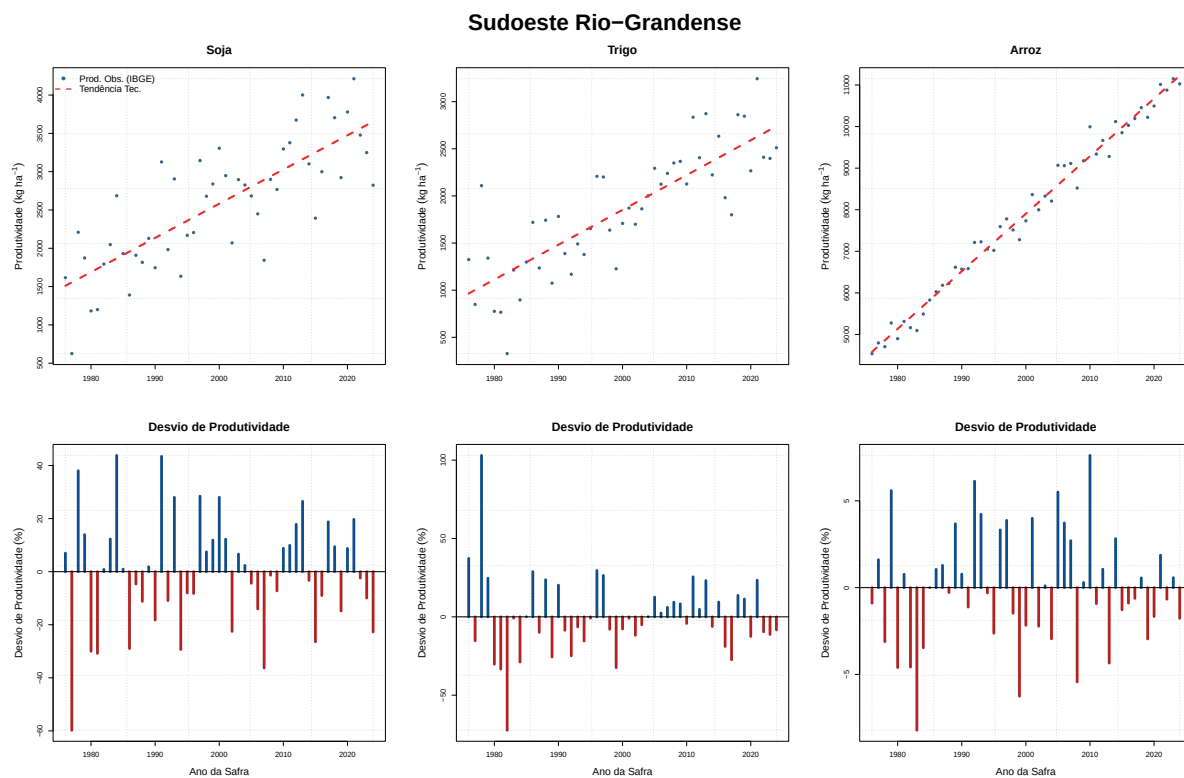
Fonte: Autor (2026).

Figura 62 – Mesmo que Fig. 6, porém para a mesorregião Noroeste do RS.



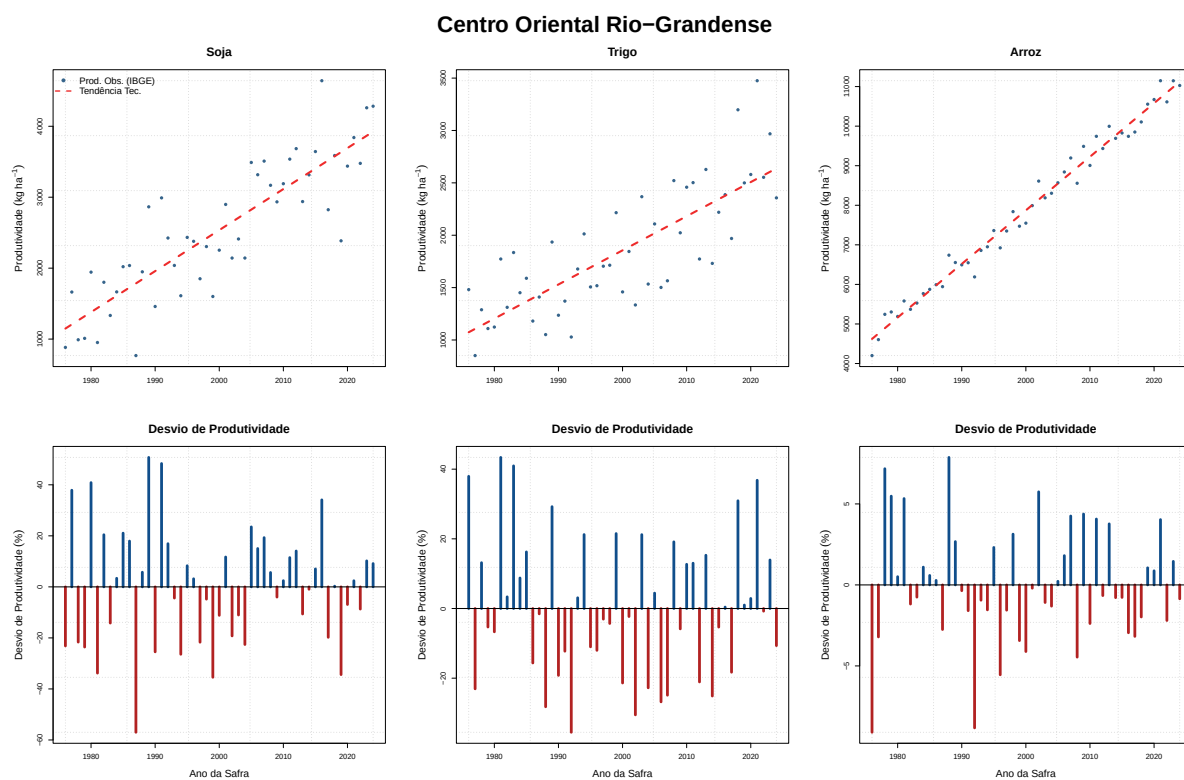
Fonte: Autor (2026).

Figura 63 – Mesmo que Fig. 6, porém para a mesorregião Sudoeste do RS.



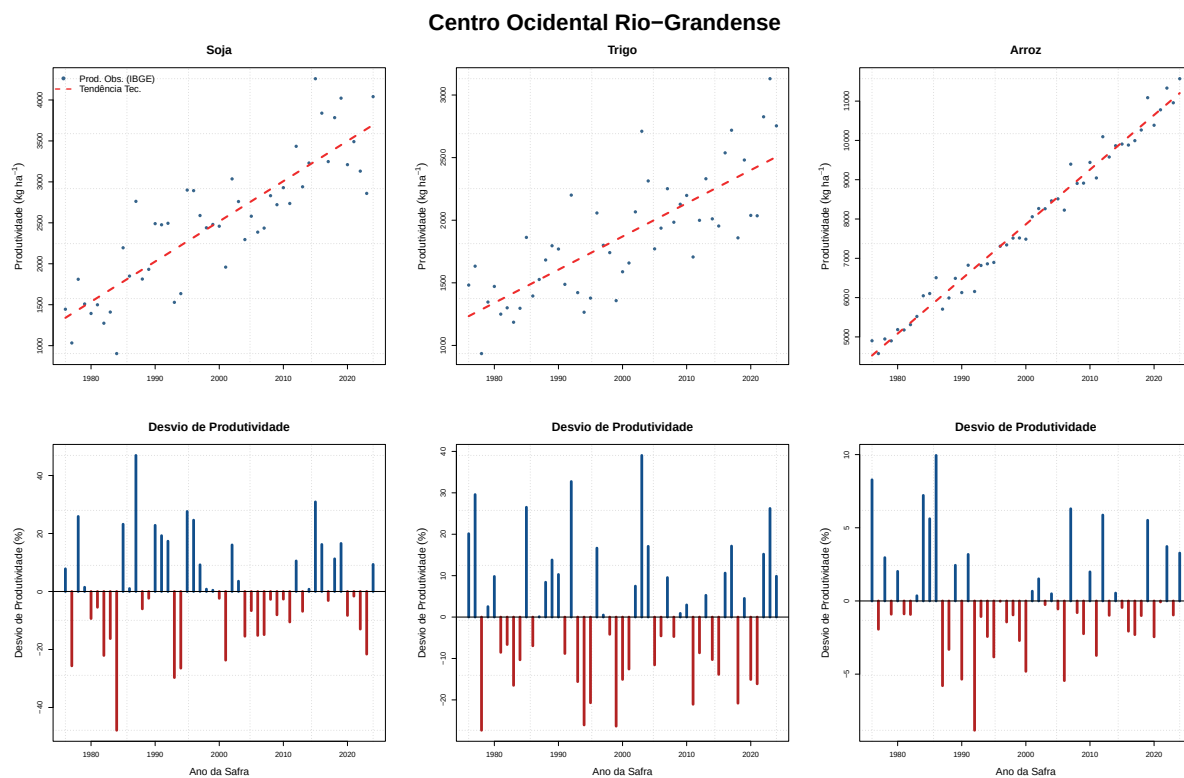
Fonte: Autor (2026).

Figura 64 – Mesmo que Fig. 6, porém para a mesorregião Centro Oriental do RS.



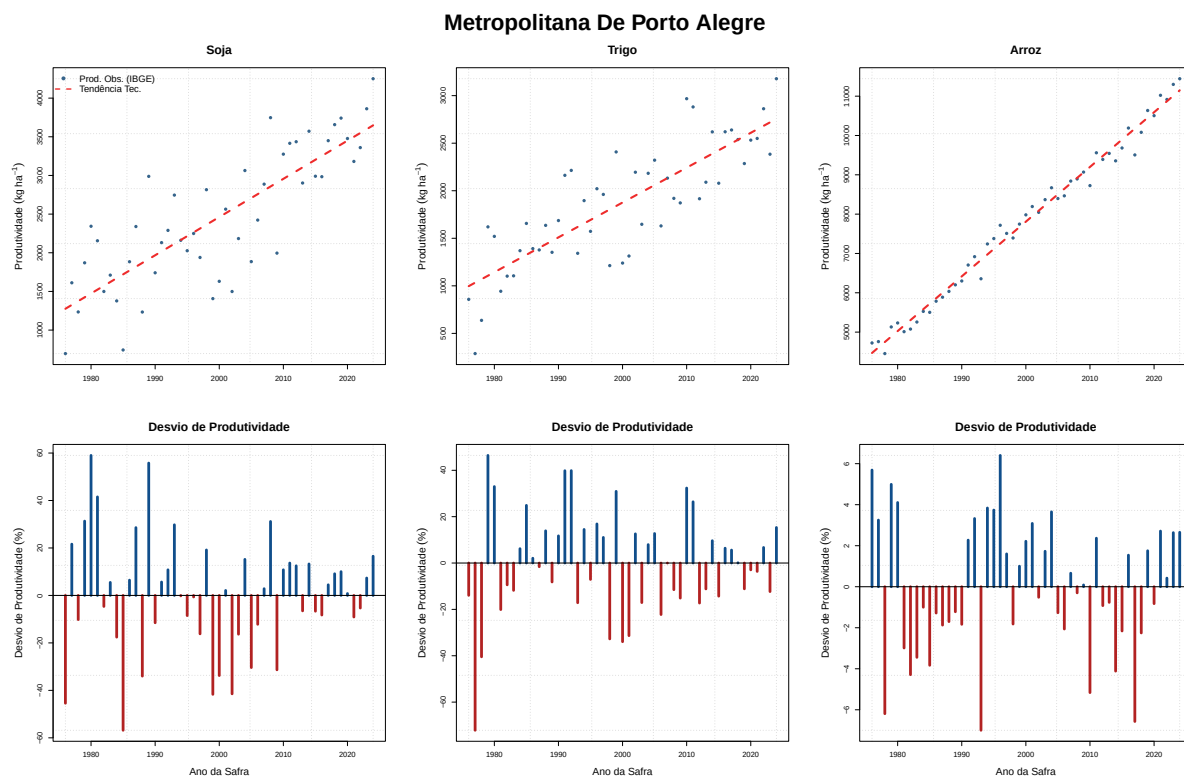
Fonte: Autor (2026).

Figura 65 – Mesmo que Fig. 6, porém para a mesorregião Centro Ocidental do RS.



Fonte: Autor (2026).

Figura 66 – Mesmo que Fig. 6, porém para a mesorregião Metropolitana de Porto Alegre.

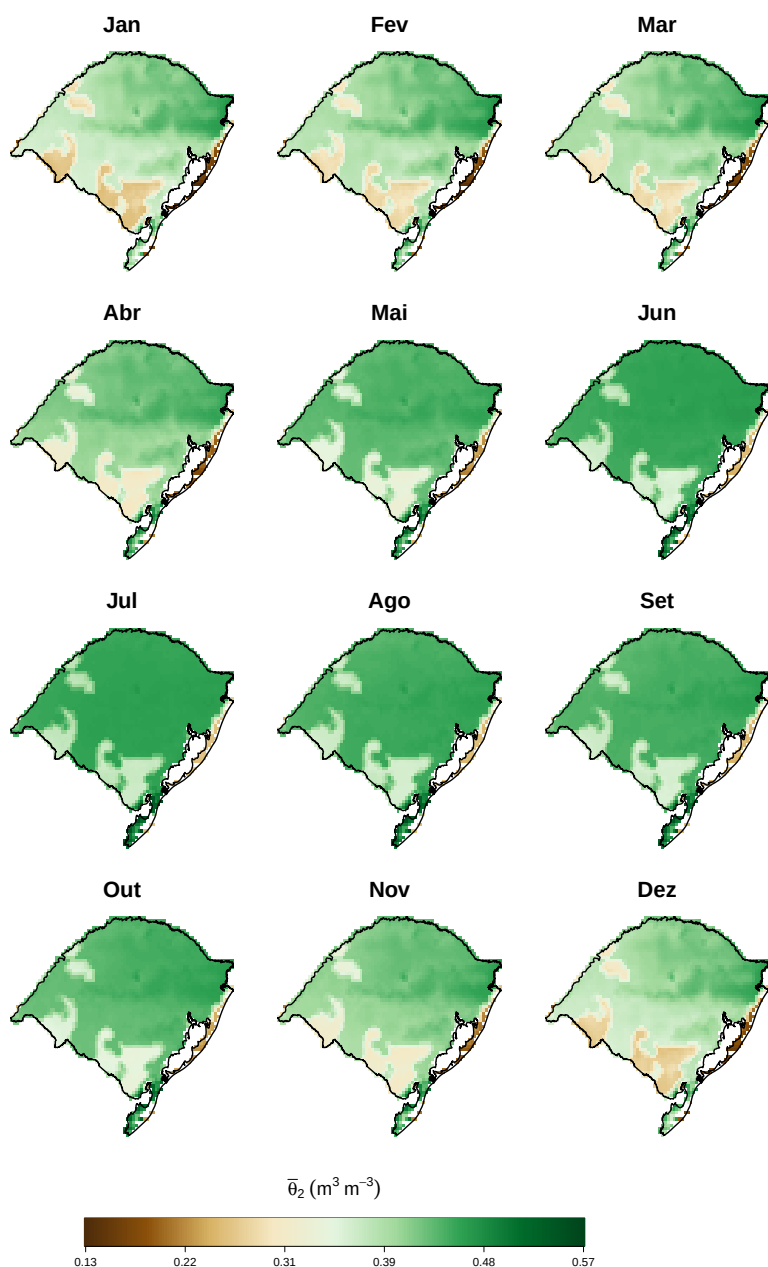


Fonte: Autor (2026).

Apêndice C – Climatologia de Umidade do Solo (L2, L3 e L4)

Figura 67 – Climatologia da umidade do solo mensal média na camada L2 (7–28 cm) no RS para o período de 1970 a 2024.

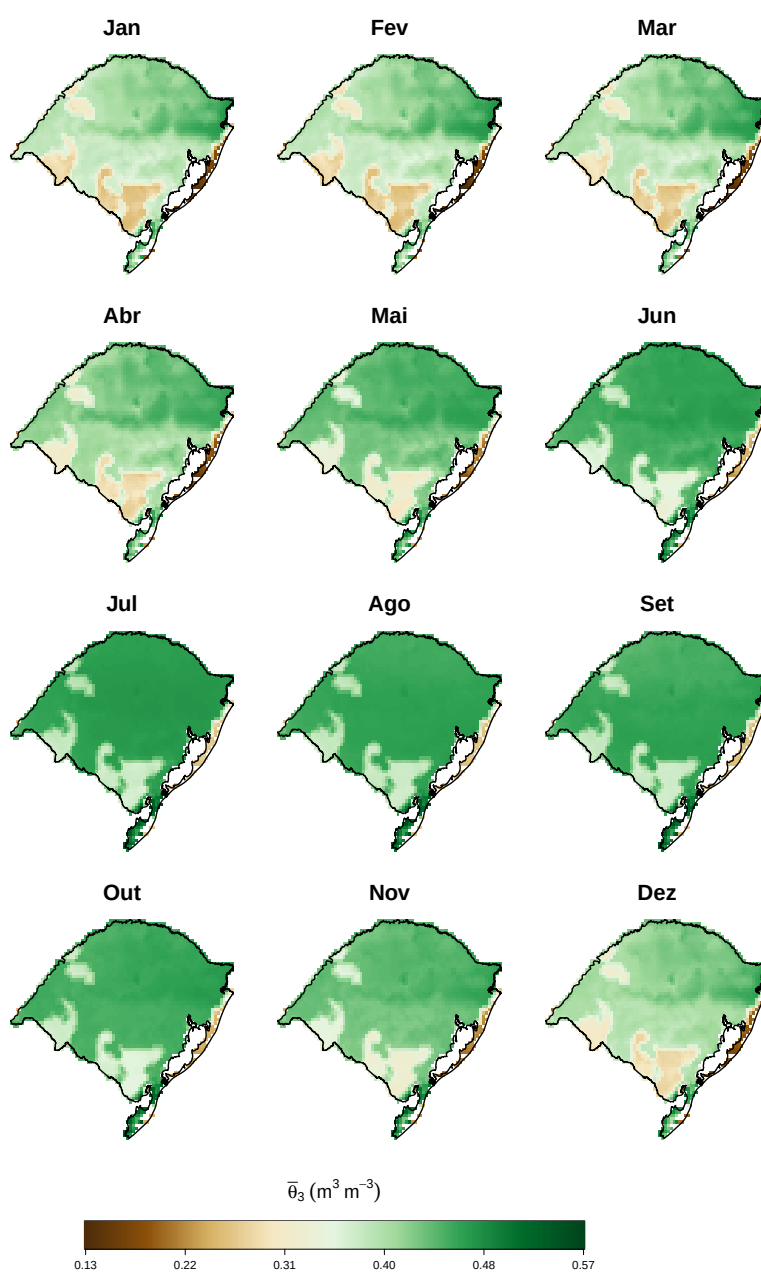
Umidade Solo Média Camada 2 (1970 – 2024)



Fonte: Autor (2025).

Figura 68 – Climatologia da umidade do solo mensal média na camada L3 (28–100 cm) no RS para o período de 1970 a 2024.

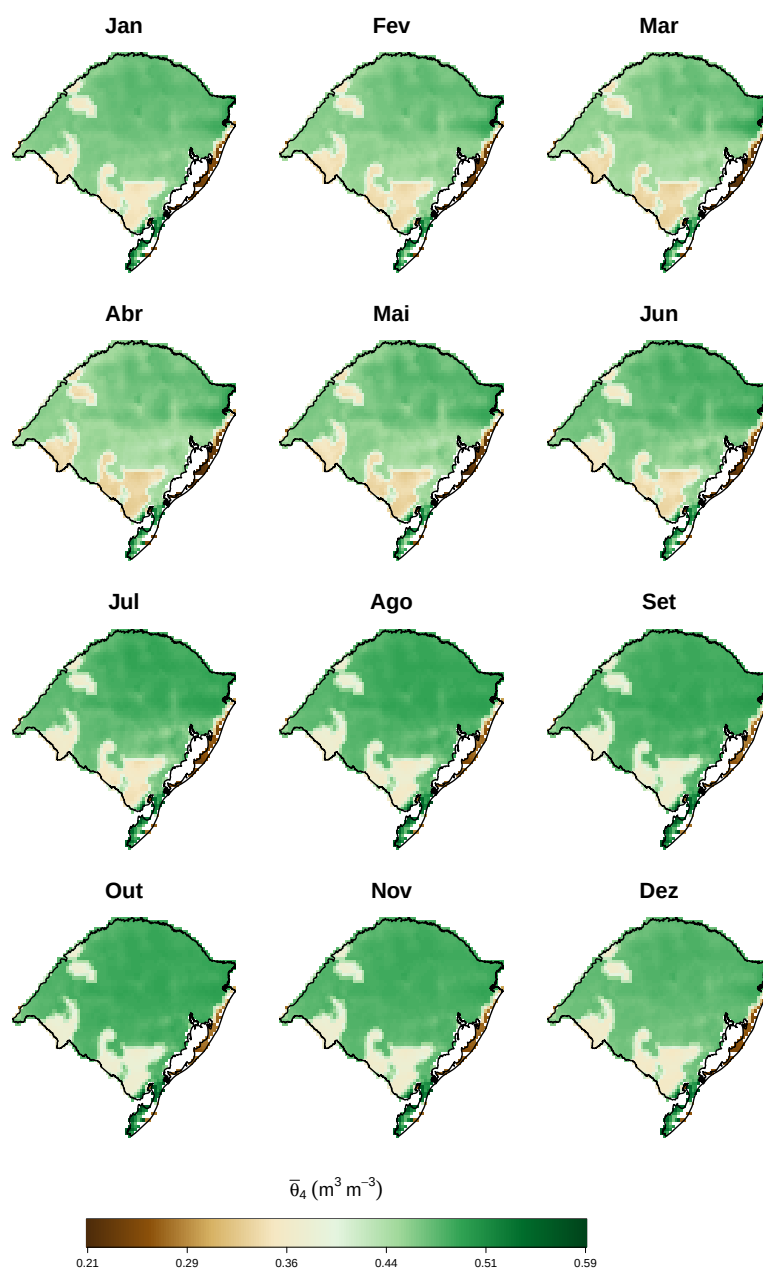
Umidade Solo Média Camada 3 (1970 – 2024)



Fonte: Autor (2025).

Figura 69 – Climatologia da umidade do solo mensal média na camada L4 (100–289 cm) no RS para o período de 1970 a 2024.

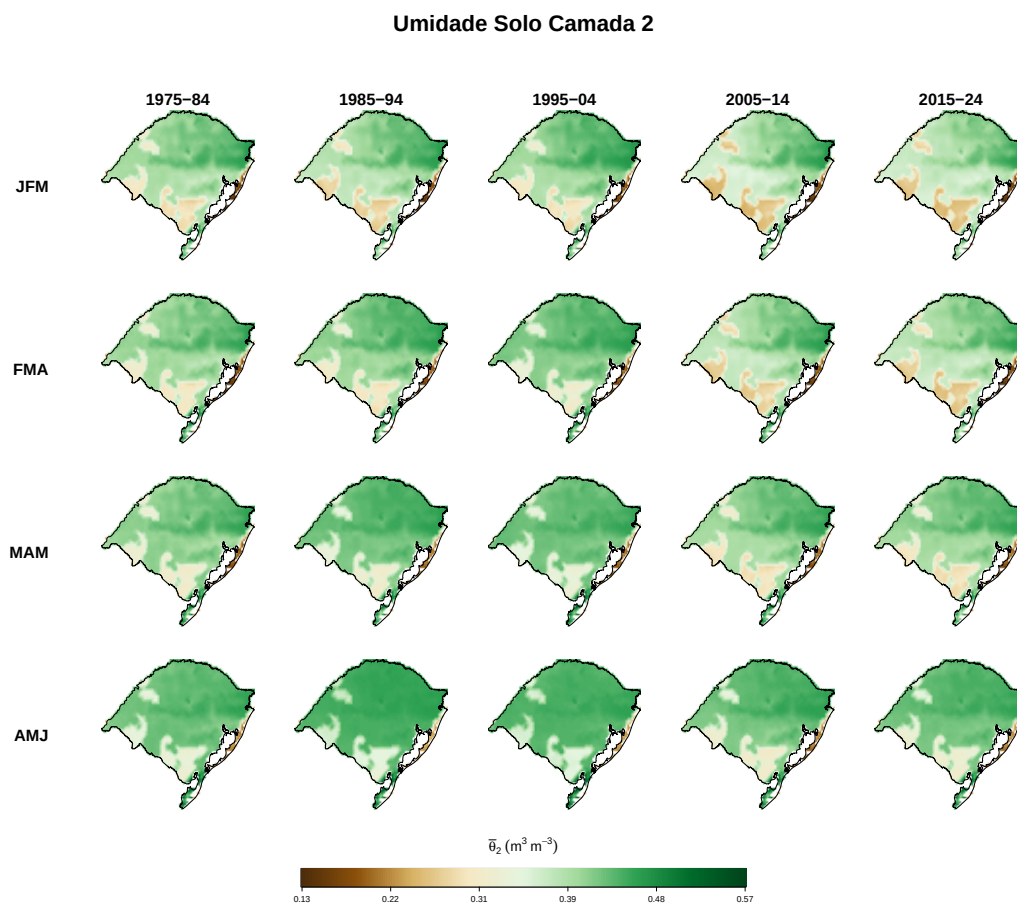
Umidade Solo Média Camada 4 (1970 – 2024)



Fonte: Autor (2025).

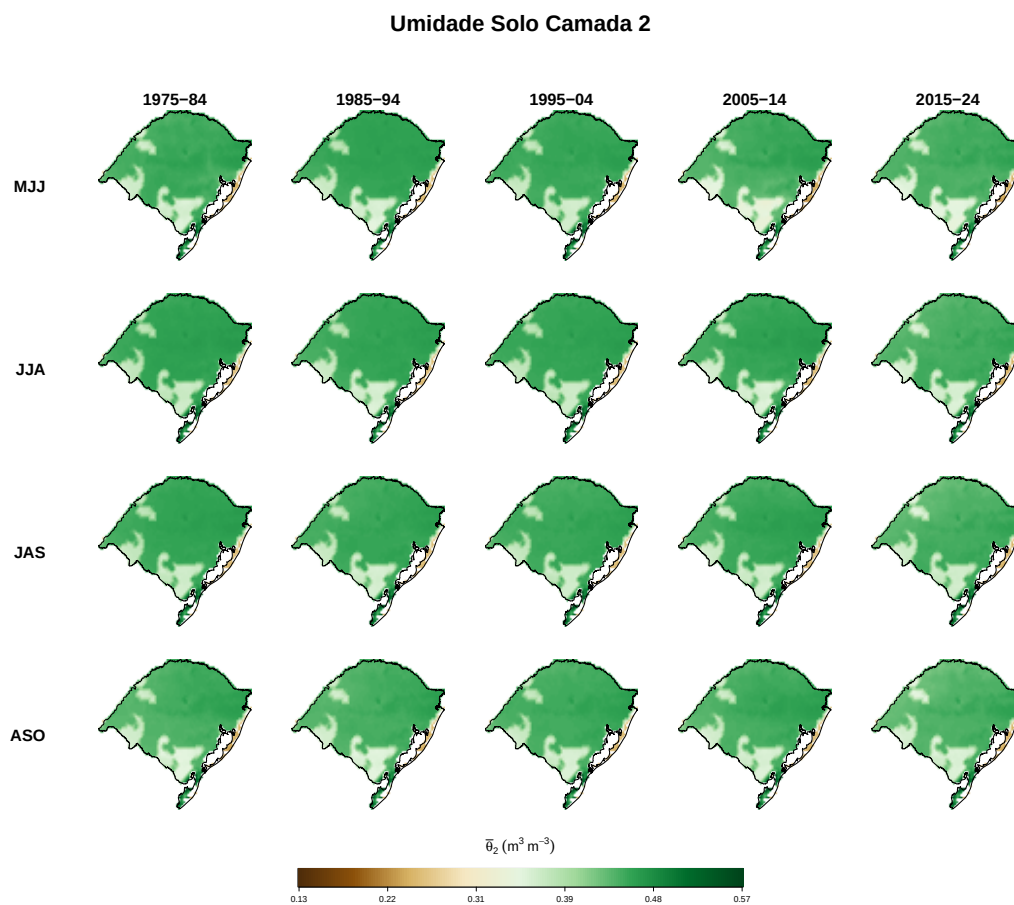
C.1 Umidade Volumétrica do Solo - Camada L2

Figura 70 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L2 no RS por década, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.



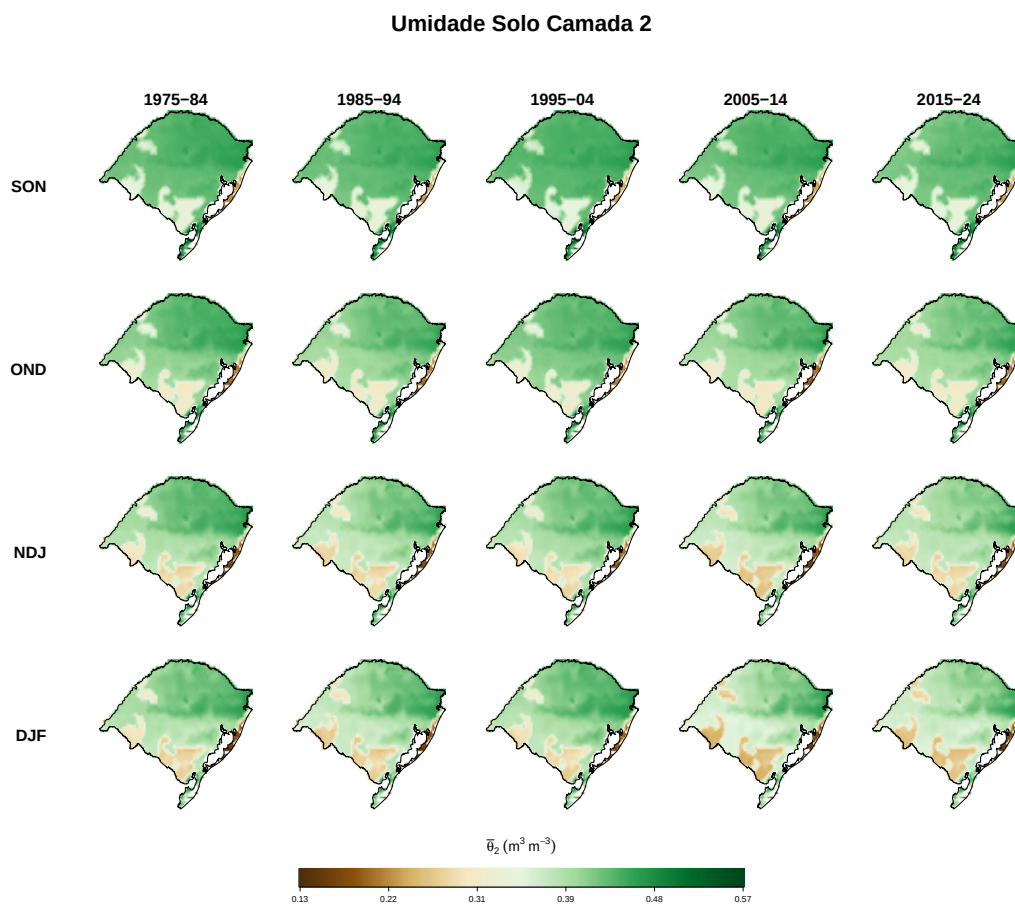
Fonte: Autor (2025).

Figura 71 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L2 no RS por década, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.



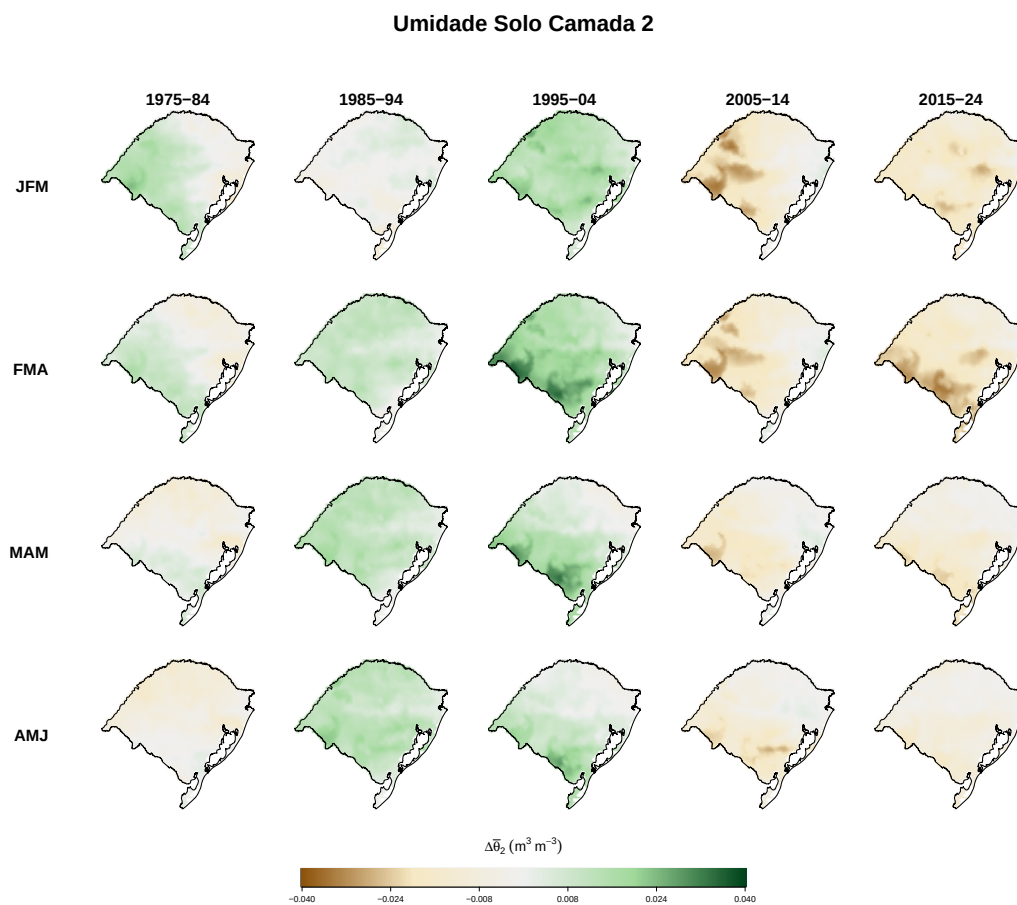
Fonte: Autor (2025).

Figura 72 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L2 no RS por década, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.



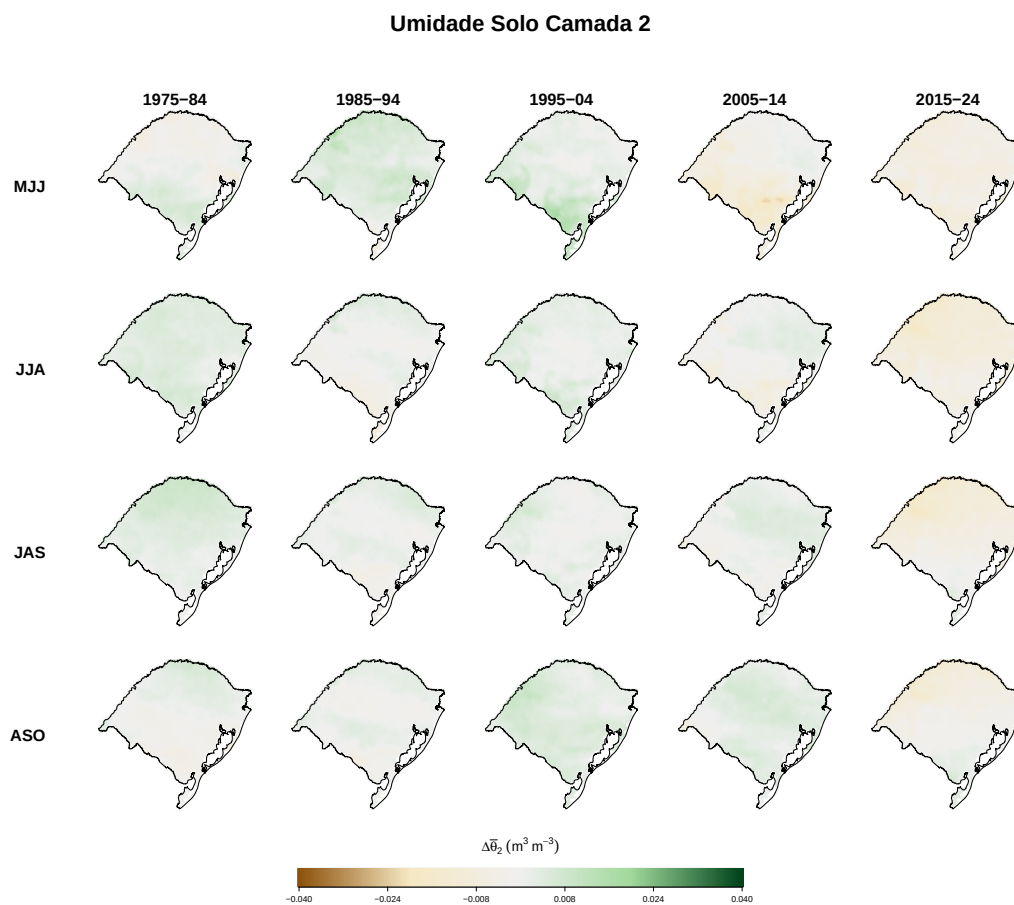
Fonte: Autor (2025).

Figura 73 – Diferença da umidade do solo na camada L2 no RS com relação à média por década, dos trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.



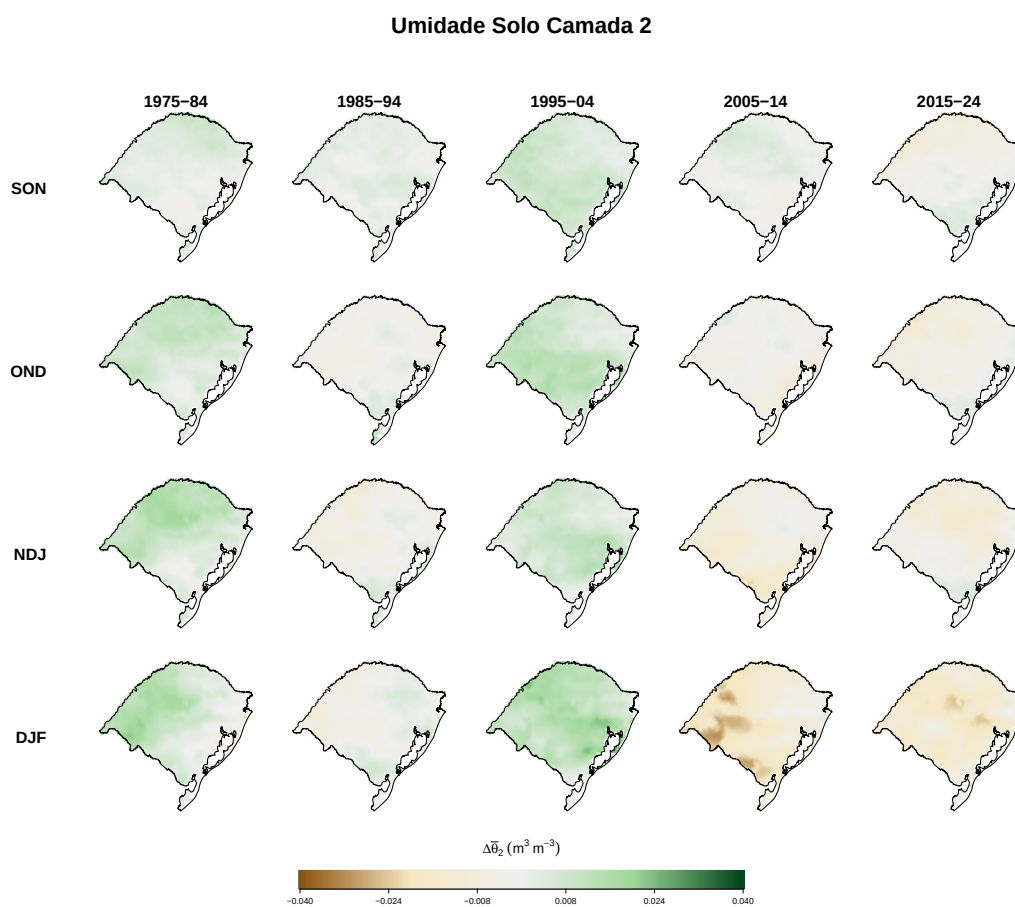
Fonte: Autor (2025).

Figura 74 – Diferença da umidade do solo na camada L2 no RS com relação à média por década, dos trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.



Fonte: Autor (2025).

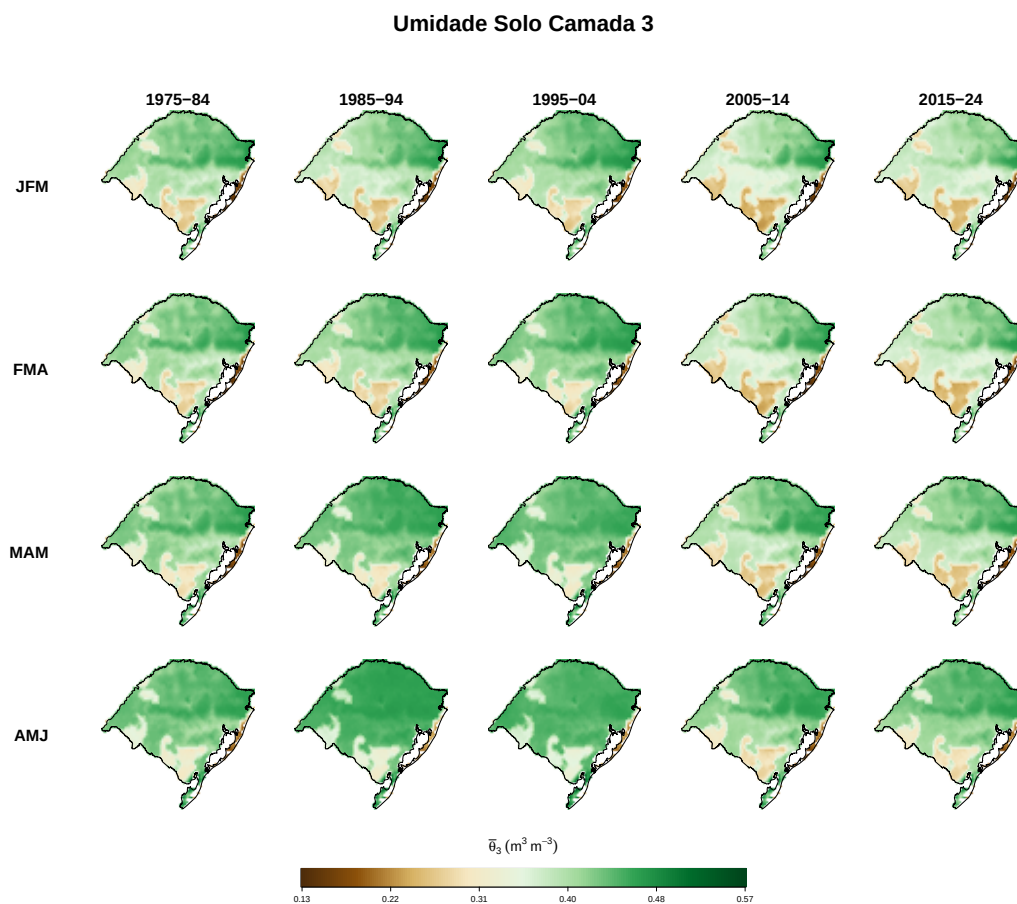
Figura 75 – Diferença da umidade do solo na camada L2 no RS com relação à média por década, dos trimestres SON, OND, NDJ e DJF.



Fonte: Autor (2025).

C.2 Umidade Volumétrica do Solo - Camada L3

Figura 76 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L3 no RS por década, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.



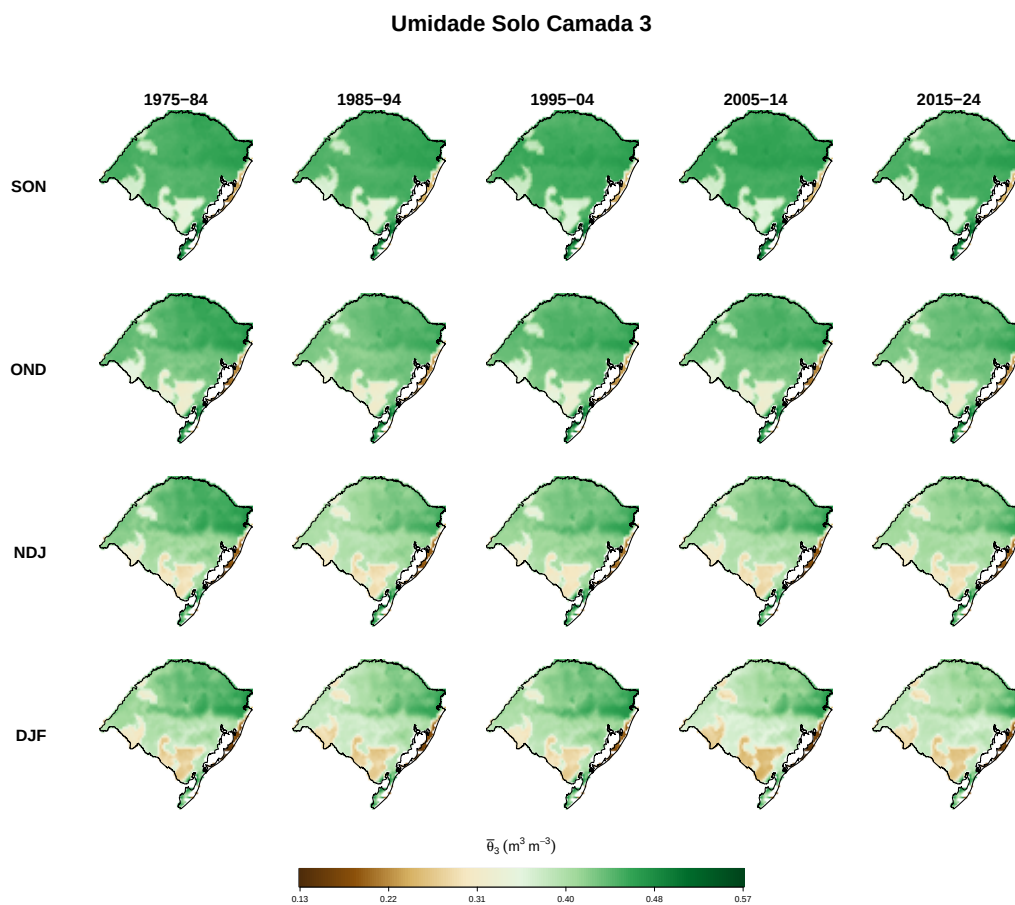
Fonte: Autor (2025).

Figura 77 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L3 no RS por década, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.



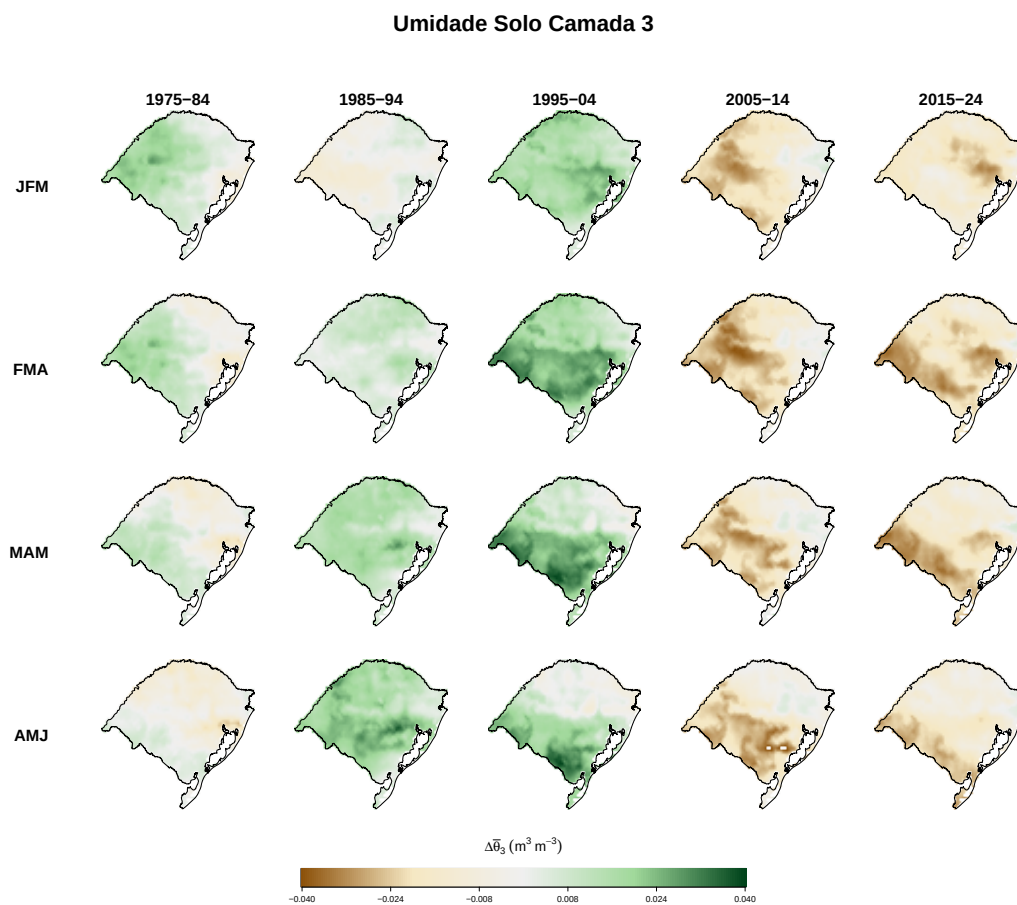
Fonte: Autor (2025).

Figura 78 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L3 no RS por década, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.



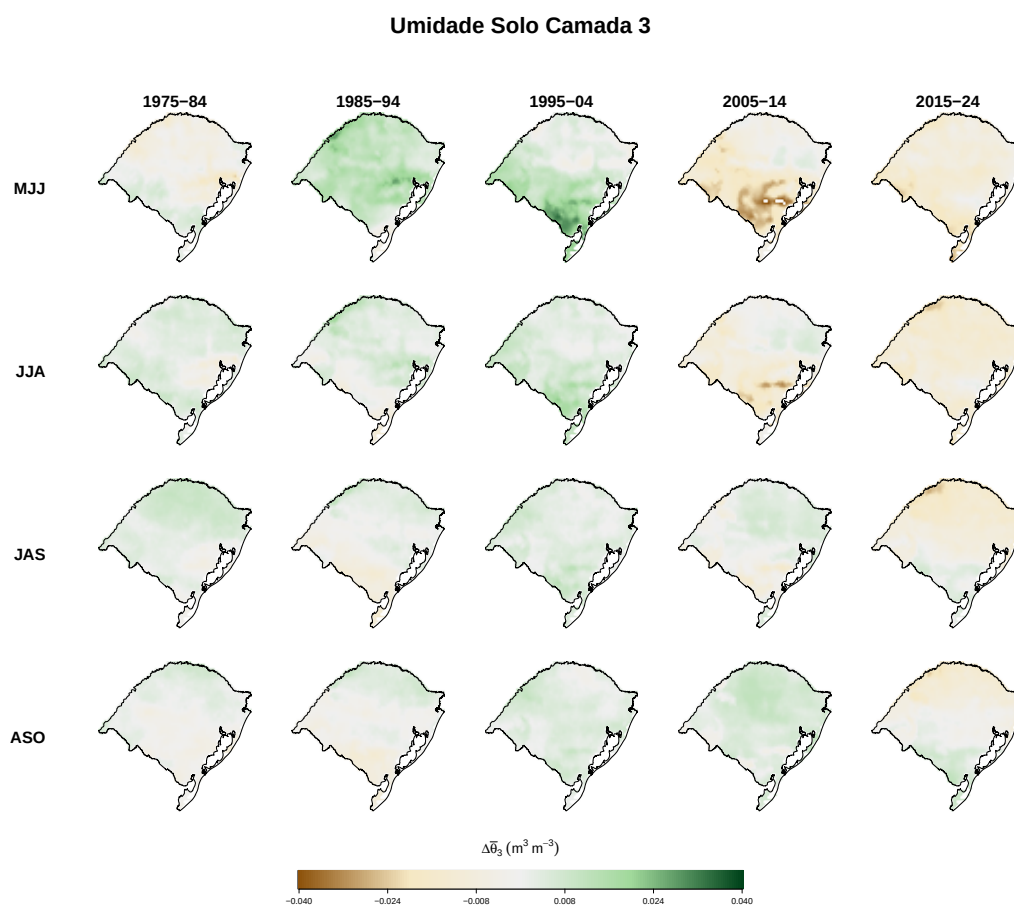
Fonte: Autor (2025).

Figura 79 – Diferença da umidade do solo na camada L3 no RS com relação à média por década, dos JFM, FMA, MAM e AMJ.



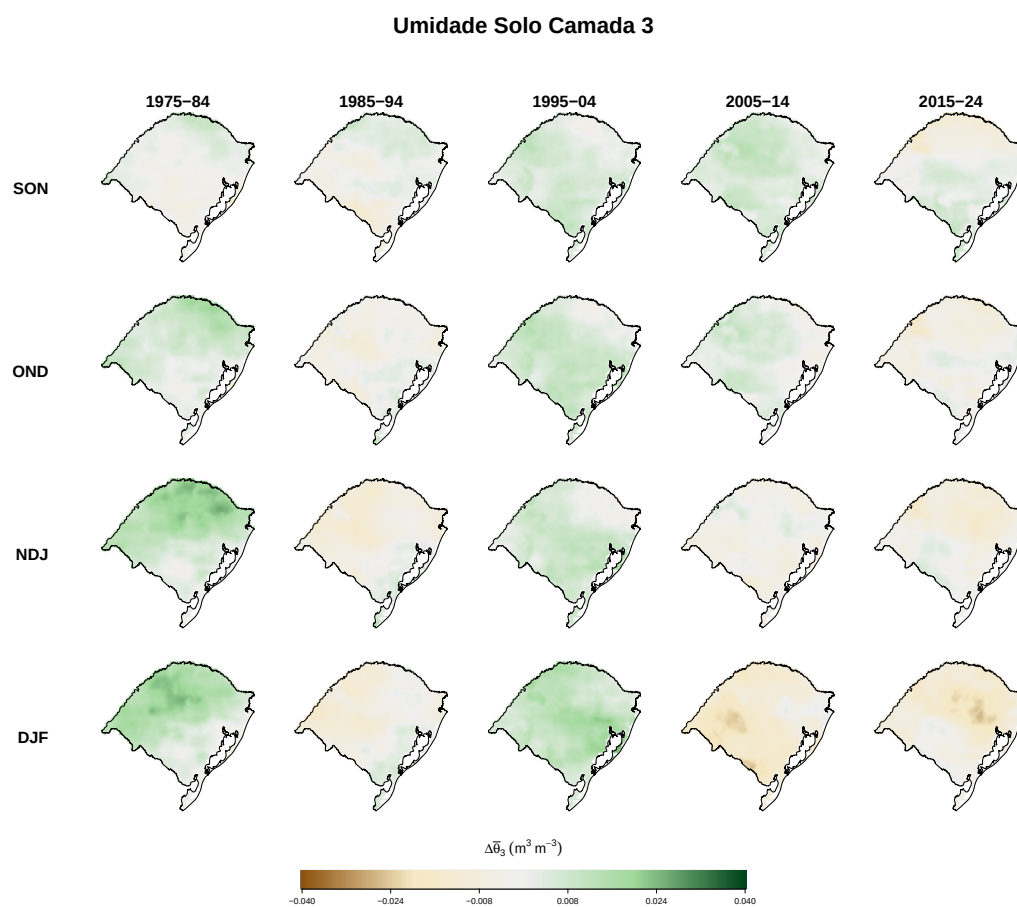
Fonte: Autor (2025).

Figura 80 – Diferença da umidade do solo na camada L3 no RS com relação à média por década, dos MJJ, JJA, JAS e ASO.



Fonte: Autor (2025).

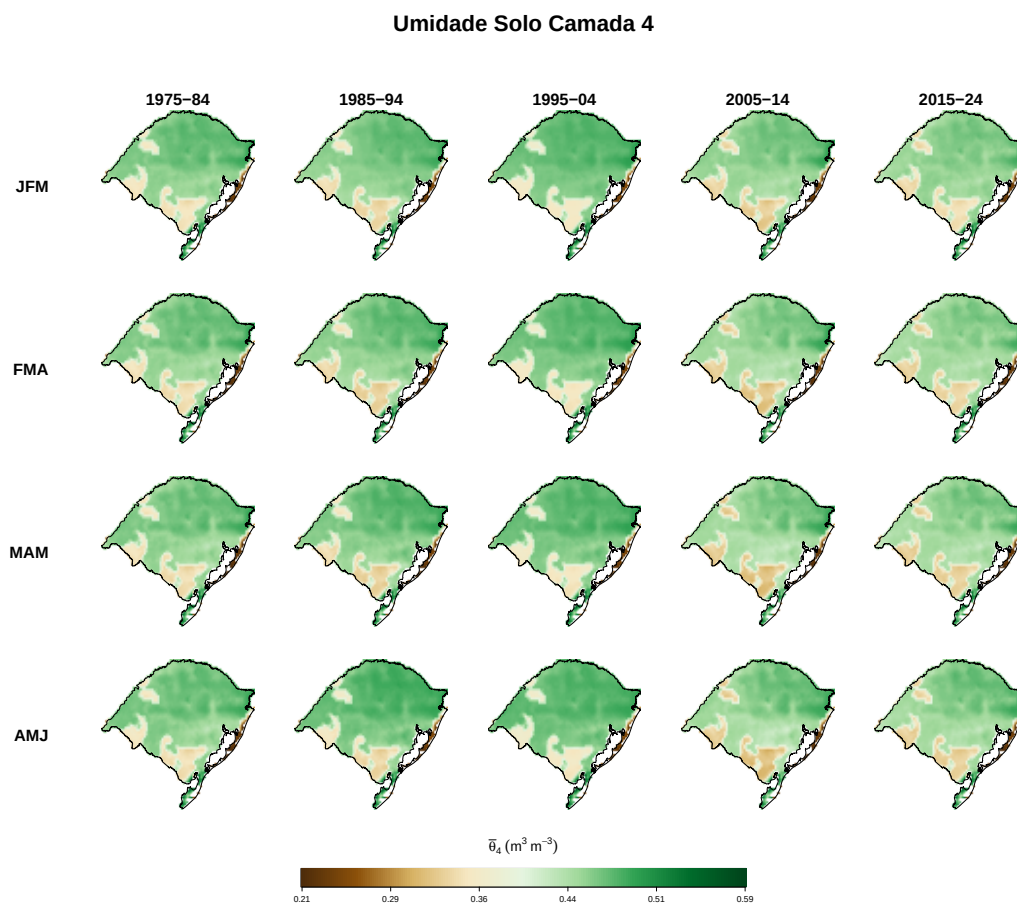
Figura 81 – Diferença da umidade do solo na camada L3 no RS com relação à média por década, dos SON, OND, NDJ e DJF.



Fonte: Autor (2025).

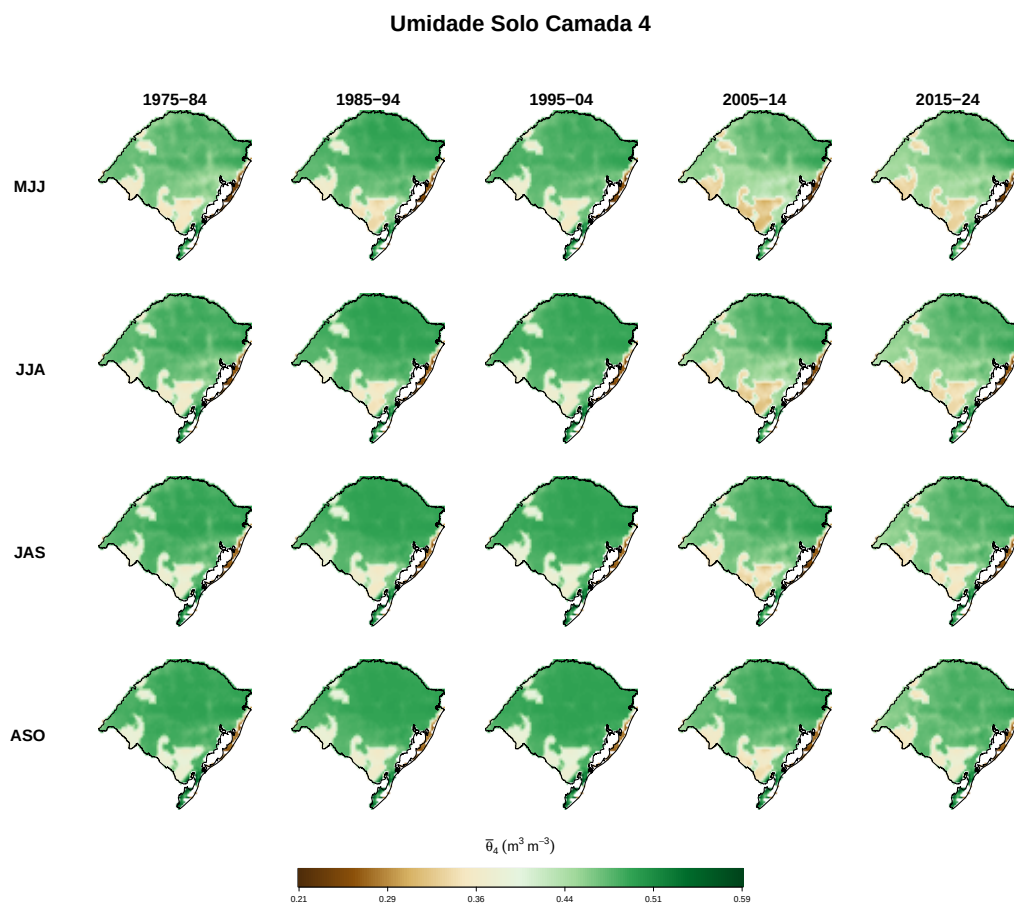
C.3 Umidade Volumétrica do Solo - Camada L4

Figura 82 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L4 no RS por década, abrangendo os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.



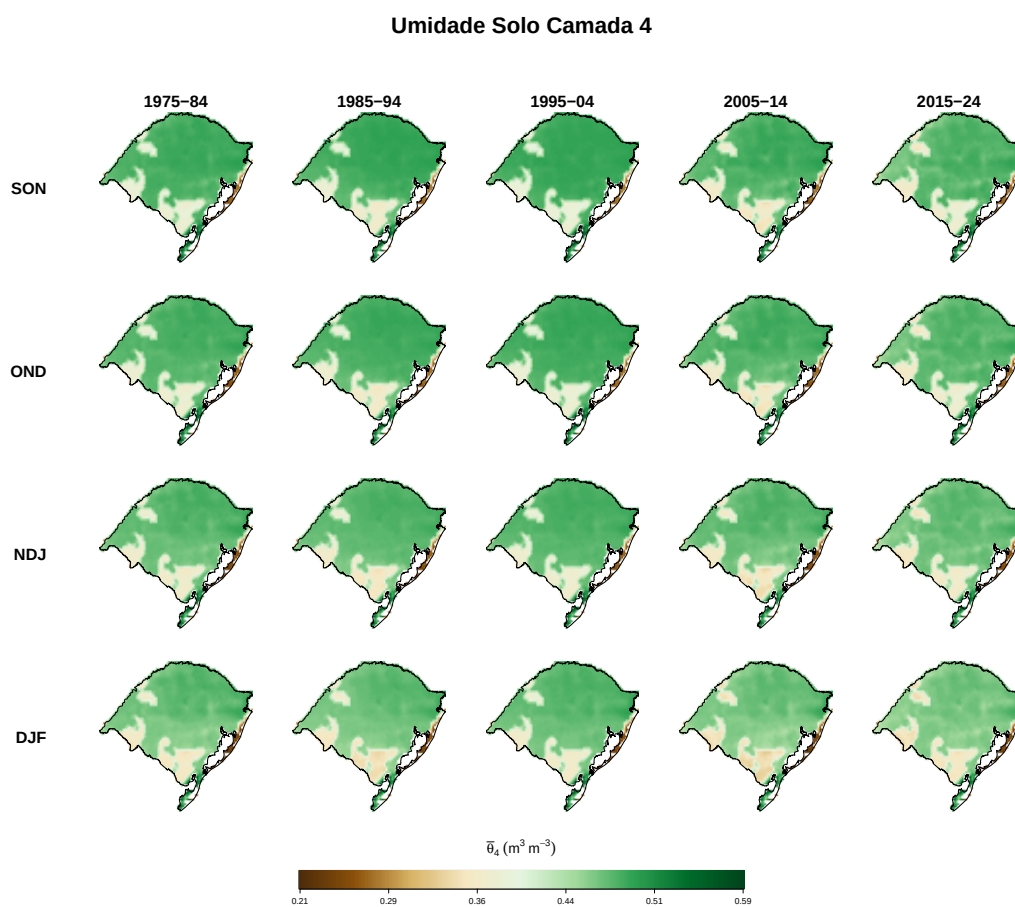
Fonte: Autor (2025).

Figura 83 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L4 no RS por década, abrangendo os trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.



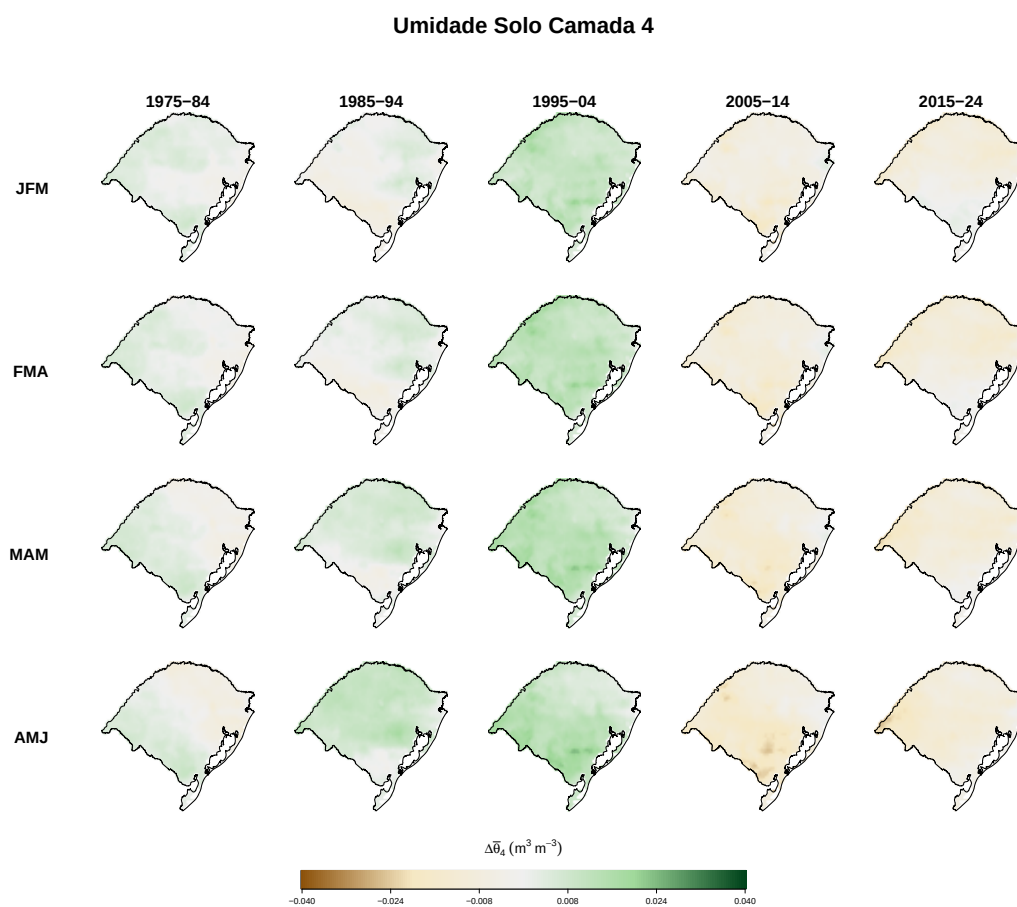
Fonte: Autor (2025).

Figura 84 – Médias trimestrais da umidade do solo na camada L4 no RS por década, abrangendo os trimestres SON, OND, NDJ e DJF.



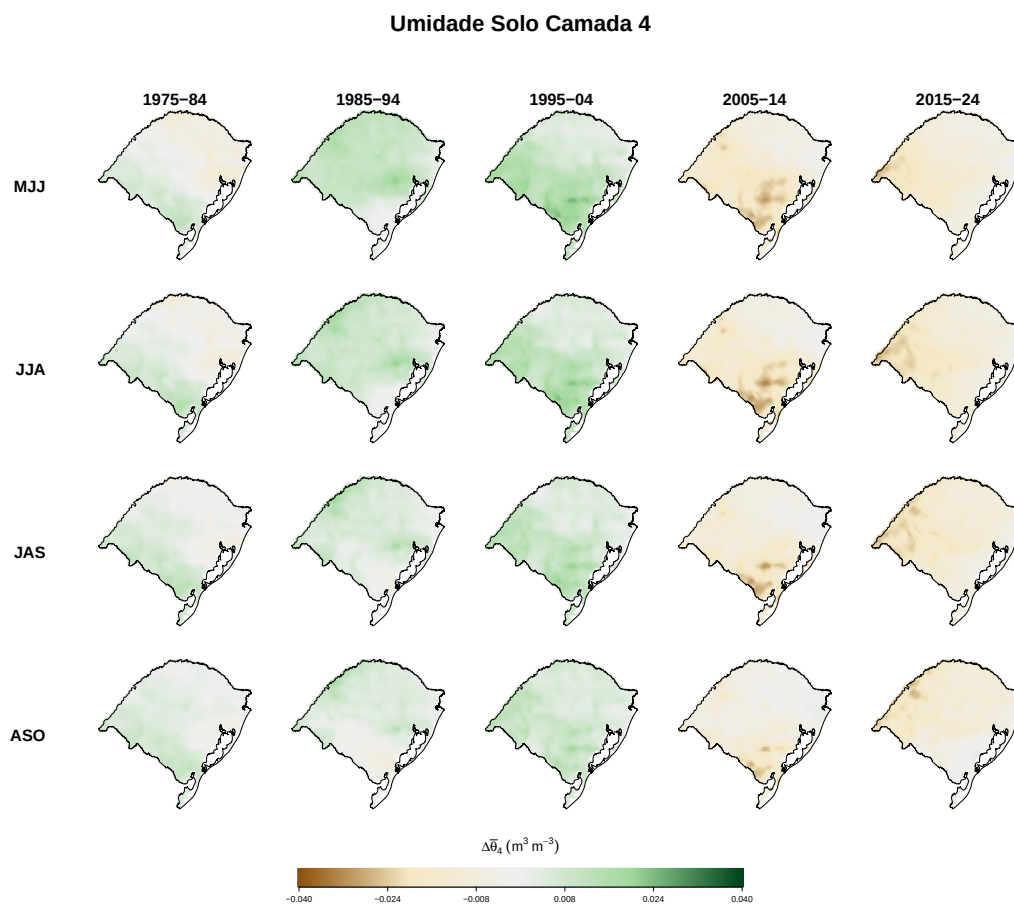
Fonte: Autor (2025).

Figura 85 – Diferença da umidade do solo na camada L4 no RS com relação à média por década, dos trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ.



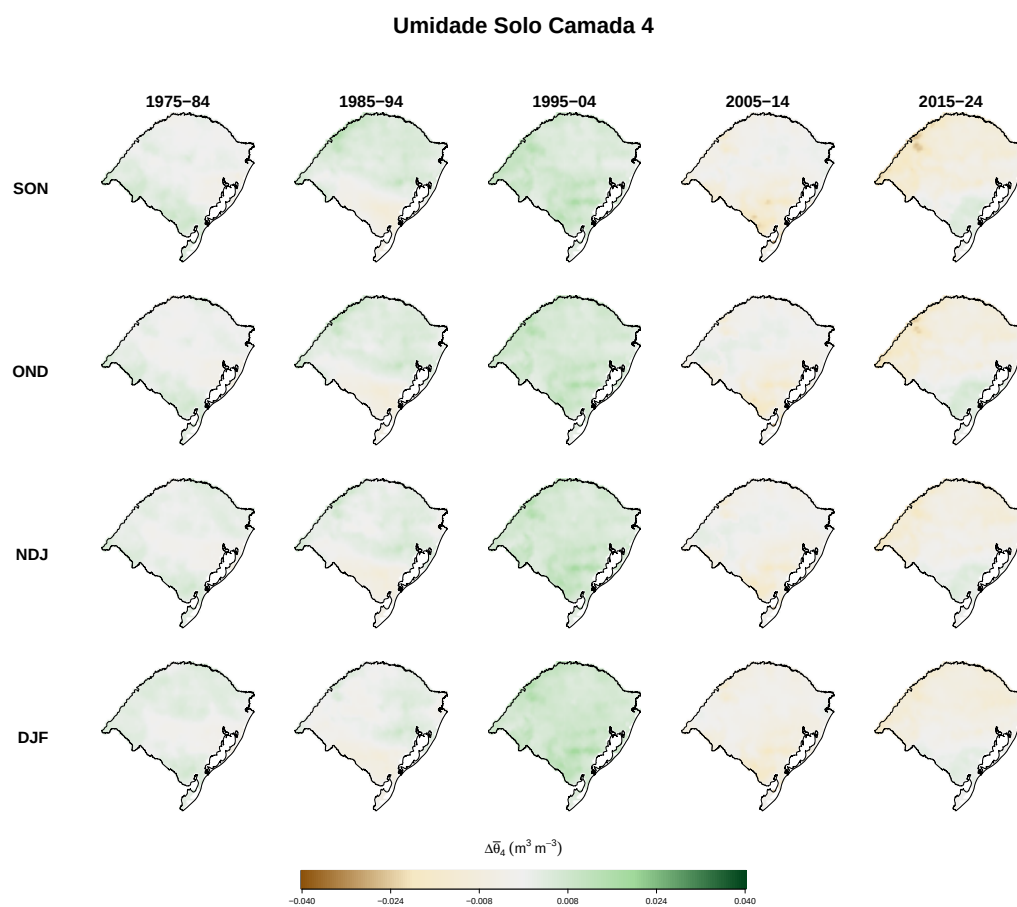
Fonte: Autor (2025).

Figura 86 – Diferença da umidade do solo na camada L4 no RS com relação à média por década, dos trimestres MJJ, JJA, JAS e ASO.



Fonte: Autor (2025).

Figura 87 – Diferença da umidade do solo na camada L4 no RS com relação à média por década, dos trimestres SON, OND, NDJ e DJF.

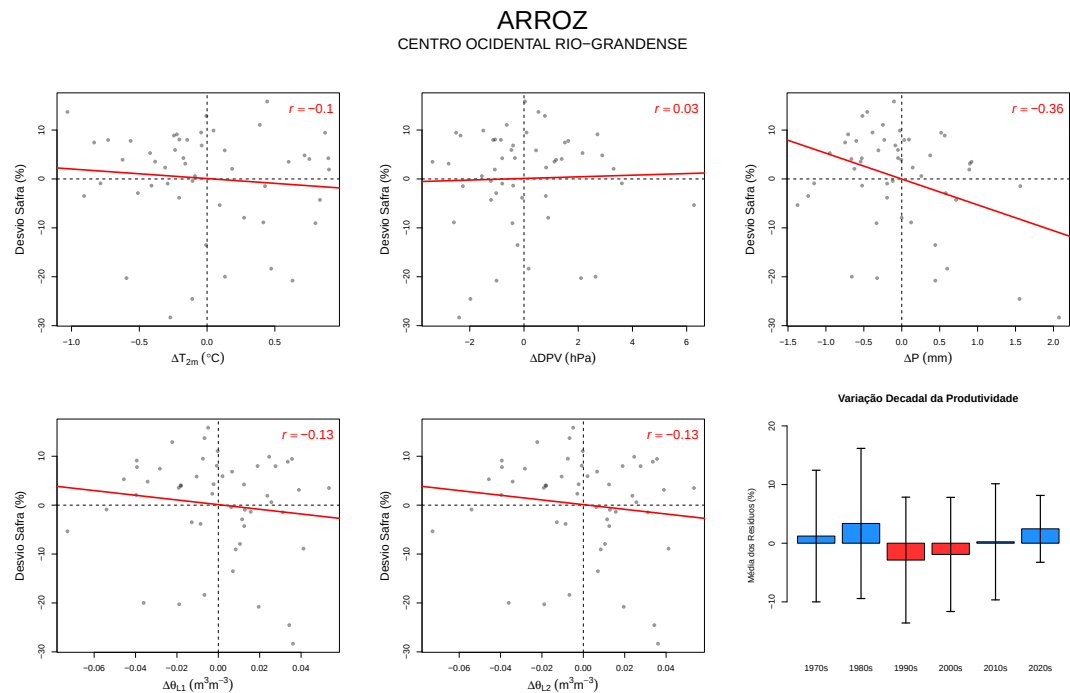


Fonte: Autor (2025).

Apêndice D – Desvio da produtividade das culturas de Arroz, Soja e Trigo no RS

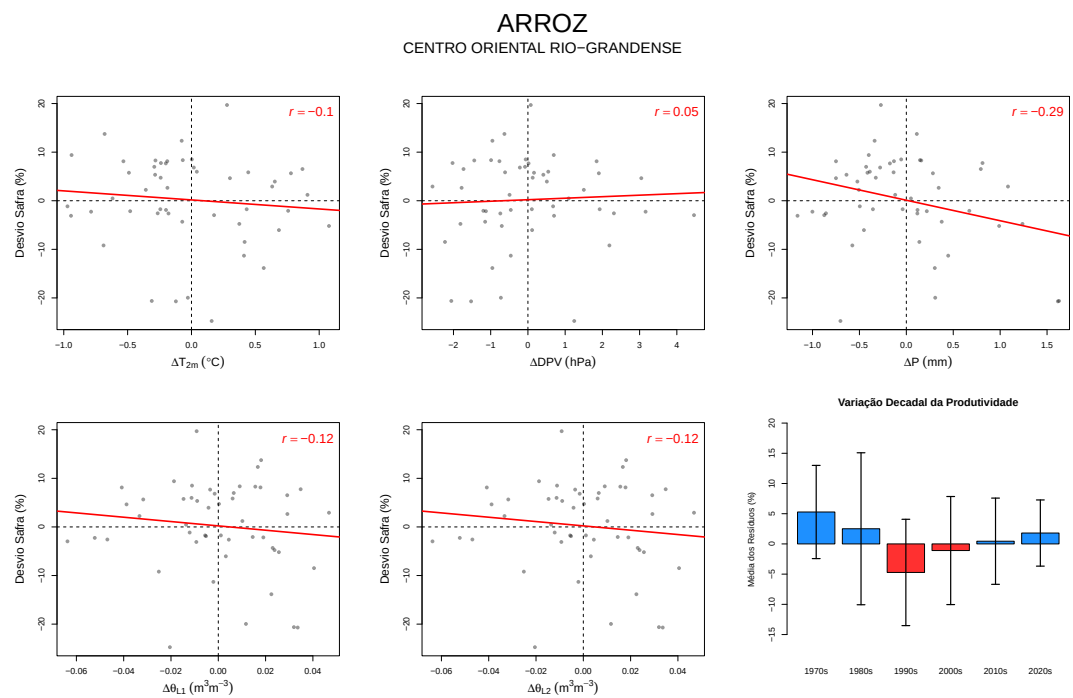
D.1 Relação entre variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo com o desvio da produtividade do Arroz por mesorregiões do RS

Figura 88 – Relação entre o desvio da produtividade do arroz na região Centro-Occidental do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



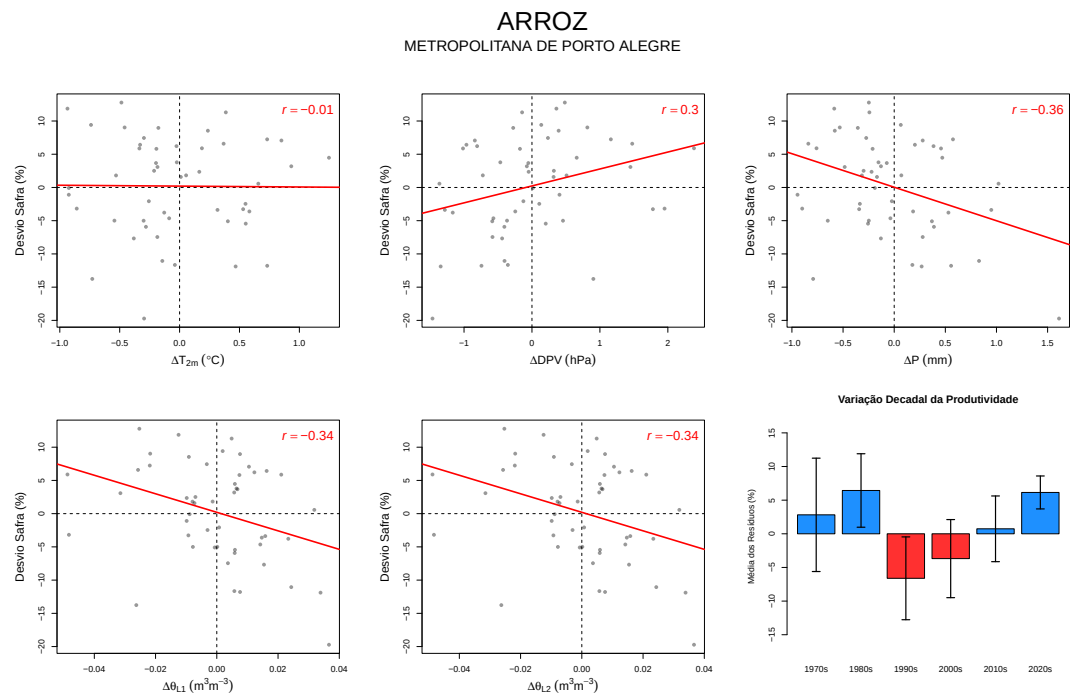
Fonte: Autor (2025).

Figura 89 – Relação entre o desvio da produtividade do arroz na região Centro-Oriental do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



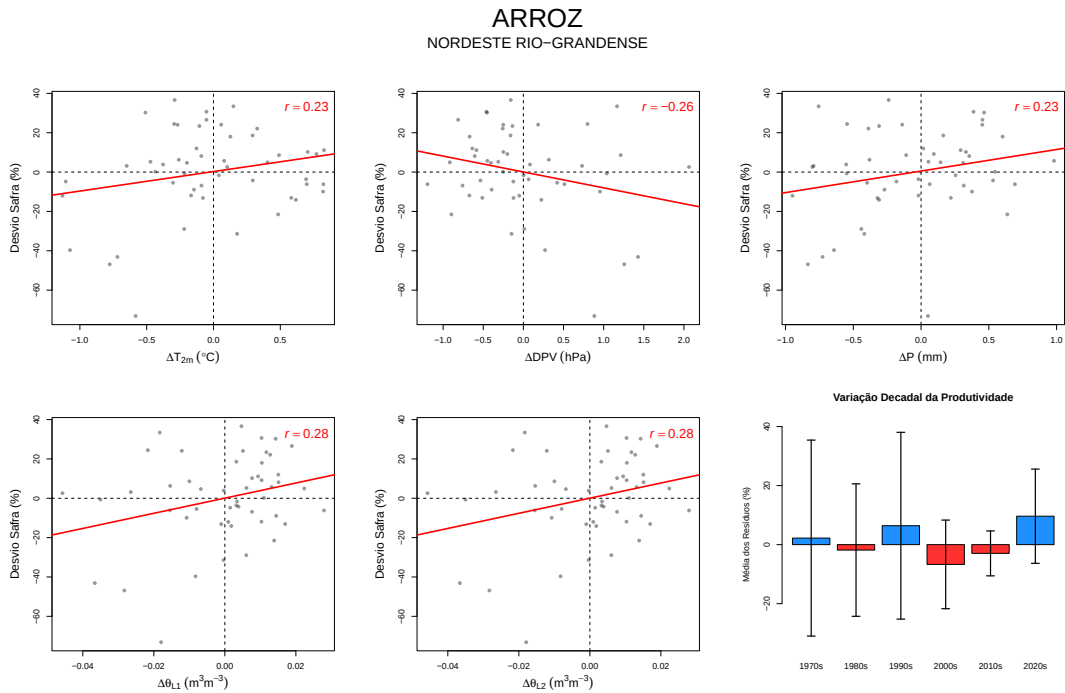
Fonte: Autor (2025).

Figura 90 – Relação entre o desvio da produtividade do arroz na região Metropolitana de Porto Alegre no RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



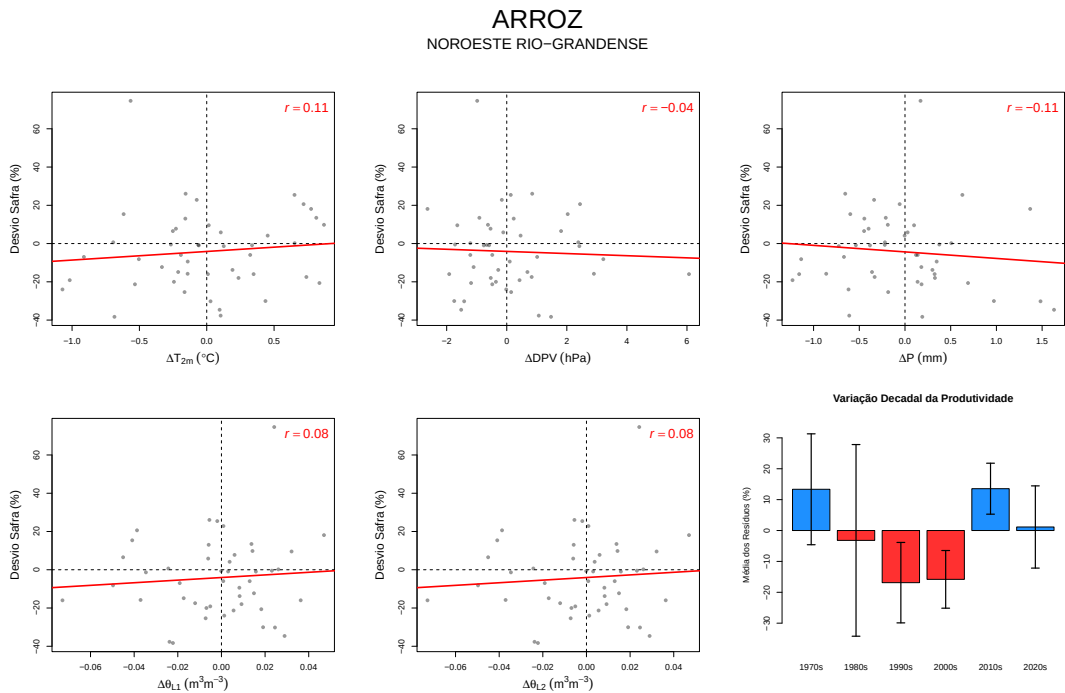
Fonte: Autor (2025).

Figura 91 – Relação entre o desvio da produtividade do arroz na região Nordeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



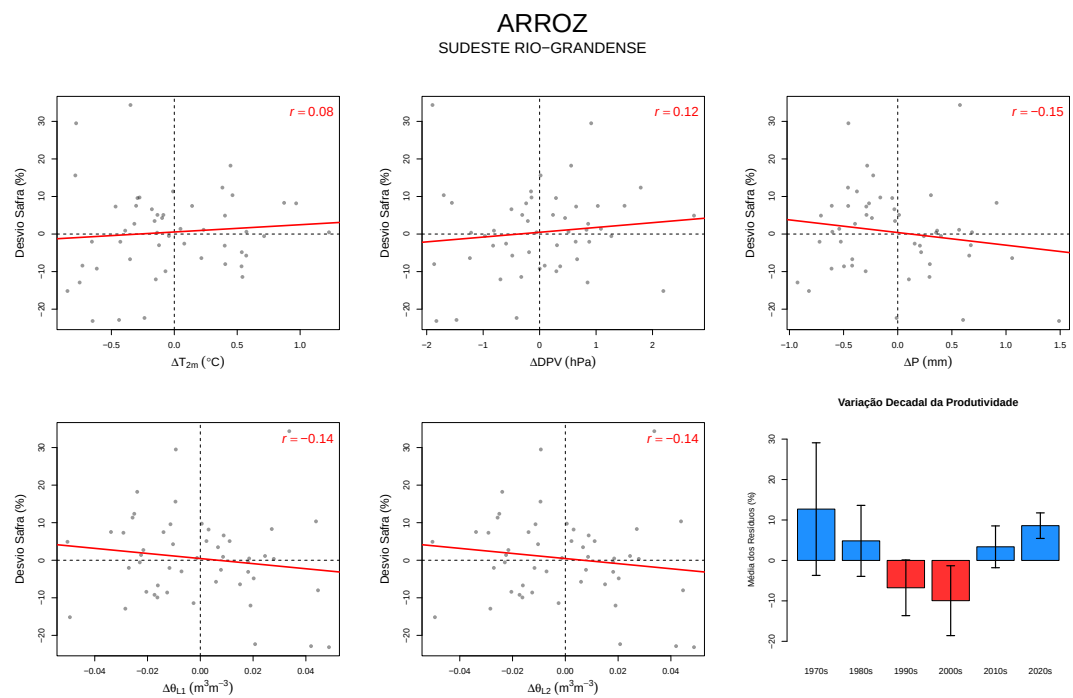
Fonte: Autor (2025).

Figura 92 – Relação entre o desvio da produtividade do arroz na região Noroeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



Fonte: Autor (2025).

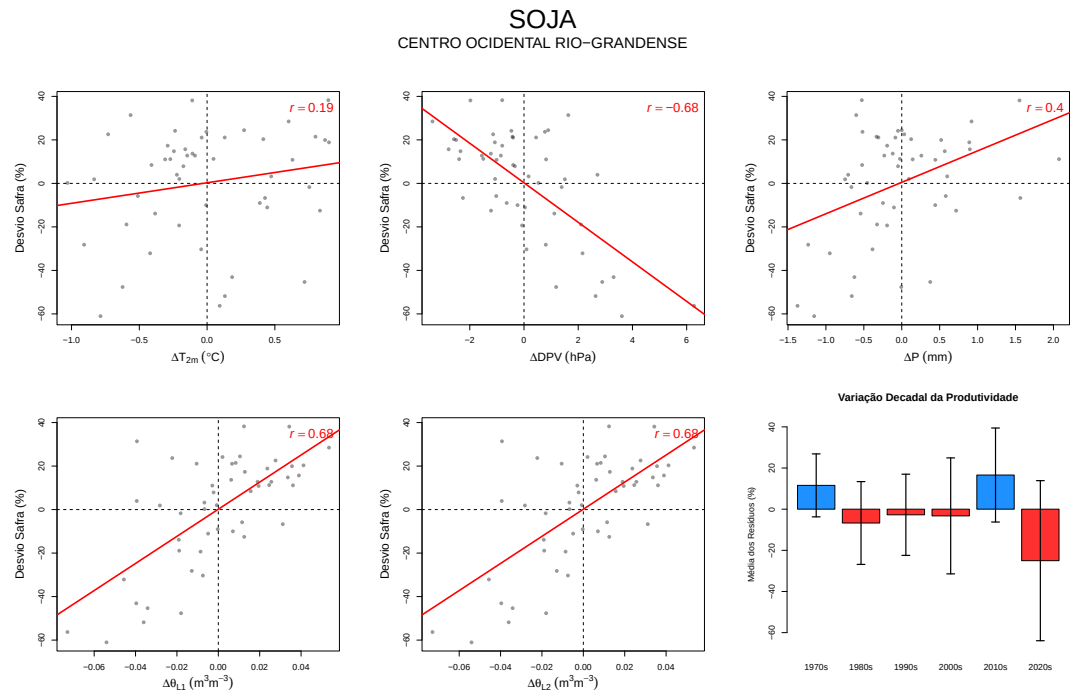
Figura 93 – Relação entre o desvio da produtividade do arroz na região Sudeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



Fonte: Autor (2025).

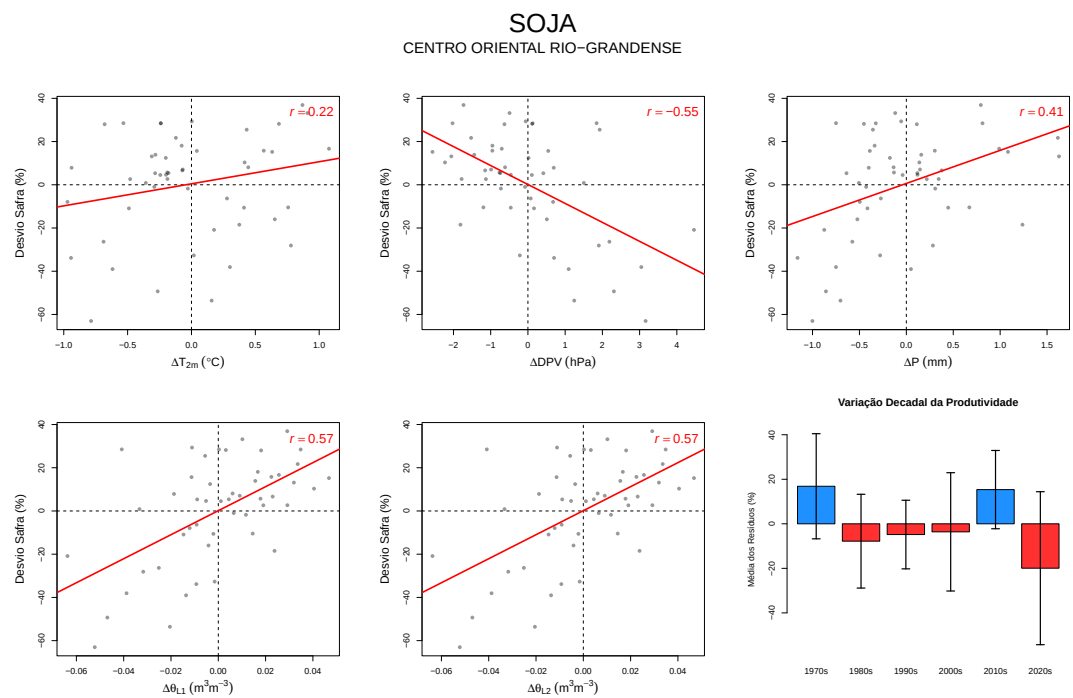
D.2 Relação entre variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo com o desvio da produtividade da Soja por mesorregiões do RS

Figura 94 – Relação entre o desvio da produtividade da soja na região Centro-Occidental do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



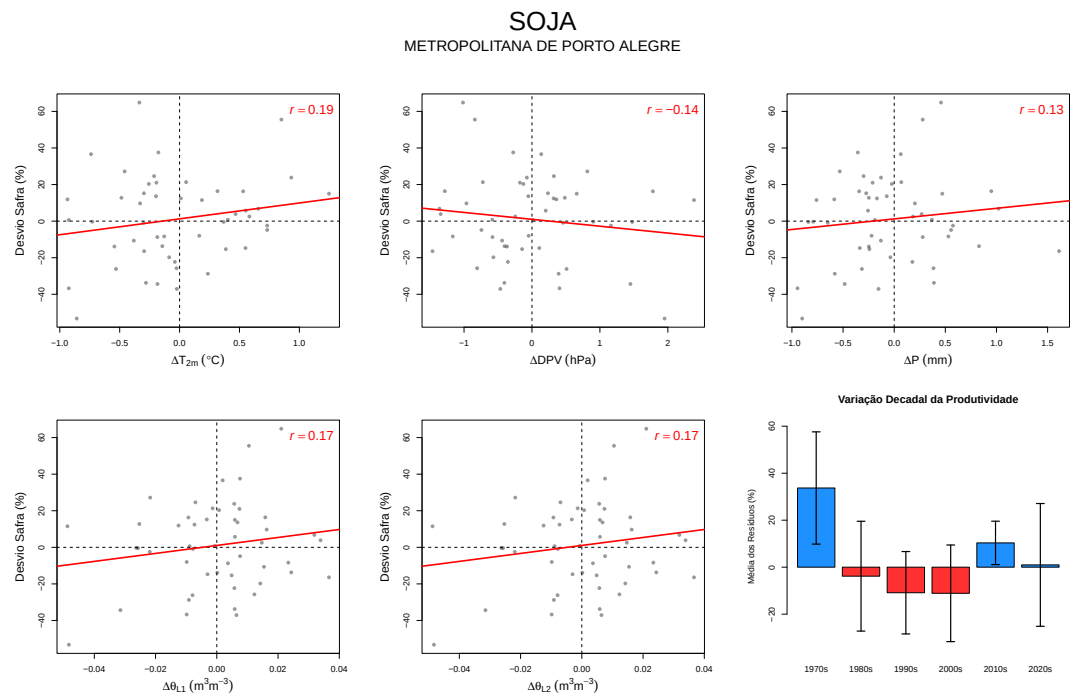
Fonte: Autor (2025).

Figura 95 – Relação entre o desvio da produtividade da soja na região Centro-Oriental do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



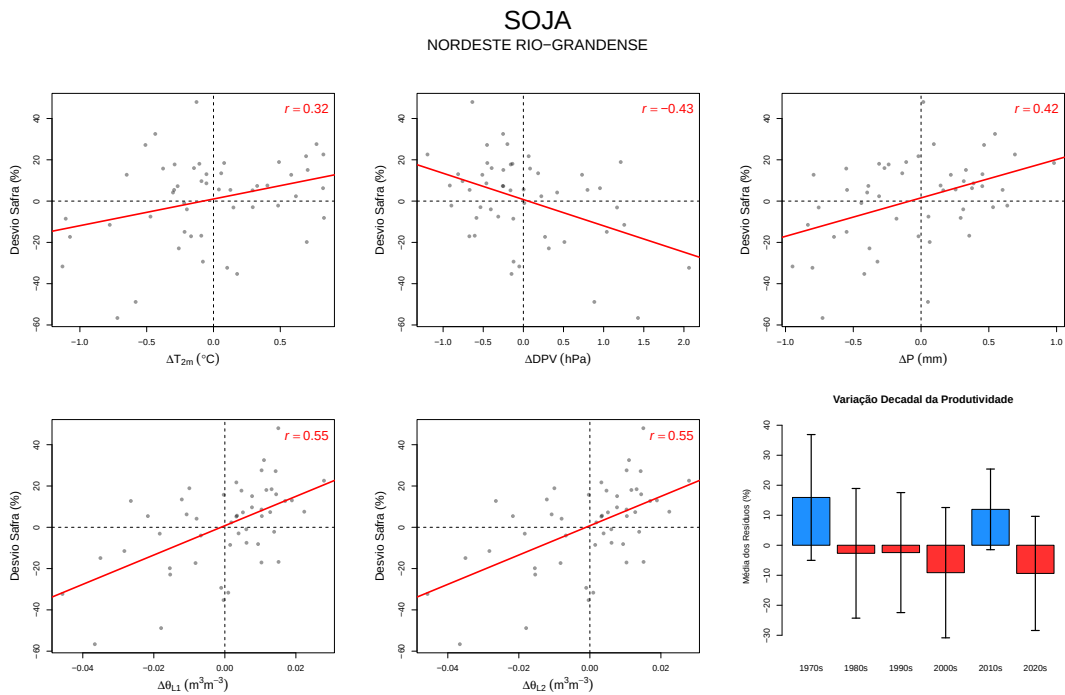
Fonte: Autor (2025).

Figura 96 – Relação entre o desvio da produtividade da soja na região Metropolitana de Porto Alegre no RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



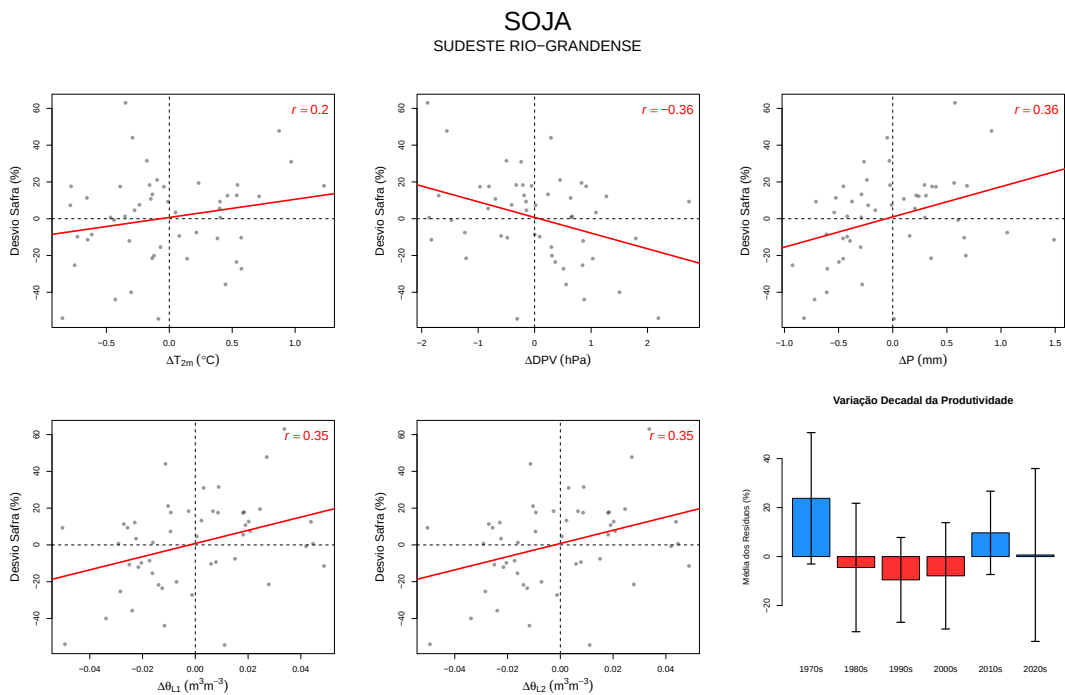
Fonte: Autor (2025).

Figura 97 – Relação entre o desvio da produtividade da soja na região Nordeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



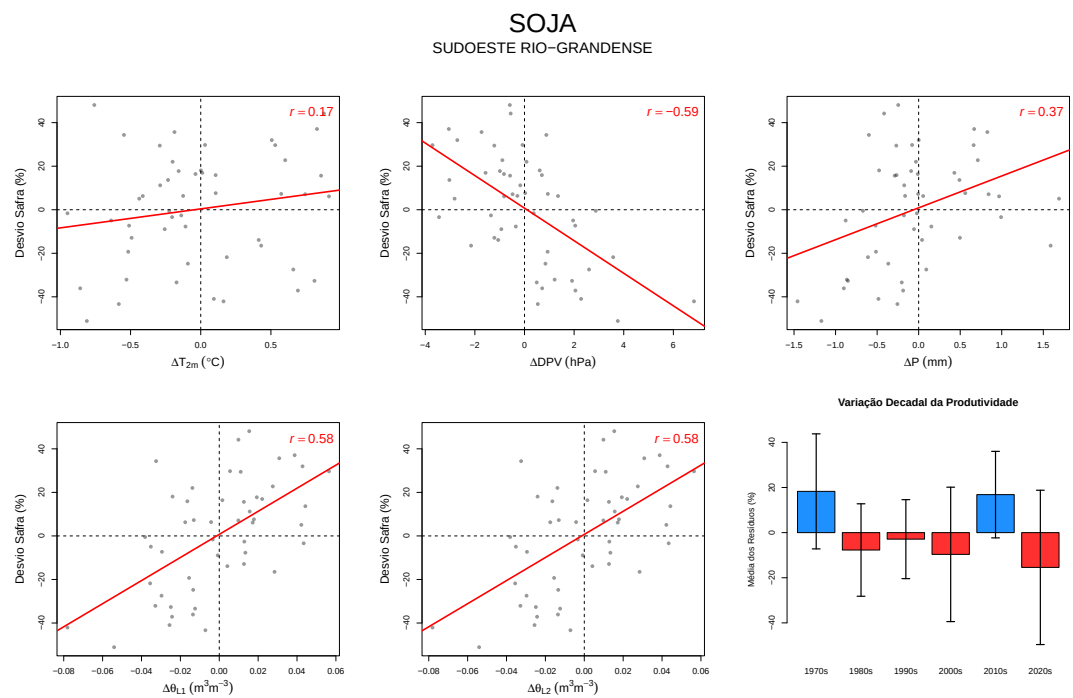
Fonte: Autor (2025).

Figura 98 – Relação entre o desvio da produtividade da soja na região Sudeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



Fonte: Autor (2025).

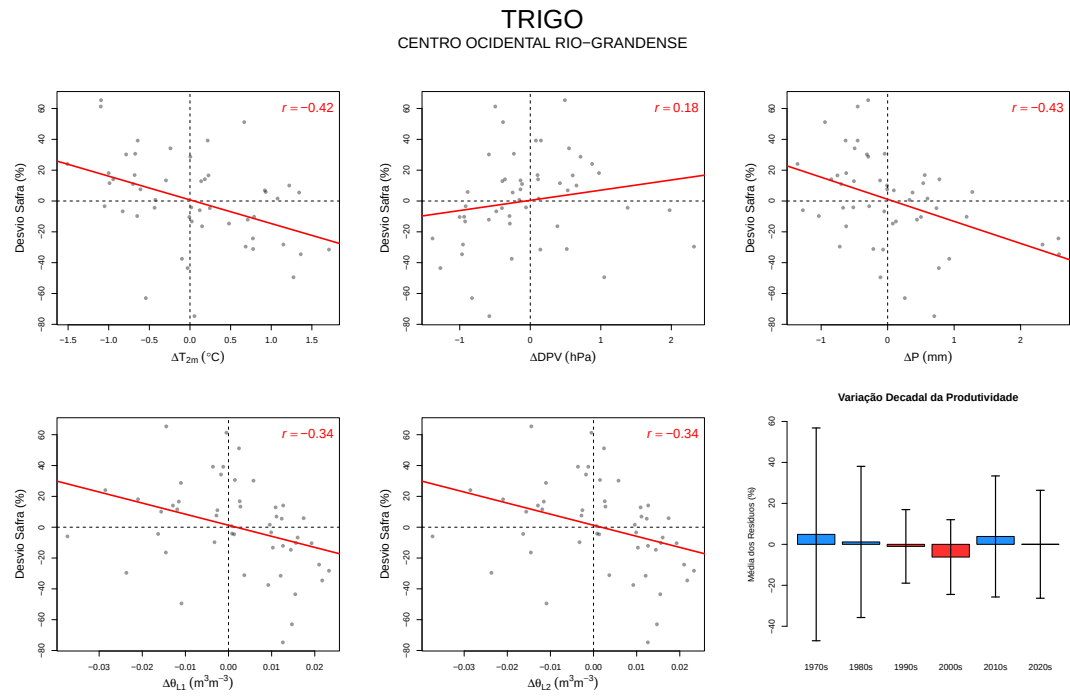
Figura 99 – Relação entre o desvio da produtividade da soja na região Sudoeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



Fonte: Autor (2025).

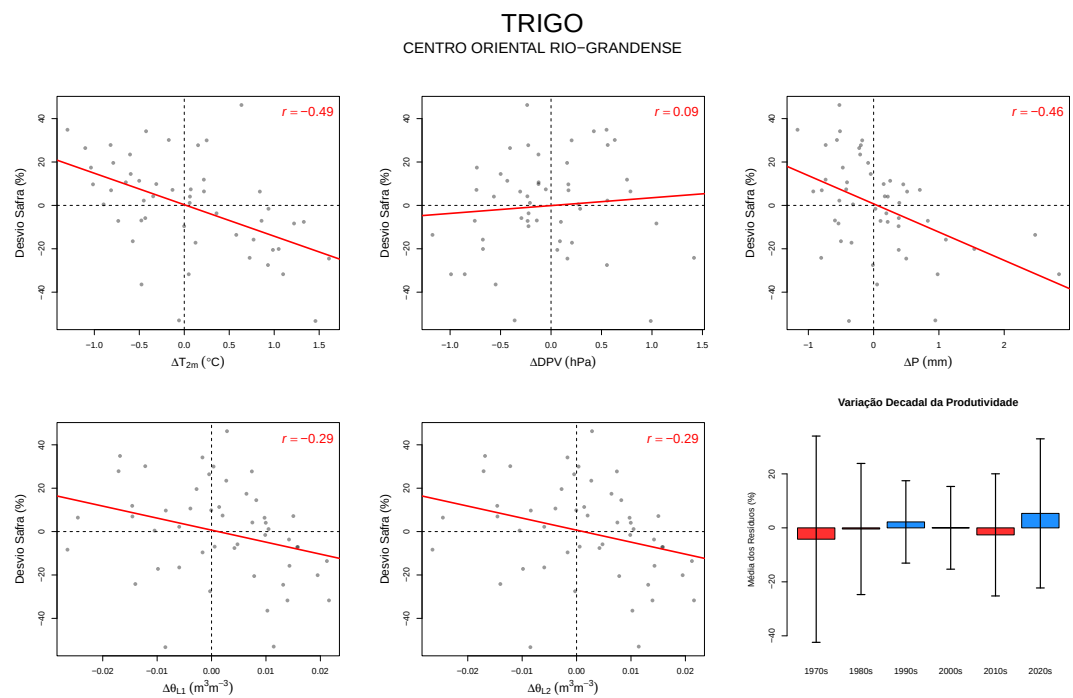
D.3 Relação entre variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo com o desvio da produtividade da Trigo por mesorregiões do RS

Figura 100 – Relação entre o desvio da produtividade do trigo na região Centro-Occidental do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



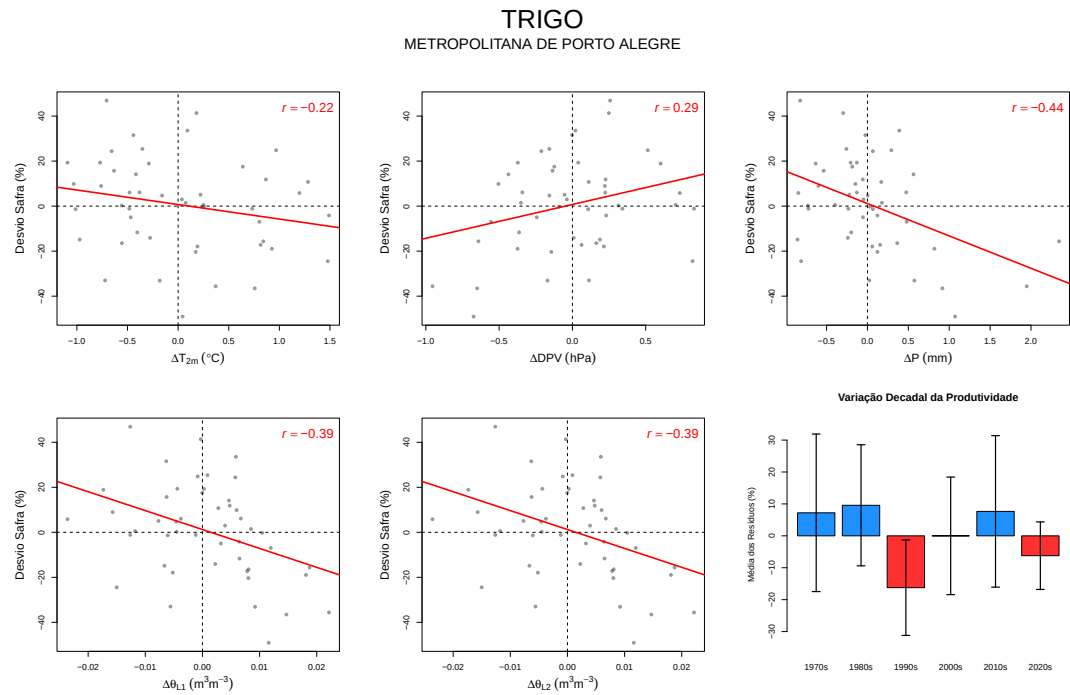
Fonte: Autor (2025).

Figura 101 – Relação entre o desvio da produtividade do trigo na região Centro-Oriental do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



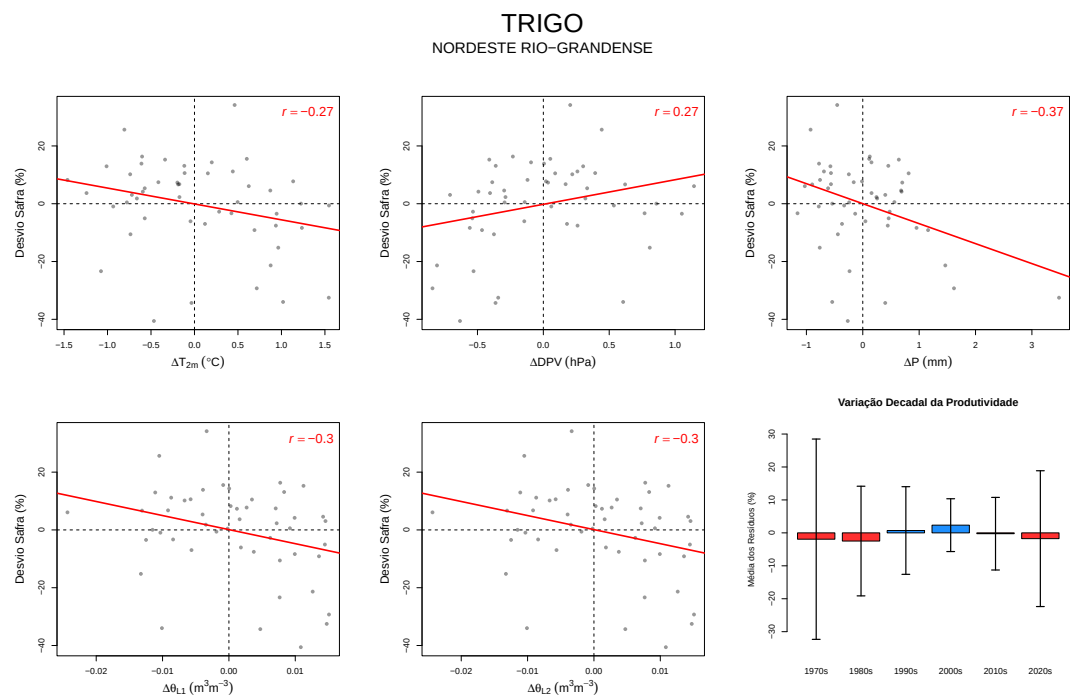
Fonte: Autor (2025).

Figura 102 – Relação entre o desvio da produtividade do trigo na região Metropolitana de Porto Alegre no RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



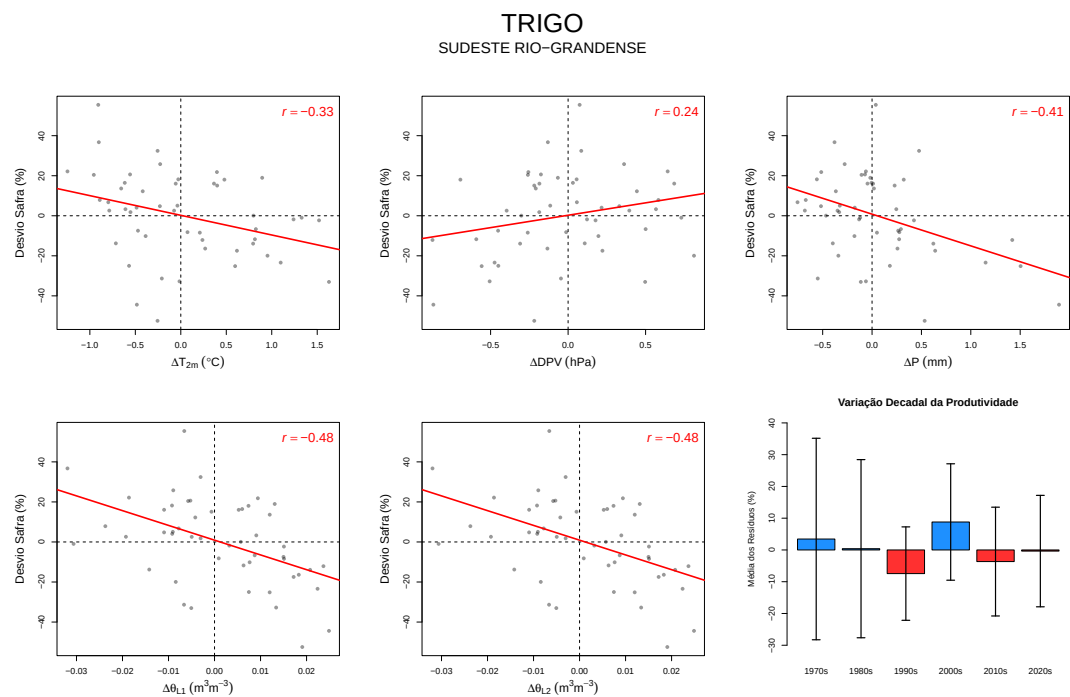
Fonte: Autor (2025).

Figura 103 – Relação entre o desvio da produtividade do trigo na região Nordeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



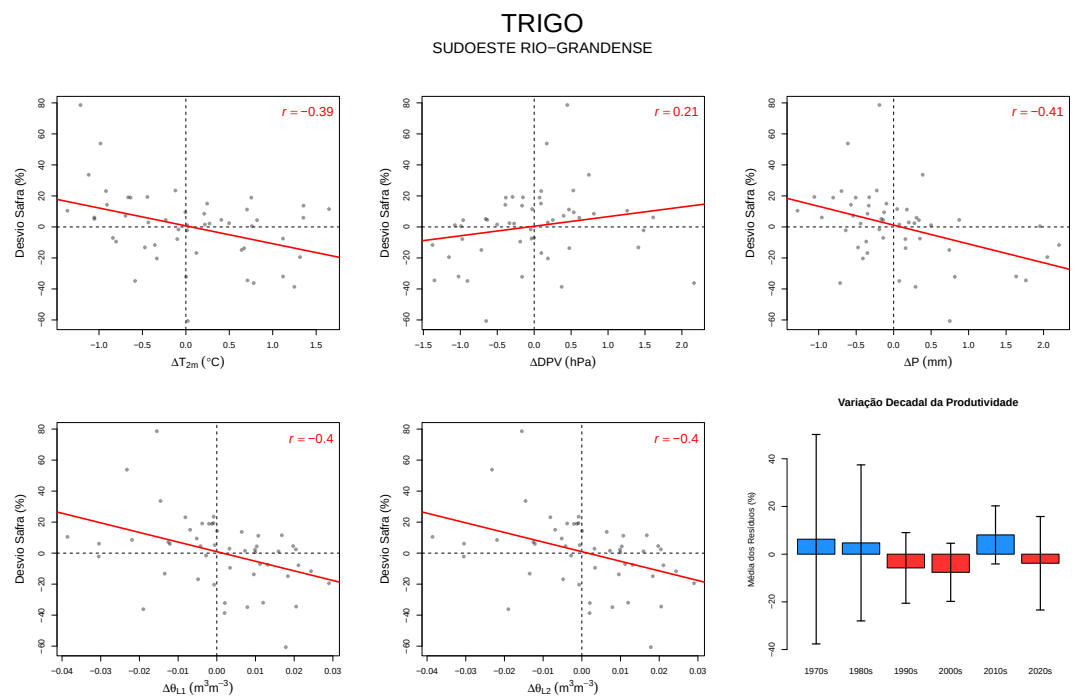
Fonte: Autor (2025).

Figura 104 – Relação entre o desvio da produtividade do trigo na região Sudeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



Fonte: Autor (2025).

Figura 105 – Relação entre o desvio da produtividade do trigo na região Sudoeste do RS e as variações de parâmetros meteorológicos e umidade do solo (1974–2024).



Fonte: Autor (2025).