

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DO CULTIVO DE TRIGO NO RIO
GRANDE DO SUL E AJUSTE DE MODELO AGROMETEOROLÓGICO-
ESPECTRAL PARA ESTIMATIVA DE RENDIMENTO DE GRÃOS

Amanda Heemann Junges
Engenheira Agrônoma/UFRGS
Mestre em Fitotecnia/UFRGS

Tese apresentada como um dos requisitos
à obtenção do Grau de Doutor em Fitotecnia
Ênfase Agrometeorologia

Porto Alegre (RS), Brasil
Setembro de 2011

AMANDA HEEMANN JUNGES
Engenheira Agrônoma - UFRGS
Mestre em Fitotecnia - UFRGS

TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOUTOR EM FITOTECNIA

Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 01.09.2011
Pela Banca Examinadora



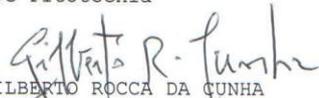
DENISE CYBIS FONTANA
Orientadora - PPG Fitotecnia



CHRISTIAN BREDEMEIER
Coorientador - PPG Fitotecnia



HOMERO BERGAMASCHI
PPG Fitotecnia



GILBERTO ROCCA DA CUNHA
EMPRESA Trigo - Passo Fundo/RS



RODRIGO RIZZI
UFPel - Universidade
Federal de Pelotas

Homologado em: 09.09.2011
Por



GILMAR ARDUINO BETTIO MARODIN
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia



PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade
de Agronomia

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Denise Cybis Fontana pelo apoio à realização deste trabalho e pelas orientações ao longo de minha trajetória acadêmica, desde a graduação até o doutorado. Muito obrigada pela amizade, pelos conselhos, pelo excelente exemplo pessoal e profissional que foram, são, e continuarão sendo fundamentais para minha formação. E se essas palavras são semelhantes aos agradecimentos que fiz na dissertação, não é por falta de criatividade, mas por elas continuarem expressando minha gratidão.

Agradeço aos demais professores dedicados à elaboração desta tese, em especial ao Prof. Christian Bredemeier e ao Prof. Homero Bergamaschi. Agradeço também aos professores do Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia Ricardo Wanke de Melo e Moacir Antônio Berlato.

Agradeço às colegas Ana Paula, Viviane, Leosane, Loana e Eliana por tornarem o dia-a-dia do departamento mais alegre e feminino.

Agradeço à Daniele pelo auxílio no processamento das imagens.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Às minhas amigas Maria Isabel e Mariana, por todos os momentos açucarados.

Agradeço ao meu marido Daniel, por estar sempre ao meu lado e por me ouvir.

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DO CULTIVO DE TRIGO NO RIO GRANDE DO SUL E AJUSTE DE MODELO AGROMETEOROLÓGICO-ESPECTRAL PARA ESTIMATIVA DE RENDIMENTO DE GRÃOS¹

Autor: Amanda Heemann Junges
Orientador: Denise Cybis Fontana
Co-orientador: Christian Bredemeier

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi descrever o cultivo de trigo na porção norte do Estado do Rio Grande do Sul em relação ao ciclo da cultura e à evolução temporal do índice de vegetação (NDVI) e ajustar modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento de grãos. A área de estudo abrangeu as regionais da EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa. Foram analisados dados anuais de rendimento de grãos de trigo (LSPA/IBGE), dados meteorológicos (FEPAGRO e 8º DISME/INMET) e imagens NDVI do sensor MODIS, de abril a dezembro, de 2000 a 2008. Os resultados indicaram que houve variação dos rendimentos regionais de grãos de trigo no sentido leste-oeste, concordando com o sentido do gradiente do quociente fototermal no Estado. A variação interanual dos rendimentos regionais de grãos de trigo foi atribuída, sobretudo, às condições meteorológicas, dada ausência de tendência tecnológica no período. Os calendários agrícolas indicaram a evolução temporal das principais etapas do ciclo e foi possível relacioná-los aos perfis temporais de NDVI/MODIS. Estes perfis podem ser empregados no monitoramento do ciclo de cereais de estação fria produtores de grãos estabelecidos na região de estudo. O índice de geadas e a precipitação pluvial, critérios de riscos climáticos considerados no zoneamento da cultura do trigo no Estado, foram as variáveis meteorológicas inseridas nos modelos de estimativa de rendimento de grãos. As variáveis espectrais corresponderam aos valores de NDVI das etapas em que as lavouras se encontravam no final do crescimento vegetativo e no florescimento, na maior parte da área cultivada de trigo. Os modelos agrometeorológicos-espectrais ajustados apresentaram resultados adequados à estimativa de rendimento de grãos em caráter regional. Os modelos geraram estimativas condizentes com a distribuição espacial e temporal da produção de trigo na região e podem ser inseridos em sistemas de previsão de safra, aos quais conferem as características de baixo custo, facilidade de processamento e objetividade nas estimativas.

¹ Tese de Doutorado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (173p.) Setembro, 2011.

SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION OF WHEAT CROPS IN RIO GRANDE DO SUL STATE, BRAZIL, AND ADJUSTMENT OF AGROMETEOROLOGICAL-SPECTRAL MODEL FOR GRAIN YIELD ESTIMATIONS¹

Author: Amanda Heemann Junges
Adviser: Denise Cybis Fontana
Co-adviser: Christian Bredemeier

ABSTRACT

This study aimed to describe the wheat crop distribution in Rio Grande do Sul State, Brazil, in terms of crop cycle and vegetation index temporal evolution, and to adjust agrometeorological-spectral models for grain yield estimations. The study area comprised the EMATER/RS regions: Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí, and Santa Rosa. A data set of annual wheat grain yields (LSPA/IBGE), meteorological data (FEPAGRO and 8°DISME/INMET) and MODIS NDVI images was analyzed from April to December of the 2000-2008 series. The results indicated a variation in the regional wheat grain yields from East to West, in accordance with the photothermal quotient gradient in the State. The interannual variation in regional wheat yields was attributed to mainly the meteorological conditions, since technological trend wasn't observed. The wheat cropping calendars indicated the temporal evolution of the main developmental stages and could be related to temporal NDVI/MODIS profiles. These profiles can be used to monitor the cycle of winter cereals for grain production in the study region. Frost index and rainfall, which are considered climate risks criteria in wheat zoning, were the meteorological parameters included in models for estimating grain yields. The spectral variables (NDVI values) were obtained at the end of the vegetative growing and flowering, in most of the wheat crop area. Adjusted agrometeorological-spectral models had an adequate performance for estimating grain yields in a regional scale. The estimations were consistent with the spatial and temporal wheat production distribution. The adjusted agrometeorological-spectral models can be inserted into crop forecasting systems, giving them characteristics of low cost, easy processing and objectivity.

¹ Doctoral thesis in Agronomy, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (173p.) September, 2011.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Cereais de estação fria.....	5
2.1.1 Aspectos gerais.....	5
2.1.2 Morfologia.....	8
2.2 Trigo.....	10
2.2.1 Produção mundial, nacional e estadual	10
2.2.2 Ciclo de desenvolvimento	13
2.2.3 Definição do rendimento de grãos	16
2.2.4 Zoneamento agrícola.....	17
2.3 Estimativas de safras agrícolas.....	20
2.3.1 Estimativas oficiais	21
2.3.2 Acompanhamento do ciclo.....	23
2.3.3 Estimativas com sensoriamento remoto.....	24
2.4 Modelos de estimativa de rendimento de grãos	26
2.4.1 Aspectos gerais.....	26
2.4.2 Modelos agrometeorológicos e espectrais.....	29
2.4.3 Informações espectrais	35
3 MATERIAL E MÉTODOS	44
3.1 Área de estudo.....	44
3.2 Análises.....	46
3.2.1 Estatística descritiva.....	46
3.2.2 Calendários agrícolas	49
3.2.3 Perfis temporais de NDVI/MODIS	50
3.2.4 Correlações.....	55
3.2.5 Ajuste de modelos agrometeorológicos-espectrais	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
4.1 Estatísticas descritivas.....	58
4.1.1 Área cultivada de cereais de estação fria	58
4.1.2 Área colhida de trigo	65
4.1.3 Quantidade produzida de grãos de trigo.....	66
4.1.4 Rendimento de grãos de trigo.....	66
4.3 Perfis temporais de NDVI/MODIS	90
4.3.1 Regionais	91
4.3.2 Máscaras de cultivos	95
4.3.3 Classes.....	101
4.3.4 Relação com o ciclo da cultura e o rendimento de grãos de trigo.....	123
4.4 Correlações.....	135
4.4.1 Variáveis espectrais e rendimento regional de grãos de trigo	135

	Página
4.4.2 Variáveis meteorológicas e rendimento regional de grãos de trigo	137
4.5 Ajuste de modelos agrometeorológicos-espectrais	141
4.6 Considerações finais.....	149
5 CONCLUSÕES	150
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152
7 APÊNDICES	160
7.1 Dados meteorológicos anuais.....	160
7.1.1 Santa Rosa	160
7.1.2 Ijuí	162
7.1.3 Passo Fundo.....	164
7.1.4 Erechim	166
7.1.5 Caxias do Sul.....	168
7.2 Dados meteorológicos médios (2000 a 2008).....	170

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Rendimento médio de grãos de trigo (kg ha^{-1}) do Brasil, Região Sul, Rio Grande do Sul e Paraná, 2000 a 2008 e na média do período. Fonte dos dados: IBGE (2010).....	13
2. Resultados do ajuste dos modelos de estimativa de rendimento de grãos de trigo para região de abrangência da Cooperativa Cotrijal (13 municípios localizados ao norte do Rio Grande do Sul). Fonte: Junges e Fontana (2011).....	35
3. Número e percentual (%) de municípios das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa pertencentes às regiões de adaptação de cultivares de trigo 1 (Fria, Úmida e Alta - FUA) e 2 (Moderadamente Quente, Úmida e Baixa - QUB).....	46
4. Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos rendimentos de grãos de trigo do Rio Grande do Sul e das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).....	67
5. Matriz de correlação dos rendimentos de grãos de trigo do Rio Grande do Sul (RS), das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa e do rendimento médio das cinco regionais, 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).....	68
6. Coeficientes lineares das equações de regressão do rendimento regional de grãos de trigo em função do tempo, regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008.....	69
7. Valor máximo, mínimo e médio do rendimento municipal de grãos de trigo, regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).....	70
8. Estatísticas descritivas (média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação) e teste de normalidade dos dados (Kolmogorov-Smirnov) de rendimentos municipais de grãos de trigo, nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).....	72

	Página
9. Quinzenas nas quais as lavouras de trigo se encontraram em florescimento, enchimento de grãos, maturação fisiológica e colheita, na maior parte da área cultivada nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 1999 a 2009. Fonte dos dados: EMATER/RS (2010).....	88
10. Limiares (valores de corte) empregados na geração das máscaras de cultivo das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa; área cultivada de milho e soja (LSPA/IBGE) e diferença entre áreas (limiar e oficial), 2000 a 2008.....	99
11. Área oficial destinada ao cultivo de cereais de inverno (LSPA/IBGE), área ocupada pela classe cereais de estação fria e diferença entre as áreas (em ha e porcentagem da área oficial), nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008.....	119
12. Resultado do teste de comparação de médias (áreas oficial e classificada de cereais de estação fria) nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa e no conjunto dos dados (todas), 2000 a 2008.....	120
13. Rendimento de grãos de trigo (kg ha^{-1}), NDVI área e NDVI tempo nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008.....	129
14. Coeficiente de correlação (Pearson) entre as variáveis espectrais e os rendimentos de grãos de trigo, das primeiras (1) e segundas (2) quinzenas dos meses de abril a outubro, regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, dados de 2000 a 2008.....	135
15. Coeficientes de correlação (Pearson) entre as variáveis espectrais - NDVI das primeiras (1) e segundas (2) quinzenas de novembro e dezembro, NDVI mínimo, máximo, diferença, área abaixo da curva, tempo e soma - e rendimentos de grãos de trigo das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008.....	135
16. Coeficientes de correlação (Pearson) entre as variáveis agrometeorológicas e rendimentos de grãos de trigo das regionais EMATER/RS Erechim, Caxias do Sul, Santa Rosa, Ijuí e Passo Fundo 2000 a 2008.....	138
17. Modelos de regressão linear múltipla para estimativa de rendimento de grãos de trigo das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa a partir de variáveis agrometeorológicas e espectrais, e parâmetros derivados, 2000 a 2008.....	142

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Diferenciação morfológica dos cereais de estação fria destinados à produção de grãos (aveia branca, centeio, cevada, trigo e triticale), e à cobertura do solo ou pastagens (aveia preta e azevém anual). Fonte: adaptado de Fontaneli <i>et al.</i> , 2009.....	9
2. Escala fenológica do trigo e componentes do rendimento de grãos definidos em cada estágio. Adaptado de: Shroyer (1995).....	14
3. Zoneamento agrícola e épocas de semeadura de trigo no Rio Grande do Sul. Fonte: Cunha <i>et al.</i> (2001).....	20
4. Relações entre rendimentos potencial, atenuado e real. Fonte: adaptado de Bouman <i>et al.</i> (1996).....	28
5. Curva de reflectância da vegetação verde. Fonte: adaptado de Sugawara (2001).....	33
6. Valores de NDVI obtidos a partir de medições com espectrorradiômetro, nos estádios de afilamento, emborrachamento, espigamento e maturação, em função de graus-dia acumulados ao longo do ciclo da cultura do trigo. Fonte: adaptado de Hamada e Pinto (2001).....	40
7. Localização das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa no Rio Grande do Sul.....	44
8. Regiões homogêneas de adaptação de cultivares de trigo no Rio Grande do Sul. Fonte: Cunha <i>et al.</i> (2006).....	45
9. Cálculo do NDVI área (área baixo da curva descrita pelo perfil temporal, até o máximo) e NDVI tempo (número de imagens, do mínimo ao máximo).....	54
10. Evolução temporal da área cultivada (ha) de aveia branca, centeio, cevada e triticale nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí, Santa Rosa e nas cinco regionais, 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).....	59

	Página
11. Evolução temporal da quantidade produzida (1.000 t) (A), área cultivada (ha) (B) e rendimento de grãos de trigo (kg ha ⁻¹) (C) nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí, Santa Rosa e nas cinco regionais, 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).....	62
12. Área cultivada com os principais cereais de estação fria, expressa em termos de porcentagem da área total nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).....	64
13. Distribuição de frequências dos rendimentos médios municipais de grãos de trigo das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa. Média 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).....	71
14. Grupos homogêneos de municípios quanto ao rendimento municipal de grãos de trigo no período de 2001 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).....	73
15. Regiões ecoclimáticas do Estado do Rio Grande do Sul. Fonte: adaptado de Rio Grande do Sul (1994).....	75
16. Porcentagem de área cultivada na qual as lavouras de trigo se encontravam em desenvolvimento vegetativo, florescimento, enchimento de grãos, maturação fisiológica e colheita nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 1999 a 2009. Fonte dos dados: EMATER/RS (2010).....	78
17. Diagramas de dispersão dos dados de porcentagem de área cultivada de trigo em florescimento nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa e no conjunto dos dados (todas), 1999 a 2009. Fonte dos dados: EMATER/RS (2010).....	81
18. Diagramas de dispersão dos dados de porcentagem de área cultivada de trigo em enchimento de grãos nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa e no conjunto dos dados (todas), 1999 a 2009. Fonte dos dados: EMATER/RS (2010).....	83
19. Diagramas de dispersão dos dados de porcentagem de área cultivada de trigo em maturação fisiológica nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 1999 a 2009. Fonte dos dados: EMATER/RS (2010).....	85
20. Diagramas de dispersão dos dados de porcentagem de área de trigo colhida nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa e no conjunto dos dados (todas), 1999 a 2009. Fonte dos dados: EMATER/RS (2010).....	87

	Página
21. Diagramas de dispersão da porcentagem de redução da expectativa inicial de rendimento de grãos de trigo decorrente de eventos meteorológicos adversos (quebras de safras). Dados da segunda quinzena de agosto à segunda quinzena de dezembro para o Rio Grande do Sul, 1999 a 2009. Fonte dos dados: EMATER/RS (2010).....	89
22. Perfis temporais de NDVI/MODIS, de abril a dezembro, das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 2000 a 2008.....	92
23. Perfis temporais de NDVI/NOAA das zonas de cobertura e uso do solo agrícola 2, campos sujos e Campos de Cima da Serra, no Planalto Meridional. Fonte: Jacóbsen <i>et al.</i> , 2003.....	94
24. Perfis temporais de NDVI/MODIS, de abril a dezembro, das áreas agrícolas identificadas por meio da metodologia de máscaras de cultivo, nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 2000 a 2008.....	97
25. Perfis temporais de NDVI/MODIS médios, de abril a dezembro, das classes 1 a 5 na regional EMATER/RS Santa Rosa, média 2000 a 2008.....	101
26. Perfis temporais de NDVI/MODIS médios, de abril a dezembro, das classes 1 a 5, nas regionais EMATER/RS Ijuí e Passo Fundo, média 2000 a 2008.....	102
27. Perfis temporais de NDVI/MODIS médios, de abril a dezembro, das classes 1 a 5, nas regionais EMATER/RS Erechim e Caxias do Sul, média 2000 a 2008.....	103
28. Localização espacial das classes 1 a 5, oriundas da classificação não supervisionada de áreas agrícolas identificadas por máscara de cultivo, em imagens NDVI/MODIS de abril a dezembro, regional EMATER/RS Caxias do Sul, 2008.....	104
29. Localização espacial das classes 1 a 5 oriundas da classificação não supervisionada de áreas agrícolas identificadas por máscara de cultivo, em imagens NDVI/MODIS de abril a dezembro, regional EMATER/RS Erechim, 2008.....	105
30. Localização espacial das classes 1 a 5 oriundas da classificação não supervisionada de áreas agrícolas identificadas por máscara de cultivo, em imagens NDVI/MODIS de abril a dezembro, regional EMATER/RS Passo Fundo, 2008.....	106
31. Localização espacial das classes 1 a 5 oriundas da classificação não supervisionada de áreas agrícolas identificadas por máscara de cultivo, em imagens NDVI/MODIS de abril a dezembro, regional EMATER/RS Ijuí, 2008.....	107

	Página
32. Localização espacial das classes 1 a 5 oriundas da classificação não supervisionada de áreas agrícolas identificadas por máscara de cultivo, em imagens NDVI/MODIS de abril a dezembro, regional EMATER/RS Santa Rosa, 2008.....	108
33. Perfis temporais de NDVI/MODIS médios da classe 2 nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 2000 a 2008.....	110
34. Perfis temporais de NDVI/MODIS, de abril a dezembro, das regionais, máscaras de cultivo e classe 2 (cereais de estação fria) nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul e Erechim, média 2000 a 2008.....	115
35. Perfis temporais de NDVI/MODIS, de abril a dezembro, da regional, máscara de cultivo e classe 2 (cereais de estação fria), nas regionais EMATER/RS Passo Fundo e Ijuí, média 2000 a 2008.....	116
36. Perfis temporais de NDVI/MODIS, de abril a dezembro, das regionais, máscaras de cultivo e classe 2 (cereais de estação fria) na regional EMATER/RS Santa Rosa, média 2000 a 2008.....	117
37. Dispersão em torno da reta 1:1 das áreas cultivadas de cereais de estação fria oficial (LSPA/IBGE) e classificada (classe) nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa e para o conjunto dos dados (todas), 2000 a 2008.....	121
38. Diagramas de dispersão das áreas cultivadas de cereais de estação fria oficial (LSPA/IBGE) e classificada (classe) nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa e para o conjunto dos dados (todas), 2000 a 2008.....	122
39. Perfis temporais de NDVI/MODIS (valores médios, máximos e mínimos) da classe cereais de estação fria nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim e Passo Fundo, 2000 a 2008.....	124
40. Perfis temporais de NDVI/MODIS (valores médios, máximos e mínimos) da classe cereais de estação fria nas regionais EMATER/RS Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008.....	125
41. Perfis temporais de NDVI/MODIS dos anos de maior (▲) e menor (●) rendimento de grãos de trigo, regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa.....	128
42. Perfis temporais de NDVI/MODIS na média dos anos com maiores (▲) e menores (●) rendimentos de grãos de trigo e áreas abaixo das curvas descritas pelos perfis (NDVI área) nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul e Erechim.....	130

	Página
43. Perfis temporais de NDVI/MODIS na média dos anos com maiores (▲) e menores (●) rendimentos de grãos de trigo e áreas abaixo das curvas descritas pelos perfis nas regionais EMATER/RS Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa.....	131
44. Dispersão dos valores de NDVI área e rendimentos de grãos de trigo das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008.....	134
45. Dispersão de valores estimados e observados (oficiais) do rendimento de grãos de trigo das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo e Santa Rosa, 2000 a 2008.....	143
46. Dispersão de valores estimados e observados (oficiais) do rendimento de grãos de trigo da regional EMATER/RS Ijuí, 2000 a 2008.....	144

RELAÇÃO DE APÊNDICES

	Página
1. Temperaturas do ar (°C) máxima, mínima e média, média mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Santa Rosa, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO	160
2. Índice de geadas, precipitação pluvial (mm) e dias com precipitação pluvial (n°), soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Santa Rosa, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.....	161
3. Graus-dia calculados com temperatura basal de 0°C, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Santa Rosa, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.....	161
4. Temperaturas do ar (°C) máxima, mínima e média, média mensal (maio a dezembro), e índice de geadas, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Ijuí, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.....	162
5. Precipitação pluvial (mm) e dias com precipitação pluvial (n°), soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Ijuí, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.....	163
6. Graus-dia calculados com temperatura basal de 0°C, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Ijuí, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.....	163
7. Temperaturas do ar (°C) máxima, mínima e média, média mensal (maio a dezembro), e índice de geadas, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Passo Fundo, 2000 a 2008. Fonte dos dados: 8°DISME/INMET.....	164
8. Precipitação pluvial (mm) e dias com precipitação pluvial (n°), soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Passo Fundo, 2000 a 2008. Fonte dos dados: 8°DISME/INMET.....	165
9. Graus-dia calculados com temperatura basal de 0°C, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Passo Fundo, 2000 a 2008. Fonte dos dados: FEPAGRO e 8°DISME/INMET.....	165

	Página
10. Temperaturas do ar (°C) máxima, mínima e média, média mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Erechim, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.....	166
11. Índice de geadas, soma mensal (maio a novembro) e quinzenal (setembro), estação meteorológica de Erechim, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.....	166
12. Precipitação pluvial (mm) e dias com precipitação pluvial (n°), soma mensal, maio a dezembro, estação meteorológica de Erechim, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.....	167
13. Graus-dia calculados com temperatura basal de 0°C, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Erechim, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.....	167
14. Temperaturas do ar (°C) máxima, mínima e média, média mensal (maio a dezembro), e índice de geadas, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Caxias do Sul, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.....	168
15. Precipitação pluvial (mm) e dias com precipitação pluvial (n°), soma mensal, maio a dezembro, estação meteorológica de Caxias do Sul, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.....	169
16. Graus-dia calculados com temperatura basal de 0°C, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Caxias do Sul, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.....	169
17. Temperatura média do ar, de maio a dezembro, nas estações meteorológicas de Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 2000 a 2008.....	170
18. Temperatura mínima e máxima do ar, de maio a dezembro, nas estações meteorológicas de Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 2000 a 2008.....	171
19. Precipitação pluvial total, de maio a dezembro, nas estações meteorológicas de Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 2000 a 2008.....	172
20. Número de dias com precipitação pluvial, de maio a dezembro, nas estações meteorológicas de Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 2000 a 2008.....	173

1 INTRODUÇÃO

O trigo é a principal cultura produtora de grãos estabelecida no período de outono-inverno-primavera, no Rio Grande do Sul. O cultivo de trigo é considerado fundamental para a segurança alimentar do País, pois produz uma das principais matérias primas alimentícias da população brasileira. A implantação de lavouras de trigo gera renda ao produtor rural, diversifica a produção agrícola e reduz os custos totais das safras de primavera-verão. O cultivo de trigo, e de demais cereais de estação fria, também viabiliza o sistema de semeadura direta e a rotação de culturas. No Rio Grande do Sul, a principal região produtora de trigo, em termos de área cultivada, é formada pelos municípios localizados na metade norte do Estado. Estes municípios foram responsáveis, na média dos anos 2000 a 2008, por 86% da produção estadual de grãos de trigo (IBGE, 2010).

A geração de informações acerca dos cultivos agrícolas, tais como área cultivada, produção e rendimento de grãos, é um dos principais objetivos das estimativas de safras. No Brasil, as estimativas oficiais de safras agrícolas são de competência do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que divulga, mensalmente, o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA). As estimativas oficiais são obtidas através de questionários, que são aplicados pelo IBGE aos responsáveis técnicos de instituições relacionadas ao setor agrícola. Esta metodologia, no entanto, não permite avaliar eventuais erros de declaração.

As informações coletadas por sensores remotos orbitais podem contribuir para tornar mais eficiente e dinâmico o sistema de monitoramento e previsão de safras. As imagens de satélite têm surgido como uma importante e promissora fonte de dados para estimativas de área cultivada e rendimento de grãos, pois contêm informações objetivas a respeito das culturas agrícolas. As estimativas de rendimento de grãos podem ser obtidas, por exemplo, através de modelos agrometeorológicos-espectrais.

Em modelos agrometeorológicos-espectrais, o componente agrometeorológico expressa a disponibilidade hídrica, a radiação solar incidente, a temperatura e a umidade do ar. O componente espectral expressa o efeito conjunto das condições meteorológicas, práticas de manejo e ocorrência de estresses no desenvolvimento das plantas e na definição do rendimento de grãos.

O rendimento de grãos de trigo é afetado negativamente pela ocorrência de geadas no florescimento e pelo excesso de precipitação pluvial nas etapas de enchimento dos grãos, maturação fisiológica e colheita. Estas variáveis, consideradas os principais riscos climáticos da cultura, definem as épocas de semeadura e compõem modelos agrometeorológicos de estimativa de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul.

Em modelos agrometeorológicos-espectrais, o termo espectral pode ser representado por índices de vegetação, tais como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (do inglês, *Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI), proposto por Rouse *et al.* (1973), que relaciona a reflectância da vegetação nos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo. O NDVI, considerado um indicador do crescimento da vegetação e do acúmulo de biomassa verde pelas plantas, é empregado no ajuste de modelos espectrais de estimativa de rendimento de grãos. Nestes modelos, as informações coletadas por sensores remotos orbitais devem permitir o

acompanhamento, no tempo, das principais etapas fenológicas das culturas agrícolas. Assim, a resolução temporal das imagens de satélite é priorizada, em detrimento do detalhamento espacial das informações (resolução espacial).

As semelhanças morfológicas existentes entre os cereais de estação fria destinados à produção de grãos e aqueles cultivados para cobertura do solo, ou em pastagens, dificultam a identificação e a distinção destes cultivos em imagens de satélite. Em estudos multitemporais, que empregam imagens adquiridas ao longo de todo ciclo, as diferenças quanto à época de semeadura e o manejo podem servir de base para distinção das áreas agrícolas estabelecidas no período de outono-inverno-primavera.

O objetivo geral deste trabalho foi descrever o cultivo de trigo na porção norte do Estado do Rio Grande do Sul (regionais da EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa) em relação ao ciclo da cultura e à evolução temporal do índice de vegetação (NDVI) e ajustar modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento de grãos.

Os objetivos específicos foram:

1. Caracterizar a produção de trigo através das estatísticas descritivas dos dados oficiais de área cultivada, área colhida, produção e rendimento de grãos.
2. Verificar a variabilidade interanual e a existência de tendência tecnológica nos rendimentos de grãos de trigo das regionais.
3. Gerar grupos de municípios homogêneos quanto ao rendimento de grãos de trigo.
4. Caracterizar a evolução temporal das principais etapas do ciclo da cultura, gerando calendários agrícolas médios.

5. Testar metodologias para discriminação, em imagens NDVI/MODIS, das áreas agrícolas cultivadas com cereais de estação fria para produção de grãos, em relação às demais áreas estabelecidas no período de outono-inverno-primavera.

6. Elaborar perfis temporais de NDVI/MODIS para o monitoramento do ciclo da cultura do trigo. Estabelecer relações entre os perfis temporais, os calendários agrícolas e os rendimentos de grãos de trigo das regionais.

7. Ajustar modelos empíricos de estimativa de rendimento de grãos de trigo, para as regionais, a partir de variáveis agrometeorológicas e espectrais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cereais de estação fria

2.1.1 Aspectos gerais

No Rio Grande do Sul, no período de outono-inverno-primavera, são estabelecidas lavouras de aveia branca, centeio, cevada, trigo e triticale para produção de grãos. A implantação de lavouras de cereais de estação fria diversifica a produção agrícola, agrega renda ao produtor rural e viabiliza o sistema de semeadura direta e a rotação de culturas (Tibola *et al.*, 2009). A rotação de culturas, por sua vez, reduz os custos de produção ao otimizar a utilização da mão-de-obra e do maquinário (Tibola *et al.*, 2009).

A aveia (*Avena spp.*) é uma das alternativas de cultivo para o período de outono-inverno nos Estados que compõem a região sul do País, especialmente para diversificar a exploração agrícola (Comissão, 2006). O cultivo de aveia tem amplas possibilidades de utilização: produção de grãos, forragem verde, silagem, feno ou adubo verde. No que diz respeito à produção de grãos, a região sul foi responsável por 97% da produção nacional de aveia branca, na média dos anos 2000 a 2008 (IBGE, 2010). O Paraná foi o maior Estado produtor, respondendo por 62% da produção da região sul, seguido pelo Rio Grande do Sul (33%).

O centeio (*Secale cereale*), espécie que se destaca pela rusticidade e adaptação a solos pobres, é cultivado para produção de grãos, cobertura do solo ou produção de forragem (Embrapa Trigo, 2011). No Brasil, o Rio Grande do Sul foi o maior Estado

produtor, respondendo por 76% da produção da região sul e 73% da produção nacional, na média dos anos 2000 a 2008 (IBGE, 2010).

A cevada (*Hordeum distichon*) é um cereal de estação fria cujo grão é empregado na industrialização de bebidas (cervejas e destilados), na composição de farinhas para panificação, na produção de medicamentos e sucedâneos de café e na alimentação animal (Embrapa Trigo, 2011). No Brasil, a malteação é o principal uso econômico da cevada (Embrapa Trigo, 2011). A região sul respondeu por cerca de 100% da quantidade de cevada produzida no País, segundo dados de 2000 a 2008 (IBGE, 2010). O Rio Grande do Sul foi o maior Estado produtor até o ano de 2006, quando a produção do Paraná superou a gaúcha. Na média dos anos, o Rio Grande do Sul foi responsável por 55% da produção nacional.

O tritcale (*X Triticosecale* Wittmarck) é um cereal de estação fria obtido pelo cruzamento artificial de duas espécies: trigo e centeio. Os grãos têm sido empregados, principalmente, na alimentação de suínos e aves (Embrapa Trigo, 2001). A região sul foi responsável por 62 a 73% da produção nacional de tritcale, de acordo com dados de 2005 a 2008 (IBGE, 2010), sendo o Paraná o maior Estado produtor (responsável por 84% da produção da região sul, na média dos anos).

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma planta de ciclo anual, cujos grãos são consumidos, na forma de farinhas, em pães, massas, bolos e biscoitos. Quando não atingem a qualidade exigida para consumo humano, os grãos são destinados à ração animal (Embrapa Trigo, 2011). O gênero *Triticum* contém em torno de 30 espécies, metade delas sendo cultivada comercialmente e, as restantes, crescendo de forma silvestre. Mais de 90% do trigo cultivado no mundo correspondem às espécies *Triticum aestivum vulgare* e *Triticum turgidum durum* (Abitrigo, 2011). O *T.aestivum* L., conhecido como trigo comum, é a espécie de maior interesse comercial, dada a

capacidade de panificação. Grãos da espécie *T. durum* não possuem as proteínas gliadina e glutenina e, por isso, não são adequados à panificação. No entanto, superam as demais espécies na qualidade necessária à fabricação de macarrões (Moreira e Souza, 1999).

No período de outono-inverno-primavera, além dos cereais de estação fria cultivados para produção de grãos, muitos produtores optam pelo estabelecimento de lavouras com espécies produtoras de massa verde, para pastagem ou cobertura do solo.

O período de outono-inverno é crítico para pecuária em virtude da diminuição da oferta de forragem no campo nativo. A aveia pode ser utilizada na alimentação animal (pastejada ou na forma de feno e silagem). Para o estabelecimento de pastagens, é usual a semeadura de aveia preta (*Avena strigosa*). Para que se disponha de pastagem no outono, a semeadura da aveia preta é realizada logo após a retirada das culturas de primavera-verão, empregando-se uma maior quantidade de sementes, comparativamente àquela empregada em lavouras para produção de grãos, a fim de que haja uma cobertura rápida do solo e oferta precoce de forragem (Comissão, 2006). Além da aveia preta, o azevém anual (*Lolium multiflorum*) também é empregado no estabelecimento de pastagens de outono-inverno, seja como cultivo único ou compondo misturas forrageiras (Caresani, 2010).

A aveia preta, além de ser empregada em pastagens, é a espécie mais cultivada como cobertura de solo, na região sul do Brasil, antecedendo os cultivos de milho e soja (Silva *et al.*, 2006). A escolha da aveia preta deve-se à facilidade de obtenção de sementes, grande produção de cobertura morta com alta relação C/N (decomposição lenta), sistema radicular agressivo, controle de plantas daninhas e diminuição da população de patógenos causadores de doenças em trigo e soja (Floss, 2001).

2.1.2 Morfologia

Além de serem estabelecidos no mesmo período do ano, a aveia preta cultivada para cobertura do solo em pastagens, e os cereais de estação fria cultivados para produção de grãos, são gramíneas com semelhanças morfológicas e fenológicas. Para discriminação das espécies, no período vegetativo, é necessário o conhecimento das estruturas foliares.

As folhas das gramíneas, em geral, possuem bainha, lígula e lâmina. A bainha é o órgão alongado em forma de cartucho, que nasce no nó e cobre o entrenó. A lígula é a parte branca e membranosa que se localiza na parte superior interna da bainha, no limite com a lâmina foliar (Fontaneli *et al.*, 2009). Em gêneros como *Hordeum* (cevada) e *Lolium* (avevém), na base da lâmina, existem dois apêndices que abraçam o caule. Esses apêndices, chamados de aurículas, juntamente com a forma da lígula, distinguem as espécies durante o período vegetativo (Figura 1) (Fontaneli *et al.*, 2009).

A diferenciação dos cereais de estação fria, pelas características das folhas, pode ser feita pela seguinte chave (Mundstock, 1983 *apud* Fontaneli *et al.*, 2009).

1. Plantas com aurículas

- 1.1 Aurículas pequenas ou médias, com os brotos pilosostrigo
 - 1.2 Aurículas amplexicaules, largas e longas, glabrascevada
 - 1.3 Aurículas pequenas, glabrascenteio
2. Plantas sem aurículas e com lígula bem desenvolvidaaveia

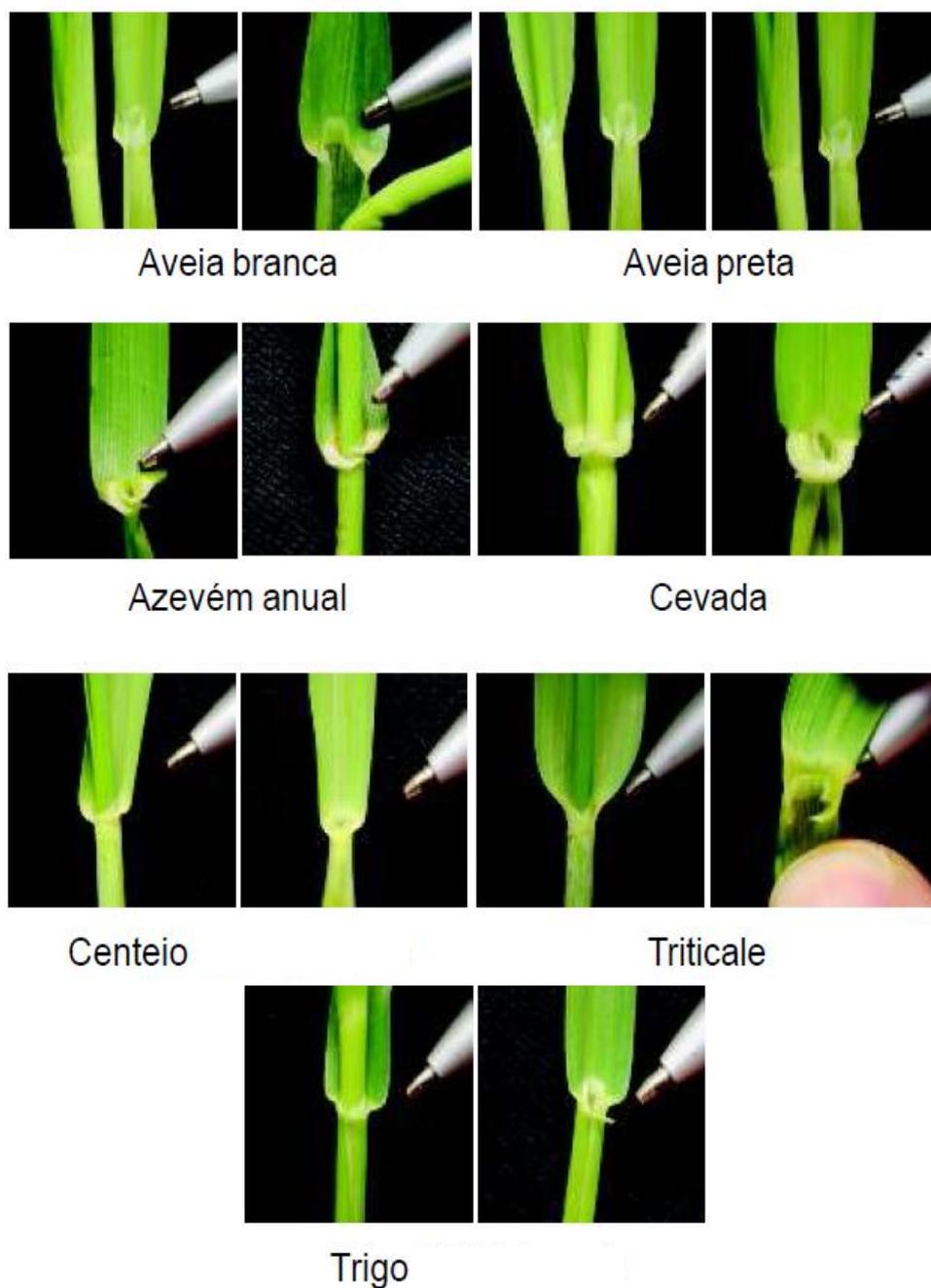


FIGURA 1. Diferenciação morfológica dos cereais de estação fria destinados à produção de grãos (aveia branca, centeio, cevada, trigo e triticale) e à cobertura do solo ou pastagens (aveia preta e azevém anual). Fonte: adaptado de Fontaneli *et al.*, 2009.

2.2 Trigo

Dentre os cereais de estação fria, o trigo é a principal cultura produtora de grãos, estabelecida no período de outono-inverno-primavera, no Rio Grande do Sul. Além de ocupar a maior área cultivada (IBGE, 2010), a importância da cultura está associada à geração de renda para o produtor rural e à otimização da produção agrícola (Tibola *et al.*, 2009). Nesse sentido, o cultivo do trigo permite redução do custo total das safras de primavera-verão: entre 6,1 e 8,4%, no caso do milho, e entre 9,1 e 12,2% para soja (Canziani e Guimarães, 2009).

O cultivo de trigo é considerado fundamental para a segurança alimentar do país, pois produz uma das principais matérias-primas alimentícias brasileiras (Guarienti, 2009). A importância econômica e social da cultura pode ser demonstrada, também, pelo número de pessoas envolvidas na cadeia agroindustrial: 150 mil produtores rurais, gerando 160 mil empregos diretos e, aproximadamente, 900 mil empregos indiretos (Canziani e Guimarães, 2009).

2.2.1 Produção mundial, nacional e estadual

A partir da década de 1960, a produção mundial de trigo cresceu de 200 para 650 milhões de toneladas e o rendimento médio de grãos passou de 2.000 kg ha⁻¹ para aproximadamente 3.000 kg ha⁻¹ (Canziani e Guimarães, 2009). Embora possa ser considerada uma cultura de ampla distribuição geográfica, os principais países produtores encontram-se no hemisfério norte. União Européia, China, Índia, Estados Unidos e Rússia foram responsáveis por 67% da produção mundial de trigo, segundo dados de 2005 a 2009 (Canzini e Guimarães, 2009). Os países pertencentes à União Européia foram os que registraram os maiores rendimentos de grãos: entre 4.400 e 5.500 kg ha⁻¹ (Canziani e Guimarães, 2009).

Os cinco países (e bloco) maiores produtores de trigo também são os principais consumidores deste cereal. De 2005 a 2009, o consumo mundial de trigo situou-se entre 605 e 635 milhões de toneladas, sendo a maior parte (70%) destinada ao consumo humano (estimado em 67 kg *per capita* ano em equivalente grão). No Brasil, o consumo *per capita* ano é de 49 kg, 27% inferior à média mundial (Canziani e Guimarães, 2009).

No Brasil, a produção anual de grãos de trigo oscilou entre 1,7 e 6 milhões de toneladas, considerando-se os dados de 2000 a 2008 (IBGE, 2010) (Tabela 1). Entre 89 e 95% da produção nacional foram provenientes da região sul do País, mais especificamente do Rio Grande do Sul e Paraná. Estes Estados responderam por 93 a 98% da quantidade total produzida na região sul. O Paraná é o maior produtor desde o ano 2001, seguido pelo Rio Grande do Sul. O rendimento médio de grãos de trigo do País, na média dos anos, foi de 1.972 kg ha⁻¹, valor inferior ao rendimento médio mundial. O maior valor foi registrado em 2003 (2.403 kg ha⁻¹) e o menor em 2002 (1.475 kg ha⁻¹). Cunha *et al.*, (2009), no entanto, salientam que, após 1995, o Brasil superou todos os principais produtores mundiais de trigo em termos de ganhos anuais de rendimento de grãos, reforçando o argumento de que os entraves à produção nacional de trigo, embora existam, não são exclusivamente de base tecnológica.

No Rio Grande do Sul, o cultivo de trigo iniciou em 1737 com a introdução de sementes vindas do Estado de São Paulo. Imigrantes açorianos, que chegaram ao Estado a partir de 1752, desenvolveram uma economia de subsistência que incluía o cultivo de trigo (Jacobsen, 1999). Alguns historiadores, no entanto, acreditam que o trigo já era cultivado, nas reduções jesuíticas, antes do estabelecimento dos imigrantes açorianos. De acordo com Jacobsen (1999), o interesse pela produção do charque, conflitos armados e a ferrugem do trigo foram responsáveis pelo desaparecimento da cultura a partir de 1823. O ressurgimento da triticultura aconteceu em 1875, com a chegada de

imigrantes italianos que se estabeleceram nas terras situadas na encosta superior do Planalto Riograndense.

No final da década de 1920 foi iniciada a reação em defesa do trigo nacional, através da contratação de técnicos e de apoio à instalação de pequenos moinhos nas principais regiões produtoras. A partir de 1930, com o desenvolvimento industrial e crescimento dos centros urbanos, o consumo de trigo aumentou, impulsionando o setor moageiro no País. Essa época foi caracterizada pela intervenção do governo no setor tritícola, através da compra de trigo nacional, distribuição de cotas de industrialização aos moinhos e proibição de importação de farinha (Jacobsen, 1999). No Rio Grande do Sul, a produção de trigo teve seu auge na década de 1970 (Mundstock, 1999). O governo federal proporcionou ao triticultor uma maior remuneração e estimulou melhorias nas tecnologias. Os maiores incrementos de área colhida ocorreram entre 1975 e 1980 e entre 1986 e 1990, quando foram implementadas políticas de sustentação da produção nacional (Colle, 1998). Na década de 1990, o controle estatal e as barreiras tarifárias chegaram ao fim, provocando diminuição de produção e reestruturação da comercialização de trigo no Brasil.

Na média dos anos 2000 a 2008, a produção de trigo no Rio Grande do Sul foi de 1.520.000 toneladas, equivalente a 40% da produção da região sul ou 37% da produção nacional (IBGE, 2010) (Tabela 1). Os rendimentos de grãos têm variado de 1.355kg ha⁻¹ (2006) a 2.266 kg ha⁻¹ (2008). De acordo com Canziani e Guimarães (2009), a variabilidade do rendimento de grãos de trigo é semelhante nos Estados do Paraná e Rio Grande do Sul. A amplitude dos rendimentos de grãos, considerando-se os dados de 2000 a 2008, foi de 1.344 kg ha⁻¹ no Paraná e de 911 kg ha⁻¹ no Rio Grande do Sul (Tabela 1). No Brasil, a amplitude dos rendimentos de grãos foi de 1.074 kg ha⁻¹ (Tabela 1).

TABELA 1. Rendimento médio de grãos de trigo (kg ha^{-1}) do Brasil, Região Sul, Rio Grande do Sul e Paraná, de 2000 a 2008 e na média do período. Fonte dos dados: IBGE (2010).

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Média
Brasil	1.515	1.947	1.475	2.403	2.072	1.973	1.592	2.219	2.549	1.972
Região Sul	1.523	1.949	1.476	2.409	2.064	1.955	1.535	2.199	2.542	1.961
Rio Grande do Sul	1.593	1.754	1.418	2.253	1.832	1.645	1.355	2.030	2.266	1.794
Paraná	1.429	2.093	1.503	2.554	2.245	2.169	1.610	2.345	2.773	2.080

Segundo Canziani e Guimarães (2009), a cultura do trigo se caracteriza pela elevada variabilidade de área cultivada e de rendimento de grãos, em função de variações, tanto nas políticas de exportação e formação de estoques reguladores, quanto das condições meteorológicas.

2.2.2 Ciclo de desenvolvimento*

A localização no tempo das principais etapas do ciclo de desenvolvimento das espécies vegetais é uma das aplicações agronômicas da fenologia. Com isso, torna-se possível confrontar os estádios fenológicos com as condições do ambiente e avaliar o desempenho das culturas em diferentes locais e períodos (Bergamaschi, 2011).

O ciclo de crescimento e desenvolvimento das plantas de trigo pode ser dividido em três etapas: vegetativa, reprodutiva e de enchimento de grãos. Em cada etapa, condições ambientais ocorridas durante estádios específicos são determinantes do rendimento quantitativo e qualitativo da cultura (Cunha *et al.*, 2009). As condições ambientais determinam, a cada etapa do ciclo, os principais componentes do rendimento de grãos (Figura 2).

* As informações deste item foram obtidas de Mundstock (1999). Serão mencionadas, no texto, apenas eventuais citações de outros autores.

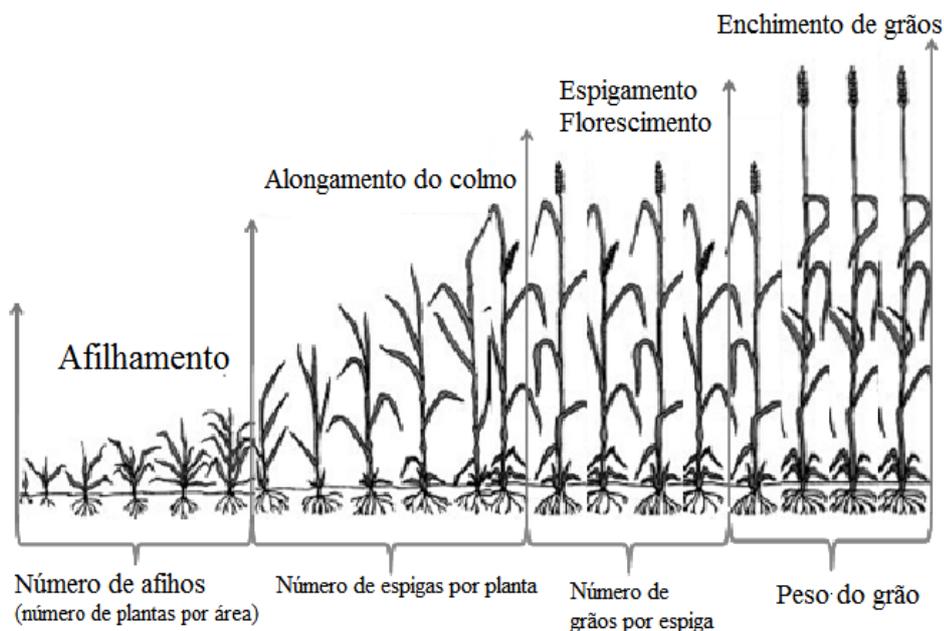


FIGURA 2. Escala fenológica do trigo e componentes do rendimento de grãos definidos em cada estágio. Adaptado de: Shroyer (1995).

O período vegetativo inicia com a semente, embebição da semente, diferenciação dos primórdios foliares e crescimento do coleóptilo. O coleóptilo cresce até alcançar a superfície do solo (subperíodo sementeira-emergência) e emite a primeira folha. As demais folhas surgem a intervalos mais ou menos regulares (filocronos) de 100 graus-dia (temperatura basal de 0°C) (Cunha *et al.*, 2009). A emissão de afixos inicia quando a planta possui aproximadamente quatro folhas definitivas e estende-se até o início do alongamento do colmo, quando a competição por recursos inibe a formação de novos afixos. O período de emissão e formação de afixos é favorecido por temperaturas do ar entre 15 e 20°C (Scheeren *et al.*, 2000).

O período de alongamento do colmo, cujo início é definido pelo aparecimento externo do primeiro nó na base da planta, caracteriza-se pelo acelerado crescimento dos entrenós e das bainhas foliares. Paralelamente ocorre o desenvolvimento dos afixos e da espiga do colmo principal.

A etapa reprodutiva inicia com a diferenciação das espiguetas (estádio de duplo anel). O crescimento da espiga e a formação dos primórdios florais, no interior do colmo, ocorrem simultaneamente com o alongamento dos entrenós. Pouco antes da emergência da espiga, as inflorescências já atingiram grande tamanho e permanecem envoltas na bainha da folha bandeira (emborrachamento). Em trigo, o surgimento das inflorescências (espigamento) não coincide com o florescimento: a abertura das anteras ocorre de 5 a 7 dias após a plena emergência da espiga. O pólen de cada flor é responsável pela fecundação do próprio óvulo, embora, pela ação do vento, possa ocorrer fecundação cruzada. Entre 80 e 90% das flores são fecundadas durante o dia. O processo de fertilização é o mais crítico no desenvolvimento da planta e as condições ambientais podem prejudicar a formação dos grãos. Nesse sentido, a abertura das flores é favorecida por dias sem precipitação pluvial e com temperatura do ar entre 13 e 25°C.

De acordo com Cunha (2006a), o período de aproximadamente 30 dias próximos à antese, é crítico para a cultura, pois as condições ambientais (especialmente radiação solar e temperatura) são essenciais para determinação do número de flores que efetivamente produzirão grãos (número de grãos por espiga). Condições ambientais desfavoráveis no período de 20 dias pré-floração refletirão negativamente no número de flores férteis na antese e, nos 10 dias pós-floração, reduzem a capacidade de estabelecimento dos grãos.

O período de enchimento de grãos se estende do florescimento até a maturação fisiológica (máximo acúmulo de matéria seca pelo grão). No início deste período há intensa multiplicação celular, sem crescimento aparente, para formação do endosperma (Cunha *et al.*, 2009). Após, ocorre o enchimento efetivo do grão, que passa pelas etapas de grão leitoso, pastoso, duro e maduro (Cunha *et al.*, 2009). Os materiais translocados

para o grão provêm da fotossíntese realizada pelas partes verdes da planta e da remobilização de nutrientes previamente armazenados em folhas, colmos e raízes.

2.2.3 Definição do rendimento de grãos

O rendimento potencial é o rendimento de grãos (kg ha^{-1}) obtido por uma cultura agrícola em condições ótimas de desenvolvimento das plantas, ou seja, em um ambiente ao qual a planta esteja aclimatada, sem restrições de água e nutrientes e sem a ocorrência de estresses bióticos ou abióticos (Doorenbos e Kassam, 1994).

O rendimento de grãos depende da quantidade de radiação solar que incide sobre a cultura; da eficiência com que o dossel intercepta a radiação solar incidente; da eficiência de conversão da radiação interceptada (radiação fotossinteticamente ativa interceptada) em fotoassimilados; e da eficiência de partição dos fotoassimilados aos grãos (Cunha *et al.*, 2009). O rendimento final de grãos pode ser calculado através dos componentes do rendimento: número de plantas por área, número de espigas por planta, número de grãos por espiga e peso do grão (Figura 2).

A quantidade de radiação solar incidente depende, basicamente, da época do ano e da latitude do local, além das condições atmosféricas. Dessa maneira, a quantidade de radiação que incide sobre a cultura pode ser modificada em função da época de semeadura. Além de minimizar o possível efeito negativo decorrente de eventos meteorológicos em períodos críticos, a época de semeadura deve promover maior disponibilidade de radiação solar nas etapas do ciclo em que a planta mais necessita. De acordo com Cunha (2006a), o período de aproximadamente 30 dias, próximos à antese, é crítico para as plantas de trigo, especialmente no que se refere à radiação solar e à temperatura do ar. Limitações durante este período reduzem o número de grãos, o qual,

dentre os componentes do rendimento, possui maior associação com o rendimento final (Rodrigues *et al.*, 2002).

A eficiência de partição dos fotoassimilados aos grãos (conversão da biomassa no rendimento de interesse) está relacionada ao índice de colheita. O índice de colheita representa a razão entre o rendimento biológico (produção total de fitomassa acima do solo) e o rendimento de grãos (parte colhida e comercializada da cultura) (Moreira *et al.*, 1999). Maior índice de colheita, em trigo, tem sido apontado como principal responsável pelo aumento do rendimento de grãos (Moreira *et al.*, 1999; Cunha *et al.*, 2009). Em cultivares modernas de trigo, o aumento do número de grãos por espiga e, conseqüentemente, do rendimento, está relacionado à partição de biomassa em pré-antese, ou seja, à capacidade da planta em acumular matéria seca e particioná-la às estruturas reprodutivas.

2.2.4 Zoneamento agrícola*

Prejuízos ao rendimento e à qualidade industrial dos grãos podem ser causados por eventos de natureza climática adversa, particularmente quando coincidentes com períodos críticos do desenvolvimento das plantas. A determinação da aptidão climática das regiões para o cultivo agrícola é um dos objetivos do zoneamento agroclimático. A delimitação climática aliada à aptidão de cultivo dos solos compõe o zoneamento agroecológico. O zoneamento agrícola compreende o zoneamento agroecológico e o levantamento das condições socioeconômicas das regiões (Pereira *et al.*, 2002).

De acordo com Canziani e Guimarães (2009), a produção brasileira de trigo se caracteriza pelo elevado risco de produção. Este risco decorre, dentre outros fatores, dos

* As informações deste item foram obtidas de Zoneamento Agrícola e época de semeadura para trigo no Brasil (Cunha *et al.*, 2001). Eventuais informações provenientes de outras fontes encontram-se referenciadas no final da frase.

danos causados às lavouras por variáveis meteorológicas que afetam negativamente o rendimento quantitativo e qualitativo de grãos. A cultura tem, assim, o rendimento de grãos e a viabilidade econômica influenciados pelo clima (Cunha *et al.*, 2001).

No zoneamento agrícola da cultura do trigo para o Rio Grande do Sul foram considerados os seguintes riscos climáticos: ocorrência de geadas no período de espigamento (período crítico de 15 dias: 10 dias antes da antese e 5 dias após) e o excesso de precipitação pluvial no período de colheita (estádio de maturação fisiológica e 15 dias após).

O efeito de baixas temperaturas do ar nas plantas de trigo produz resultados diferenciados, dependendo do estágio de desenvolvimento em que ocorrem (Scheeren *et al.*, 2000). Baixas temperaturas do ar no período vegetativo prolongam o ciclo e induzem à formação de maior número de afilhos (Mundstock, 1999). Nos estádios iniciais de desenvolvimento das plantas, somente a ocorrência de geadas severas comprometerá o rendimento de grãos (Scheeren *et al.*, 2000).

A partir da emissão das espigas e do florescimento - período crítico de 30 dias, 20 dias antes da antese e 10 dias após (Cunha, 2006) - o trigo é prejudicado por baixas temperaturas, não tolerando aquelas inferiores a 2 ou 3°C, em função da esterilidade provocada pelo congelamento das estruturas reprodutivas (Mundstock, 1999). Os danos causados às plantas podem ocasionar perdas totais nas lavouras, especialmente no caso de geadas intensas, com temperaturas do ar menores que -2°C registradas em abrigo meteorológico (Scheeren *et al.*, 2000).

No Rio Grande do Sul, em anos nos quais a precipitação pluvial é acima da normal climatológica, o rendimento de grãos de trigo tende a ser afetado negativamente. Em 57% dos anos de ocorrência de El Niño, no Estado, os desvios da média de

rendimento de grãos de trigo foram negativos, enquanto que, considerando os eventos La Niña, 67% deles apresentaram desvios positivos (Cunha, 1999).

Analisando o efeito das variáveis meteorológicas na qualidade industrial e no rendimento de grãos de trigo, nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, no período de 1990 a 1998, Guarienti *et al.* (2003) mostraram que o somatório da precipitação pluvial associou-se negativamente com rendimento de grãos em 50% dos anos analisados. Precipitações pluviais intensas e freqüentes no final da primavera, coincidentes com o enchimento de grãos, maturação e colheita, prejudicam quantitativamente o rendimento de grãos (menores densidades de radiação solar acarretam menores taxas de enchimento dos grãos) e, também, qualitativamente (menor deposição de amido e germinação pré-colheita dos grãos).

A germinação pré-colheita ocorre quando, após a maturação fisiológica, os grãos absorvem água, ativando a enzima alfa-amilase. A ativação desta enzima reduz a qualidade da farinha de trigo (Franceschi *et al.*, 2009). A germinação pré-colheita é responsável pela diminuição do peso do hectolitro e peso de mil grãos, em função da alta respiração e do consumo de carboidratos acumulados nos grãos (Guarienti *et al.*, 2003). O peso do hectolitro corresponde à massa (em kg) de 100 litros de grãos de trigo e é uma das características avaliadas na definição da qualidade dos grãos.

Considerando-se a probabilidade de ocorrência de geadas no florescimento e de excesso de precipitação pluvial na maturação fisiológica foram definidas as épocas de semeadura de trigo no Rio Grande do Sul. No Estado, a semeadura pode ser realizada nos meses de maio, junho e julho (Figura 3). Para semeaduras realizadas em maio, o risco de geada no florescimento é elevado (maior que 20% de freqüência de ocorrência) nas regiões nordeste (Planalto Médio e Campos de Cima da Serra) e sudeste (Campanha). Esse risco diminui quando a semeadura é realizada a partir do final de

maio. O risco de ocorrência de excesso de precipitação pluvial no final do ciclo da cultura e na colheita é maior na metade norte do Rio Grande do Sul, em decorrência dos complexos de meso-escala que provocam precipitações pluviais intensas na primavera.

O período recomendado de semeadura de trigo inicia na porção oeste do Estado (Fronteira Oeste) e termina na região dos Campos de Cima da Serra. A variação da época de semeadura, no sentido oeste-leste, determina que as principais etapas do ciclo da cultura também variem neste sentido.

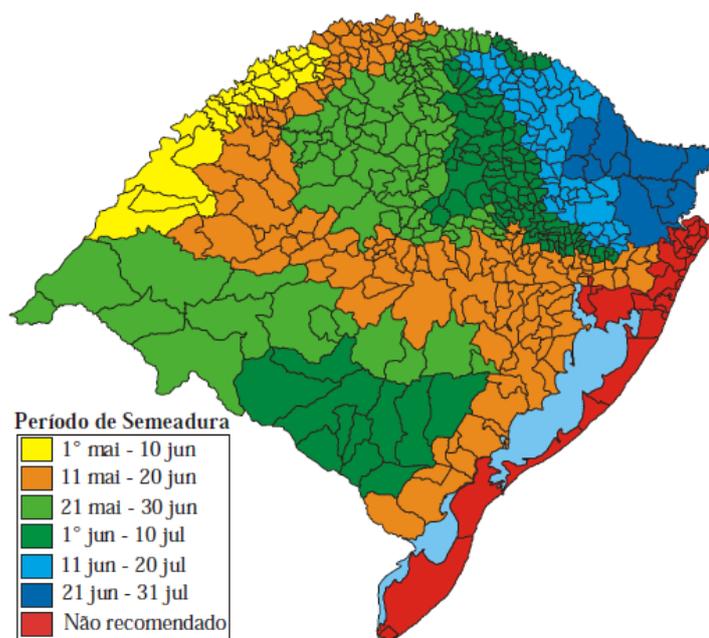


FIGURA 3. Zoneamento agrícola e épocas de semeadura de trigo no Rio Grande do Sul. Fonte: Cunha *et al.* (2001).

2.3 Estimativas de safras agrícolas

Estimativas de safras agrícolas correspondem ao conjunto de estatísticas das variáveis referentes ao setor agropecuário. Área cultivada (ha), rendimento de grãos (kg ha^{-1}) e produção total (t) de determinada cultura, estabelecida em uma área, são as principais informações que compõem as estimativas de safras.

O principal objetivo das estimativas de safras é acompanhar o desenvolvimento das culturas agrícolas de maior importância econômica e social, gerando informações que serão empregadas, por exemplo, na definição de políticas públicas, na formação de preços e na logística de transportes (Assad *et al.*, 2007). Dessa maneira, as estimativas de safras são fundamentais para segurança alimentar do País, bem como para o planejamento estratégico de empresas públicas (instituições de pesquisa, de assistência técnica, de crédito rural) ou privadas (cooperativas agrícolas, transportadoras, redes de supermercados) (Assad *et al.*, 2007).

2.3.1 Estimativas oficiais*

No Brasil, as estimativas oficiais de safras agrícolas são de competência do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), órgão do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão.

O IBGE disponibiliza informações referentes à produção vegetal através do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA), divulgado mensalmente, da Produção Agrícola Municipal (PAM) e da Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS), ambos de divulgação anual.

A cada ano, a Produção Agrícola Municipal fornece informações sobre área, rendimento médio, produção e valor da produção para 29 produtos agrícolas de culturas temporárias e 33 de culturas permanentes, em âmbito de municípios, microrregiões, mesorregiões, estados, grandes regiões e País. A coleta destas informações é realizada por técnicos do IBGE, mediante a aplicação de questionários. As estimativas resultam de contatos que os agentes mantêm com técnicos do setor agrícola e do conhecimento que possuem sobre as atividades agrícolas do município onde atuam. Às informações

* As informações deste item foram obtidas da série Relatórios Metodológicos - Pesquisas Agropecuárias, disponível no endereço eletrônico do IBGE. Eventuais informações provenientes de outras fontes encontram-se referenciadas no final da frase.

coletadas através de questionários são acrescidas aquelas ditas complementares: meteorológicas, incidência de pragas e doenças, financiamentos concedidos e demanda de insumos (sementes fiscalizadas, corretivos, fertilizantes).

O Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, por sua vez, tem como objetivo principal acompanhar a evolução de curto prazo da economia. O mecanismo de coleta de dados do LSPA também é fundamentado na aplicação de questionários, pela rede de coleta do IBGE, aos responsáveis técnicos de entidades públicas e privadas. As estimativas são divulgadas sob forma de publicação mensal contendo os dados de área, produção e rendimento médio de 35 cultivos agrícolas temporários e permanentes. Os dados do LSPA referentes aos meses anteriores ao vigente podem ser obtidos no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA).

O SIDRA é um banco de dados agregados que armazena as informações colhidas nas pesquisas realizadas pelo IBGE. Um dado agregado é obtido através do somatório dos valores contidos em questionários, respondidos pelos informantes da pesquisa, e está associado a um determinado nível territorial, tempo e, muitas vezes, a um conjunto de dados que o classifica ou qualifica. O SIDRA disponibiliza informações sobre agricultura, pecuária, horticultura, extração vegetal, silvicultura, previsão de safras, comércio, indústria, construção civil, empregos, orçamento familiar, população, preços, registros civis, entre outros setores.

A divulgação de estimativas de safras oficiais é de competência do IBGE. Outras instituições, porém, também disponibilizam estatísticas referentes ao setor agrícola, a exemplo da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), empresa pública vinculada ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. As estimativas disponibilizadas pela Conab têm caráter distinto das do IBGE, pois, como cabe à

companhia o gerenciamento de estoques e o estabelecimento de políticas de preços, as informações requerem maior agilidade de obtenção e divulgação.

É importante salientar que o trabalho da Conab é realizado em colaboração com o do IBGE. Nesse sentido, compete ao Grupo de Coordenação de Estatísticas Agropecuárias (GCEA) examinar dados estatísticos registrados por diferentes fontes, para promover a harmonização das estimativas de safras das principais culturas agrícolas brasileiras. Criado em 1973, o GCEA é um colegiado técnico formado por representantes de órgãos produtores e usuários de estatísticas agropecuárias, públicos ou privados, com atuação em escala federal, estadual ou municipal.

2.3.2 Acompanhamento do ciclo*

As principais etapas do ciclo das culturas podem ser acompanhadas, por exemplo, através de calendários agrícolas, tais como os elaborados pela Associação Riograndense de Empreendimentos de Assistência Técnica de Extensão Rural - EMATER/RS.

A EMATER/RS realiza, sistematicamente, pesquisas quinzenais a respeito da evolução dos cultivos de arroz irrigado, milho, feijão, soja e trigo. Essas pesquisas atingem 70 a 80% da área cultivada e seus resultados são referência para estimativas de safras no Estado.

A pesquisa é realizada através da coleta de informações acerca da situação dos cultivos, nos municípios, pelos técnicos da EMATER/RS. As informações, tais como expectativas de área cultivada, rendimento de grãos e eventuais perdas associadas à ocorrência de eventos meteorológicos ou pragas e doenças são, posteriormente, comparadas às obtidas por técnicos de outras instituições relacionadas ao setor agrícola.

* As informações deste item são de UHLIG JR., C.W. e BARBOSA, R.M. (EMATER/RS, Escritório Regional de Porto Alegre – Porto Alegre, Rio Grande do Sul). Comunicação pessoal, 2010.

As informações municipais são repassadas ao escritório central da EMATER/RS, que analisa os dados e calcula a média para o conjunto dos municípios (regionais). O resultando desta etapa são informações em escala regional e estadual. A disponibilização dos dados ocorre por meio do Informativo Conjuntural, documento semanal que pode ser obtido no endereço eletrônico da EMATER/RS.

A pesquisa realizada pela EMATER/RS não opera com níveis de significância e margens de erro controladas, de modo que seus resultados, embora possam ser utilizados como valores de referência, não constituem informações de caráter oficial.

2.3.3 Estimativas com sensoriamento remoto

No Brasil, a coleta de informações para geração das estimativas oficiais de safras agrícolas utiliza definições e classificações adotadas internacionalmente (IBGE, 2002). A aplicação de questionários, porém, é uma tarefa trabalhosa e os dados coletados são, de certo modo, subjetivos (Liu, 2006a). Além disso, a metodologia não permite avaliar eventuais erros de declaração ou localizar espacialmente as lavouras, talhões ou pomares. A grande extensão territorial brasileira e a dinâmica espaço-temporal da atividade agrícola dificultam a obtenção de informações precisas e confiáveis sobre esse setor da economia (Rizzi & Rudorff, 2005).

Informações coletadas por sensoriamento remoto podem contribuir para obtenção de dados de forma mais rápida, precisa e com menor custo, comparativamente àquelas geradas pelas técnicas tradicionalmente empregadas em estimativas de safras (Pino, 2001).

Sensoriamento remoto pode ser definido como a arte e a ciência de aquisição de dados acerca de objetos existentes na superfície terrestre, sem que haja contato físico entre o sensor e o objeto (Janssen, 2001; Meneses, 2001). O sensoriamento remoto

refere-se à utilização conjunta de sensores e equipamentos para aquisição, processamento e análise da energia eletromagnética, refletida ou emitida, pelos alvos existentes na superfície terrestre (Janssen, 2001).

As imagens de satélite têm surgido como uma importante e promissora fonte de dados para estimativas de área cultivada e rendimento de grãos, em função de gerarem informações objetivas a respeito das culturas agrícolas, com adequada caracterização espacial e temporal (Bazzgeer *et al.*, 2006).

As técnicas de processamento de imagens para quantificação da área cultivada baseiam-se no comportamento espectral distinto da cultura de interesse, em relação aos demais alvos (Rizzi e Rudorff, 2005; Weber *et al.*, 2005, Wagner *et al.*, 2007). A classificação de imagens, por exemplo, identifica e quantifica as áreas agrícolas, localizando-as espacialmente, o que otimiza uma eventual aferição no campo ou estimativas em anos subsequentes (Rizzi, 2004).

As informações espectrais podem ser relacionadas às características ambientais, ao ciclo das culturas (estádio fenológico) e ao rendimento de grãos (Bazgeer *et al.*, 2006). As estimativas de rendimento de grãos podem ser obtidas, por exemplo, através da incorporação de informações espectrais aos modelos agrometeorológicos. Em modelos agrometeorológicos-espectrais, o componente agrometeorológico expressa a disponibilidade hídrica, a quantidade de radiação solar incidente, a temperatura e a umidade do ar, enquanto que, o componente espectral expressa as diferenças em termos de práticas de manejo e a ocorrência de estresses não incluídos no modelo agrometeorológico (Rudorff e Batista, 1990).

No Brasil, o emprego de imagens de satélite em levantamentos de áreas cultivadas e em estimativas de rendimento tem ocorrido em trabalhos experimentais, no âmbito de pesquisas acadêmicas (Figueiredo, 2007). Embora desenvolvidos em áreas

piloto e abrangendo pequenas regiões, as pesquisas demonstraram a potencialidade de uso de imagens de satélite em escalas maiores (Figueiredo, 2007). Desde 2004, a Conab vem promovendo pesquisas que, empregando informações obtidas por sensores remotos orbitais, contribuam para o aperfeiçoamento do sistema de previsão de safras no Brasil (Projeto GeoSafras) (Figueiredo, 2007).

É importante salientar que o uso de imagens de satélite, em sistemas de previsão de safras, não objetiva substituir a metodologia oficial e sim promover o uso conjunto das informações. Os dados coletados nos municípios, junto a técnicos e representantes de entidades públicas e privadas ligadas ao setor agrícola, são fundamentais para verificação de erros, comparação de resultados e aprimoramento de ambas metodologias (Mota, 2002).

2.4 Modelos de estimativa de rendimento de grãos

2.4.1 Aspectos gerais

Modelos são representações simplificadas das propriedades de um sistema, que visam gerar informações que contribuam para uma melhor compreensão e caracterização deste sistema (Thornley, 2006). De acordo com Thornley (2006) modelos são construídos para descrever ou resumir informações, integrar conhecimentos ou fazer predições. Modelos empíricos (modelos estatísticos ou de correlação) descrevem um conjunto de dados através de equações (por exemplo, regressões lineares). Modelos determinísticos empregam informações científicas para resumir os conhecimentos de determinada área. O modelo determinístico descreve o crescimento vegetal através do conhecimento dos processos fisiológicos e morfológicos. O modelo empírico, por sua vez, descreve o crescimento vegetal com base em dados provenientes de observações (Dourado-Neto *et al.*, 1998). Assim, os resultados obtidos por modelos empíricos são

considerados válidos somente para o conjunto de dados empregados na construção do modelo (Bouman *et al.*,1996).

Independentemente do tipo de modelo, os objetivos deste devem ser sempre previamente definidos pelo modelador. O ajuste de modelos visa produzir ferramentas que podem ser empregadas para testar ou produzir novas hipóteses, para sugerir experimentos ou para prever o comportamento de um sistema em situações variadas (Dourado-Neto *et al.*, 1998). Após serem definidos os objetivos, as etapas de construção de um modelo empírico são: (1) avaliação dos dados e composição das equações (estabelecimento das relações entre as variáveis e determinação de coeficientes do modelo), (2) ajuste de parâmetros (com base em dados históricos ou experimentais) e (3) validação (verificação da acurácia do modelo através da utilização de dados distintos, ou seja, de dados não empregados na construção do próprio modelo). É importante salientar que a realização de uma quarta etapa, de simplificação, pode ser necessária para a aplicabilidade de alguns modelos.

Historicamente, a evolução dos modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas foi definida em quatro fases (Bouman *et al.*, 1996; Hoogenboom, 2000) (Figura 4):

Fase 1: a temperatura do ar e a radiação solar são os dados de entrada dos modelos. Nesta fase, os modelos consideram que o rendimento potencial das culturas é determinado pelas características genéticas e pelos elementos meteorológicos citados.

Fase 2: a precipitação pluvial e as doses de irrigação são acrescentados aos dados de entrada dos modelos.

Fase 3: teor de nitrogênio presente no solo ou na planta são dados incorporados aos modelos. Nas fases 2 e 3, os modelos passam a considerar que alterações no

crescimento e desenvolvimento das plantas são causadas por limitações, sejam elas de água ou nutrientes (rendimento reduzido).

Fase 4: os modelos passam a considerar outros minerais presentes no solo e a ocorrência de pragas, doenças e plantas daninhas. Nessa fase, o modelo simula uma completa interação solo-planta-atmosfera. O rendimento final obtido em uma lavoura corresponde, assim, ao rendimento reduzido (fases 2 e 3) e atenuado pela ocorrência de pragas e doenças. Na simulação de ocorrência de pragas e doenças, variáveis meteorológicas adicionais, tais como umidade relativa do ar e período de molhamento foliar, são acrescentadas aos modelos.

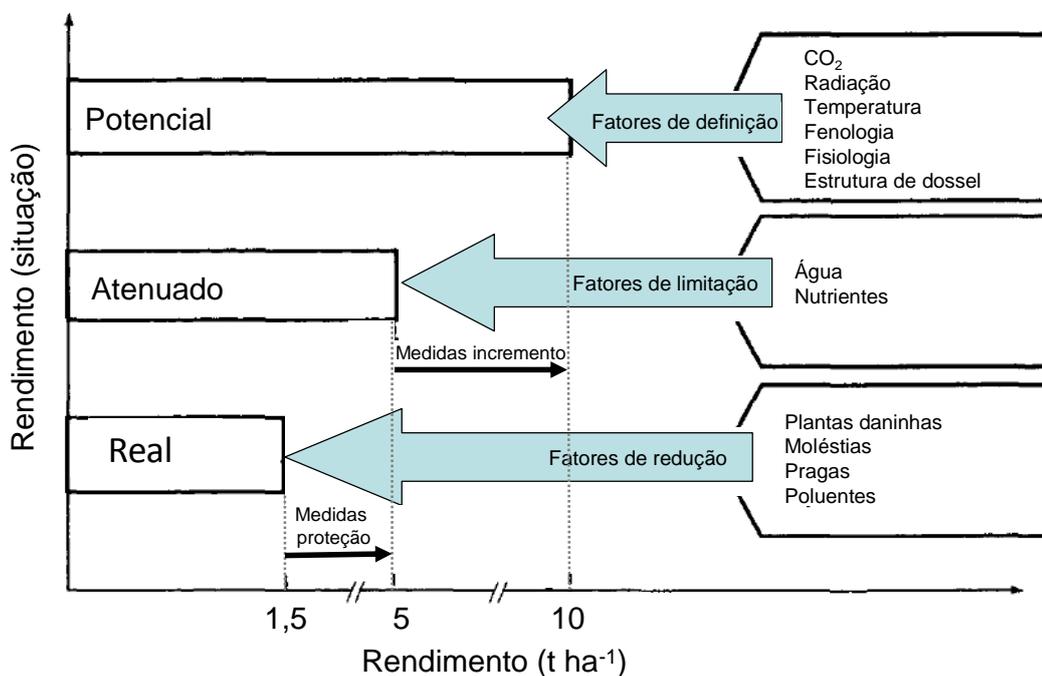


FIGURA 4. Relações entre rendimentos potencial, atenuado e real. Fonte: adaptado de Bouman *et al.* (1996).

O ajuste de modelos pode considerar cada uma das situações apresentadas, de acordo com os objetivos da pesquisa. De acordo com Hoogenboom (2000), a maioria dos modelos pertence à fase três (ex. APSIM - *Agricultural Production System Simulator*, DSSAT - *Decision Support System for Agrotechnology*) e poucos são os modelos que operam no nível 4 de complexidade.

Na agricultura, modelos são importantes para prever o resultado de um sistema de cultivo estabelecido em uma determinada condição ambiental (Dourado Neto *et al.*, 1998). Em sistemas de previsão de safras, o principal objetivo da modelagem é estimar o rendimento de culturas agrícolas através de informações coletadas ao longo do ciclo de desenvolvimento. Modelos agrometeorológicos e agrometeorológicos-espectrais são exemplos de modelos empregados em estimativas de safras agrícolas. Em 1975 foi introduzido, em modelagem de rendimento, o termo tendência tecnológica. Este termo se refere às novas tecnologias, tais como variedades e/ou sistemas de manejo. A inclusão deste termo, em modelos de estimativa de rendimento de grãos, pode melhorar a sensibilidade das variáveis meteorológicas porque retira o aumento no rendimento de grãos decorrente de novas tecnologias e não de variações das condições meteorológicas (Braga, 1995).

2.4.2 Modelos agrometeorológicos e espectrais

Para espécies de interesse agrícola, as interações com o clima e o solo são fundamentais na determinação da capacidade de adaptação a um determinado local, na manifestação de fases fenológicas e no rendimento final de grãos. Mesmo em ambientes em que a cultura está adaptada, a variabilidade de crescimento e desenvolvimento das plantas está, basicamente, relacionada às variações das condições meteorológicas. Assim, pode-se considerar que a construção de modelos agrometeorológicos busca analisar os efeitos da variabilidade climática sobre a produção vegetal (Braga, 1995).

De acordo com Hoogenboom (2000) as variáveis meteorológicas de maior relação com a produção agrícola são a precipitação pluvial, a temperatura do ar e a radiação solar.

A radiação solar está relacionada à atividade fotossintética das plantas, afetando o acúmulo de biomassa e a partição de fotoassimilados aos grãos. A temperatura do ar

define as taxa de desenvolvimento das plantas. A ocorrência de períodos de estiagem ou de excesso de precipitação pluvial também afeta a produção vegetal. Em condições de deficiência hídrica, as taxas de crescimento diminuem, dada a redução da assimilação de carbono decorrente do fechamento de estômatos. O excesso de precipitação pluvial reduz a atividade radicular quando da falta de oxigênio no solo (Hoogenboom, 2000) e, indiretamente, provoca redução da quantidade de radiação solar disponível para fotossíntese.

Estimativas baseadas em dados agrometeorológicos fundamentam-se na relação estatística entre variáveis dependentes que deverão ser estimadas (como rendimento de grãos e datas de floração ou maturação) e variáveis meteorológicas independentes (como precipitação pluvial, temperatura do ar e radiação solar) ou variáveis reduzidas (ou derivadas), tais como: índices de umidade do solo, de dano por precipitação pluvial ou por geadas. De acordo com Braga (1995), o uso de funções polinomiais tornou-se um padrão para descrição da resposta das culturas a variáveis agrometeorológicas. O autor salienta, porém, que, embora esta técnica garanta elevados coeficientes de determinação (R^2), é importante lembrar que, muitas vezes, os parâmetros das estimativas polinomiais podem não possuir significado biológico.

Dados da estação meteorológica de São Luiz Gonzaga, no período de 1986 a 1995, foram empregados por Mota (1998), para determinação dos seguintes indicadores agrometeorológicos (e coeficientes de correlação) do rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul: duração do período de molhamento foliar em outubro ($r = - 0,92$), insolação total no mês de setembro ($r = 0,93$), índice de dano por geadas no mês de setembro ($r = - 0,89$) e número de dias com precipitação pluvial em novembro ($r = 0,86$). O rendimento de grãos do trigo foi estimado através da equação:

$$Y=630,93-3,73x_1+6,75x_2-162,63x_3+56,05x_4 \quad (1)$$

Na qual x_1 é a duração do período de molhamento foliar em outubro, x_2 é a insolação total de setembro, x_3 é o índice de dano por geadas em setembro e x_4 é o número de dias com precipitação pluvial em novembro.

Na estimativa do rendimento de grãos de trigo, o maior erro apresentado pelo modelo foi de 11%. No entanto, ressalta-se que o ajuste foi realizado com dados de uma única estação meteorológica, visando estimar o rendimento médio de grãos de trigo estadual. O coeficiente de correlação, entre rendimento de grãos e número de dias com precipitação pluvial em novembro, foi positivo, e não negativo, como seria o esperado. O maior número de dias indicaria uma melhor distribuição temporal da precipitação pluvial, com chuvas de menor intensidade, que, conseqüentemente, provocariam menos danos às plantas por ocasião da maturação fisiológica e da colheita (Mota, 1998).

Para região do pampa argentino, modelo agrometeorológico de estimativa de rendimento de grãos de trigo foi proposto por Scian (2004), empregando as seguintes variáveis: temperatura mínima do ar (média mensal) de agosto (afilhamento) e novembro (florescimento e início do enchimento de grãos), a temperatura máxima do ar de outubro (alongamento do colmo) e a precipitação pluvial de agosto e novembro. Segundo o autor, o rendimento de grãos de trigo na região possui correlação negativa com as temperaturas mínimas e máximas do ar e positiva com a precipitação pluvial. O modelo apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,98 e erro médio de 90 kg ha⁻¹.

Modelos que utilizam elementos meteorológicos são denominados modelos agrometeorológicos, enquanto que os que utilizam dados obtidos por sensores remotos (orbitais ou de superfície) são comumente denominados modelos espectrais. O uso integrado destes dois componentes gera os modelos agrometeorológicos-espectrais. Em modelos agrometeorológicos-espectrais, o termo espectral pode ser representado, por

exemplo, pelos índices de vegetação. Índices de vegetação são medidas radiométricas da biomassa presente na área imageada e estão altamente correlacionados à atividade fotossintética de folhas verdes (Labus *et al.* 2002).

Xavier *et al.* (2005) empregaram os índices de vegetação SR (do inglês, *Simple Ratio*), NDVI e SAVI (do inglês, *Soil Adjusted Vegetation Index*) no ajuste de modelos de estimativa de rendimento de grãos de trigo. Os índices foram obtidos a partir de dados espectrais coletados com espectroradiômetro em cinco estádios de desenvolvimento da cultura. Os modelos que apresentaram os maiores coeficientes de determinação (R^2) foram os que empregaram os índices de vegetação SR e SAVI referentes ao estágio de espigamento. Os autores concluíram que todos os índices avaliados apresentaram menor capacidade de estimativa do rendimento de grãos de trigo nos estádios de afilhamento e maturação fisiológica. De acordo com Raun *et al.* (2001), a relação do NDVI com o rendimento final de grãos se deteriora rapidamente com a maturação fisiológica da cultura, de maneira que, em estimativas de rendimento de grãos, valores de NDVI coletados no final do crescimento vegetativo são mais adequados (Labus *et al.*, 2002).

Labus *et al.* (2002) estimaram o rendimento de grãos de trigo através de modelo espectral, em que os valores de NDVI foram provenientes de imagens do sensor AVHRR (do inglês, *Advanced Very High Resolution Radiometer*). Os maiores coeficientes de determinação (R^2) foram obtidos pelos modelos que empregaram a integração do NDVI na estação de crescimento aparente (0,74) ou soma dos valores do índice até agosto (0,75), mês de início do enchimento de grãos. Resultado semelhante foi encontrado por Sebem (2005), em estudo realizado na Espanha, com valores de NDVI obtidos a partir de imagens do satélite Landsat, sensor TM (*Thematic Mapper*). O maior coeficiente de determinação (0,74) foi obtido pelo modelo que empregou a

integração dos valores do índice, ao longo do período de crescimento aparente da cultura do trigo.

No Brasil, a integração dos valores de NDVI do emborrachamento à senescência foi empregada em ajuste de modelo espectral de estimativa de rendimento de grãos por Rudolf e Batista (1990). O coeficiente de determinação (R^2) do modelo foi de 0,92, com erro médio de 208 kg ha⁻¹.

Na Índia, Singh *et al.* (2006) propuseram um modelo espectral de estimativa de rendimento de grãos de trigo empregando os índices de vegetação SR e PVI (do inglês, *Perpendicular Vegetation Index*) referentes à etapa em que a cultura se encontrava com o máximo índice de área foliar (IAF). O modelo apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,93.

Bazzgeer *et al.* (2006) ajustaram modelos de estimativa de rendimento de grãos de trigo para dois distritos indianos. Foram ajustados modelos agrometeorológicos, agrometeorológicos-espectrais e agrometeorológicos-espectrais com inclusão da tendência tecnológica. O NDVI foi obtido a partir das informações coletadas pelo satélite IRS (*Indian Remote Sensing*), sensor LISS-III (*Linear Imaging Self Scanners*). Os valores de NDVI empregados no ajuste dos modelos foram referentes à etapa do ciclo em que a cultura apresentou a máxima área foliar. As variáveis agrometeorológicas corresponderam à temperatura do ar (máxima e mínima), unidades heliotermiais e evapotranspiração. Os coeficientes de determinação (R^2) dos modelos foram: 0,61 (modelo agrometeorológico), 0,80 (agrometeorológico-espectral) e 0,96 (agrometeorológico-espectral com tendência tecnológica). Os erros dos modelos situaram-se entre 5,6 e 16% do rendimento de grãos oficial (modelo agrometeorológico), entre -7,1 e -9,7% (modelo agrometeorológico-espectral) e de -0,6 a -1,2% para o modelo agrometeorológico-espectral com tendência tecnológica. Os

resultados mostraram que a inclusão do termo espectral melhorou as estimativas dos modelos. Com a incorporação do termo tendência, os resultados do modelo foram melhores, pois foram consideradas novas tecnologias, melhorias em fertilização e no controle de pragas e doenças.

Modelos agrometeorológicos-espectrais foram propostos para estimativa de rendimento de grãos de arroz (Klering, 2007), soja (Rizzi, 2004; Melo *et.al.*, 2008) e cereais de estação fria (Junges e Fontana, 2011), no Rio Grande do Sul, e de grãos de café, em Minas Gerais (Rosa, 2007) e de cana-de-açúcar, em São Paulo (Ruddorf & Batista, 1990).

No Rio Grande do Sul, modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento de grãos para cereais de estação fria foram propostos empregando valores de NDVI, obtidos de imagens do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), integrados de junho a outubro. As variáveis agrometeorológicas corresponderam ao índice de geada de setembro, precipitação pluvial de outubro e graus-dia, acumulados de maio a outubro (Tabela 2) (Junges e Fontana, 2011). O ajuste dos modelos foi baseado na penalização do NDVI quando da ocorrência de elementos meteorológicos adversos ao desenvolvimento das plantas. Os modelos apresentaram erros (diferença entre rendimento oficial e estimado) inferiores a 15% (Tabela 2).

TABELA 2. Resultados do ajuste dos modelos de estimativa de rendimento de grãos de trigo para região de abrangência da Cooperativa Cotrijal (13 municípios localizados ao norte do Rio Grande do Sul). Fonte: Junges e Fontana (2011).

		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
		RENDIMENTOS (kg ha ⁻¹)						
M1 ¹	IBGE	1.628	2.229	1.645	2.374	1.946	1.671	1.607
	Modelo	1.654	1.954	1.764	2.427	2.023	1.654	1.624
	Diferença (%) ³	-1,57	12,32	-7,23	-2,25	-3,96	1,00	-1,01
	Equação	$y = -10265 + (12,30 * NDVI) - (4,44 * IG) + (1,07 * PREC)$						
	Estatísticas	$R^2 = 0,83$		R^2 ajustado = 0,67		Erro padrão = 182,08		
M2 ²	Modelo	1.621	2.231	1.651	2.370	1.951	1.670	1.606
	Diferença (%)	0,47	-0,09	-0,35	0,18	-0,29	0,01	0,08
	Equação	$y = -18929 + (5,94 * NDVI) - (0,41 * IG) - (1,24 * PREC) + (5,73 * GD)$						
	Estatísticas	$R^2 = 0,99$		R^2 ajustado = 0,99		Erro padrão = 8,58		

¹M1: NDVI, IG (setembro), precipitação pluvial (outubro);

²M2: NDVI, IG (setembro), precipitação pluvial (outubro) e graus-dia (maio a outubro).

³Diferença (%) = rendimento de grãos oficial – rendimento de grão estimado

2.4.3 Informações espectrais

Informações coletadas por sensores remotos orbitais e de superfície têm sido empregadas em estudos acerca do comportamento da vegetação. Para isso, é necessário, primeiramente, estabelecer as relações entre os parâmetros radiométricos, contidos em produtos de sensoriamento remoto, e os parâmetros biofísicos da vegetação. Estas relações têm sido estabelecidas através de índices de vegetação (Epiphanyo *et al.*, 1996). A maior parte dos índices de vegetação relaciona a reflectância nas faixas de comprimento de onda do vermelho e infravermelho próximo na forma de razões, para minimizar a variabilidade causada por fatores externos (ângulo solar, atmosfera e solo) (Ponzoni, 2001).

A vegetação se caracteriza pela baixa reflectância (máximo 10%) nos comprimentos de onda da luz visível (400 a 700 nm), especialmente azul e vermelho (Figura 5). Nessas faixas de comprimento de onda, a radiação é fortemente absorvida

pelos pigmentos presentes nas folhas (clorofila, xantofilas e carotenóides), dando início ao processo fotossintético.

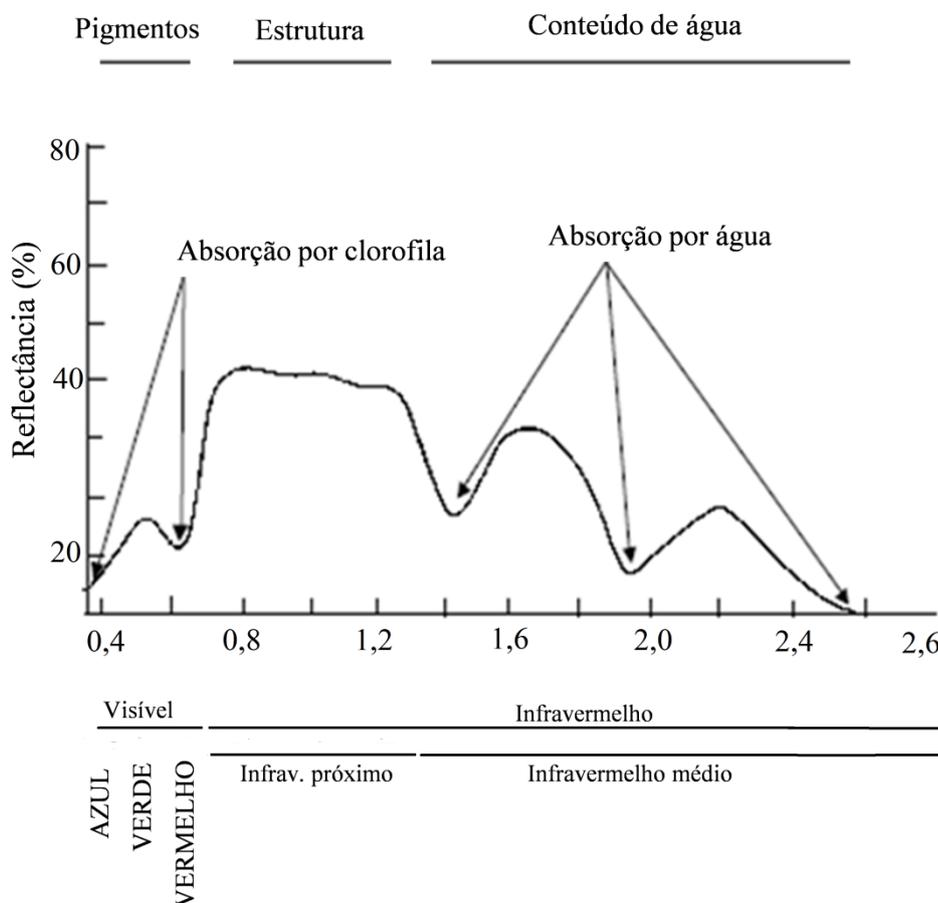


FIGURA 5. Curva de reflectância da vegetação verde. Fonte: adaptado de Sugawara (2001).

Na faixa de comprimento de onda do infravermelho próximo (700 a 1300 nm), a reflectância da vegetação é maior (40%), comparativamente à reflectância do visível, em função da estrutura interna da folha (mesófilo). Os diferentes valores de índice de refração das células da parede celular (com grande quantidade de água) e dos espaços intercelulares (com ar), na folha, fazem com que a radiação incidente seja refletida (Knipling, 1970). A não absorção da radiação nos comprimentos de onda do infravermelho próximo é uma forma de proteção da folha, pois esses comprimentos de

onda não são desencadeadores da fotossíntese. Assim, evita-se que o aumento da temperatura da folha cause danos ao aparato fotossintético.

Nos comprimentos de onda do vermelho a reflectância da vegetação apresenta relação inversa e não linear com a biomassa verde e, nos comprimentos de onda do infravermelho próximo, a relação é direta e não linear (Ponzoni, 2001).

O índice de vegetação, resultante da combinação dos valores de reflectância em dois ou mais intervalos de comprimento de onda, possui relação com a quantidade e o estado da vegetação em uma determinada área da superfície terrestre. Em função disto, uma característica inerente aos índices de vegetação é a redução no volume dos dados a ser analisado, pois praticamente toda informação referente à vegetação fica resumida a somente um valor numérico. Ou seja, a informação registrada em algumas bandas espectrais (geralmente duas) passa a ser contida em apenas um índice, facilitando a inserção em modelos agrometeorológicos-espectrais (Rizzi, 2004).

Além da inserção em modelos de estimativa de rendimento de grãos, índices de vegetação constituem um método não destrutivo de estimativa da biomassa. Assim, podem vir a substituir as estimativas de biomassa realizadas a partir de coletas de plantas, que são destrutivas, demandam tempo e, muitas vezes, não são compatíveis com a rotina dos experimentos (Aparicio *et al.*, 2000).

Um dos índices mais empregados em estudos acerca da vegetação é o NDVI. O freqüente uso do NDVI em estudos acerca da vegetação deve-se à construção de bases de dados globais, fundamentadas nos dados do sensor AVHRR (do inglês *Advanced Very High Resolution Radiometer*) do satélite NOAA (do inglês, *National Oceanic and Atmospheric Administration*) (Ponzoni, 2001). Além disso, o NDVI é um índice que apresenta simplicidade de cálculo e sensibilidade na detecção de alterações na

vegetação, sendo medianamente sensível a influências do solo e da atmosfera (Rizzi, 2004).

O NDVI é dado pela equação:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{V}}}{\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{V}}} \quad (2)$$

Na qual ρ_{IVP} é a reflectância no infravermelho próximo e ρ_{V} é a reflectância no vermelho.

A análise da curva de reflectância da vegetação (Figura 5) permite verificar que o NDVI é uma medida da diferença, em termos de porcentagem de radiação refletida, existente entre o vermelho (V) e o infravermelho próximo (IVP). Assim, maiores valores de NDVI significam uma maior quantidade de biomassa verde, tendo em vista a maior absorção do vermelho, pelas clorofilas, e uma maior reflectância no infravermelho próximo, decorrente de mesófilos desenvolvidos (folhas adultas) e/ou de maior número de camadas de folhas (dossel cobrindo o solo).

O NDVI, assim como os demais índices de vegetação, serve como indicador do crescimento da vegetação, podendo ser empregado na determinação de variáveis biofísicas com as quais apresenta correlação, tais como índice de área foliar (IAF), biomassa, atividade fotossintética e rendimento de grãos (Ponzoni, 2001). No entanto, o emprego do NDVI na determinação destas variáveis deve levar em consideração as limitações existentes. Neste sentido, a reflectância no vermelho e no infravermelho próximo sofre influência do solo, da atmosfera e dos ângulos solar e de visada, e os valores do índice apresentam problemas de saturação.

Em dosséis vegetais, quando o IAF atinge valores entre 2 e 3, a maior parte da radiação incidente é absorvida e os valores de reflectância no vermelho são baixos (próximos de zero porém não nulos). Nesta condição, um conseguinte aumento da área foliar não influenciará a reflectância da vegetação, especialmente no vermelho,

caracterizando a saturação do índice (Ponzoni, 2001). De acordo com Liu (2006b), vegetações que atingiram o crescimento vegetativo máximo apresentam valores de reflectância de 5% no vermelho e 55% no infravermelho próximo, de maneira que o máximo valor de NDVI seria de 0,83. Assim, tanto na região do visível, quanto na do infravermelho próximo, a reflectância da vegetação não apresenta relação linear com os parâmetros biofísicos, tais como biomassa e IAF, mas comportamento assintótico (Ponzoni, 2001). Este comportamento pode limitar o monitoramento das culturas a partir do ponto de saturação do NDVI (Rizzi, 2004). Aparicio *et al.* (2000) verificaram que, quando o IAF do trigo duro foi superior a 3, não houve incremento nos valores de NDVI, sugerindo saturação do índice.

Além da saturação do NDVI, é importante salientar que, nos estádios iniciais de desenvolvimento das culturas agrícolas, quando o dossel não cobre totalmente o solo, a energia captada pelos sensores sofre influência da superfície de fundo, ou seja, do solo e dos resíduos culturais. Analisando os valores de NDVI, medidos com sensor óptico ativo, em amostras de solo com e sem a presença de resíduos de soja e milho, Grohs (2008) encontrou maiores valores de NDVI em condições de solo exposto (sem resíduos). Na comparação entre resíduos, os valores de NDVI foram superiores no tratamento soja, resultado atribuído à constituição do resíduo (estruturas de menor dimensão e maior conteúdo de celulose), que absorve a radiação, especialmente da região do vermelho, acarretando maiores valores de NDVI (Grohs, 2008).

O NDVI é obtido através de fórmula que normaliza os dados, com o objetivo de diminuir os efeitos decorrentes dos ângulos solar e de visada e das condições atmosféricas (Ponzoni, 2001). Nesse sentido, sabe-se que os constituintes atmosféricos reduzem a diferença de reflectância entre os comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo. Os comprimentos de onda do vermelho são particularmente

espalhados por partículas presentes na atmosfera (aerossóis), enquanto que os comprimentos de onda do infravermelho próximo são absorvidos pelo vapor d'água presente na atmosfera. No caso das imagens do sensor MODIS, a implementação de novos algoritmos de processamento (coleção 5) melhorou a qualidade das mesmas no que diz respeito à correção atmosférica (Yi *et al.*, 2008).

Estudos que relacionam o NDVI com o desenvolvimento da planta de trigo demonstraram que os valores são próximos de 0,5 no início do ciclo e crescentes até atingirem o máximo e se estabilizarem em torno de 0,8 a 0,9 (Hamada, 2001; Epiphanyo *et al.*, 1996). Esta estabilização, que pode ser entendida como o máximo acúmulo de biomassa na parte aérea, ocorre já a partir do alongamento do colmo. Com a maturação fisiológica, já na etapa final do ciclo, os valores voltam a decrescer em função da senescência foliar e da translocação de nutrientes para o grão (Figura 6).

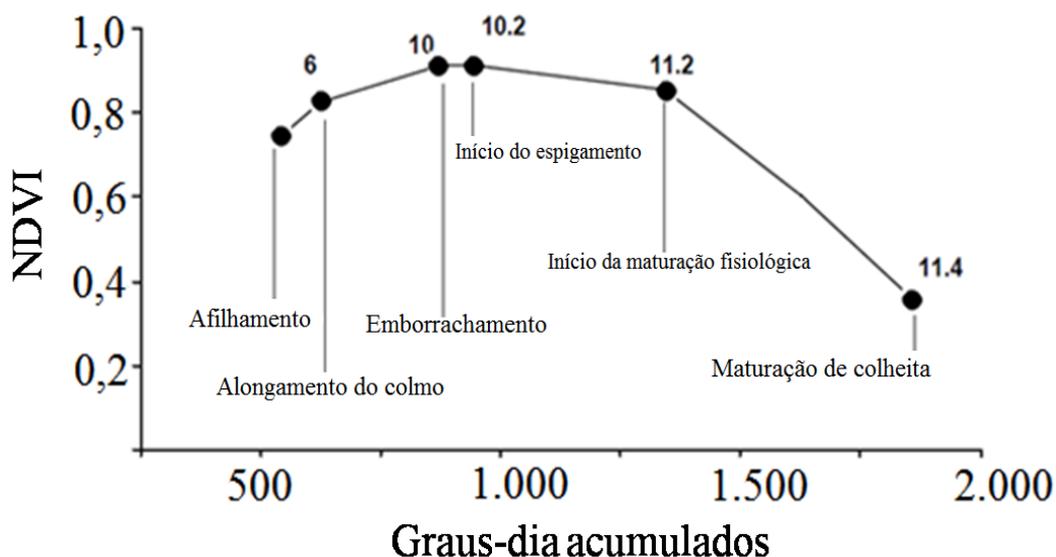


FIGURA 6. Valores de NDVI obtidos a partir de medições com espectrorradiômetro, nos estádios de afilhamento, emborrachamento, espigamento e maturação, em função de graus-dia acumulados ao longo do ciclo da cultura do trigo. Fonte: adaptado de Hamada e Pinto (2001).

No Rio Grande do Sul, correlações entre os rendimentos de grãos de trigo e os valores mensais de NDVI foram de 0,40 em julho e 0,60 em agosto, período de crescimento vegetativo máximo e início de florescimento da cultura (Junges e Fontana, 2011). A maior correlação foi encontrada com valores integrados de NDVI (junho a outubro) e não com valores mensais (Junges e Fontana, 2011). Estes resultados corroboram com Raun *et al.* (2001), que afirmam que as melhores relações com rendimento de grãos são obtidas não com valores únicos de NDVI, mas com soma ou integração.

Observações sequências de NDVI geram perfis temporais que representam o desenvolvimento da cultura desde a emergência até a maturação e senescência. Os perfis temporais de NDVI permitem o monitoramento do ciclo de desenvolvimento das culturas agrícolas e o estabelecimento de relações com o rendimento de grãos (Labus *et al.*, 2002). Em análise regional no Rio Grande do Sul, os perfis temporais de NDVI/MODIS, de anos com rendimentos de grãos de trigo inferiores a 1.800 kg ha⁻¹, caracterizaram-se pelo rápido aumento ou decréscimo nos valores de NDVI ou baixos valores do índice de vegetação (não superior a 0,7), ao longo de todo perfil. Por sua vez, anos de rendimentos de grãos superiores a 1.800 kg ha⁻¹ caracterizaram-se pela manutenção dos valores máximos de NDVI por maiores períodos (Junges e Fontana, 2011).

O NDVI pode ser calculado a partir das faixas de comprimentos de onda (bandas) de sensores orbitais ou de superfície. No caso do sensor MODIS, a bordo da plataforma EOS (*Earth Observation System*), imagens de índice de vegetação são disponibilizadas na forma de produto pronto (MOD13Q1). Neste produto, constam as imagens dos índices de vegetação NDVI e EVI (*Enhanced Vegetation Index*) (Klering, 2007).

De acordo com Huete *et al.* (2002), as imagens NDVI e EVI do sensor MODIS podem ser empregadas no monitoramento de diferentes tipos de vegetação. O EVI é tido como um índice mais adequado a estimativas de parâmetros como estrutura do dossel e índice de área foliar, enquanto que o NDVI está relacionado à atividade fotossintética da vegetação.

As imagens NDVI/MODIS (produto MOD13Q1) correspondem a composições de 16 dias, geradas a partir de imagens MODIS diárias. Para geração das composições, o algoritmo seleciona, dentre todas as passagens disponíveis no período, o *pixel* com maior valor de NDVI e melhor qualidade em relação à geometria de visada e interferência atmosférica. Este *pixel* é, então, utilizado na geração das imagens compostas (Klering, 2007).

As composições de NDVI e EVI, assim como as imagens diárias do sensor MODIS, são disponibilizadas gratuitamente ao usuário final, no endereço eletrônico da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), com correções atmosféricas e geométricas previamente realizadas (Rizzi, 2004).

As resoluções espectrais, espaciais e temporais definem a escolha do sensor, e das imagens, a serem empregados em cada estudo. Para isso, é necessário, primeiramente, compreender o objetivo específico do estudo e analisar as características espaciais e temporais do alvo estudado (Janssen e Backer, 2001).

A resolução espectral se refere à largura das faixas de comprimento de ondas captadas pelos sensores (Janssen e Backer, 2001). A resolução espacial se refere à área da superfície terrestre que o sensor distingue como única (Janssen e Backer, 2001). A resolução temporal é o tempo decorrido entre a aquisição de duas imagens sucessivas de uma área da superfície terrestre (tempo de revisita) (Janssen e Backer, 2001).

As imagens NDVI do sensor MODIS (produto MOD13Q1) têm resolução espacial de 250 metros e temporal de 16 dias, ambas consideradas adequadas ao monitoramento de cultivos agrícolas, em escala regional. Nesses estudos, o acompanhamento no tempo das principais etapas fenológicas das culturas agrícolas é priorizado (resolução temporal), em detrimento do detalhamento espacial das informações (resolução espacial).

Em imagens de satélite, as semelhanças morfológicas entre os cereais de estação fria destinados à produção de grãos e aqueles cultivados para cobertura do solo ou em pastagens, dificultam a identificação e a distinção dos cultivos, especialmente quando empregadas imagens de uma única data (Fonseca *et al.*, 2010). Em estudos multitemporais, com imagens adquiridas ao longo do ciclo, as diferenças quanto à época de semeadura e o manejo podem servir de base para distinção dos cultivos. A distinção, baseada no comportamento temporal, diz respeito à finalidade do cultivo e não, necessariamente, das espécies em si. Caresani (2010) verificou diferenças entre os perfis temporais de NDVI/MODIS de áreas cultivadas com trigo e azevém, nas regiões da Campanha e Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo compreendeu 270 municípios localizados na metade norte do Estado do Rio Grande do Sul, pertencentes às regionais da EMATER/RS Caxias do Sul (58 municípios), Erechim (50), Passo Fundo (70), Ijuí (47) e Santa Rosa (45) (Figura 7). A região de estudo abrangeu área total de 8.817.583 ha, que correspondem a aproximadamente 31% da área do Estado.

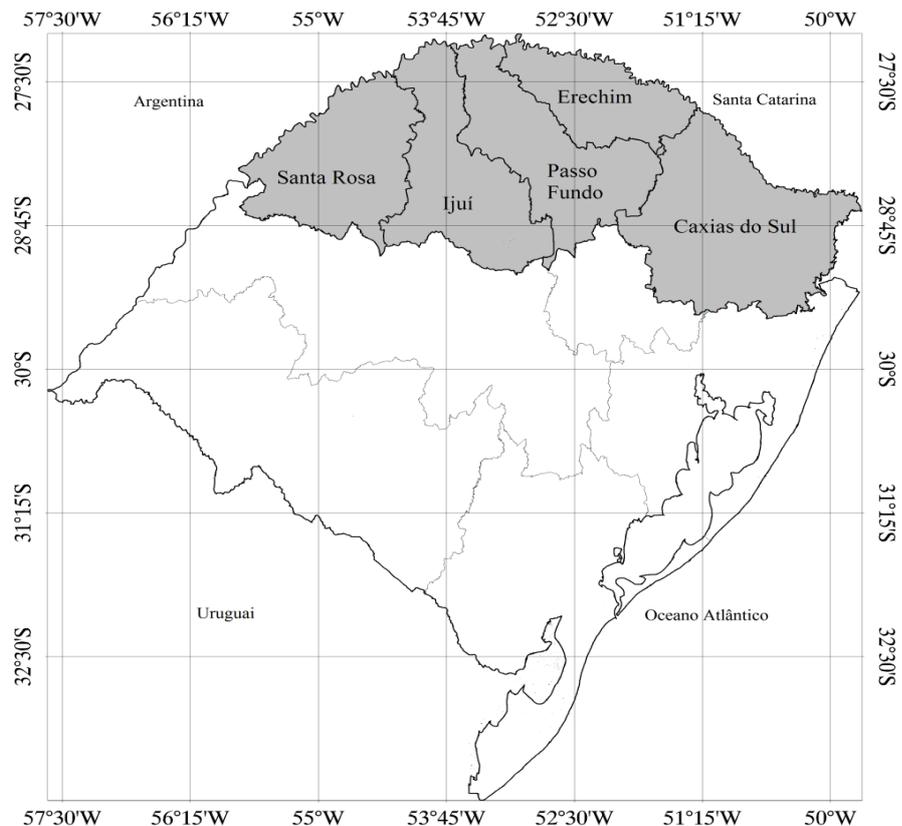


FIGURA 7. Localização das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa no Rio Grande do Sul.

No Rio Grande do Sul existem duas regiões homogêneas de adaptação de cultivares de trigo. As regiões, delimitadas de acordo com os regimes hídrico e térmico da estação de crescimento da cultura (Cunha *et al.*, 2006) foram denominadas Região 1 (Fria, Úmida e Alta – FUA) e Região 2 (Moderadamente Quente, Úmida e Baixa - QUB) (Figura 8). Ambas são caracterizadas como úmidas em função da ausência de estação seca definida, com total de precipitação pluvial superior à evapotranspiração (Cunha *et al.*, 2006). Na porção norte do Estado, a Região 1 compreende as áreas de maior altitude, nas quais a temperatura do ar é mais baixa, comparativamente à região 2. A região 2 abrange as áreas de menor altitude na porção central e oeste do Estado.

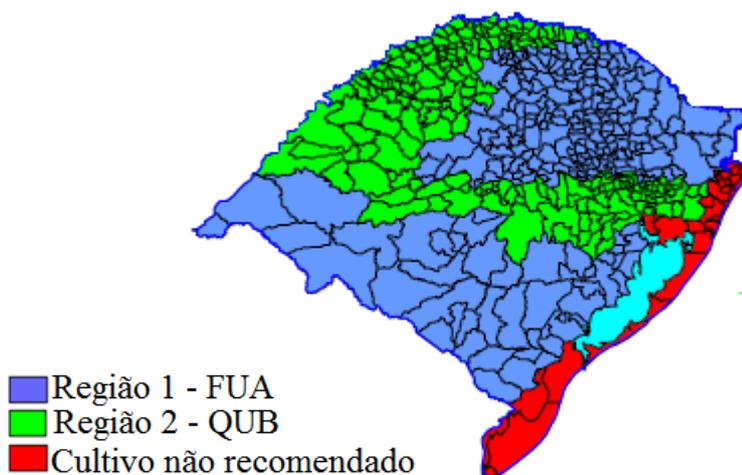


FIGURA 8. Regiões homogêneas de adaptação de cultivares de trigo no Rio Grande do Sul. Fonte: adaptado de Cunha *et al.* (2006).

Dos 270 municípios integrantes da área de estudo, 157 pertencem à Região 1 e 113 à Região 2. A maior parte dos municípios que compõem as regionais Caxias do Sul e Passo Fundo, respectivamente 96,6% e 77,1%, está localizada na Região 1 (Tabela 3). Na Região 2 estão inseridos 64%, 68% e 100% dos municípios das regionais Erechim, Ijuí e Santa Rosa, respectivamente.

TABELA 3. Número e percentual (%) de municípios das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa pertencentes às regiões de adaptação de cultivares de trigo 1 (Fria, Úmida e Alta - FUA) e 2 (Moderadamente Quente, Úmida e Baixa - QUB).

Regional	Municípios				
	Total	Região 1 (FUA)		Região 2 (QUB)	
	Nº	Nº	%	Nº	%
Caxias do Sul	58	56	96,6	2	3,4
Erechim	50	32	64,0	18	36,0
Passo Fundo	70	54	77,1	16	22,9
Ijuí	47	15	31,9	32	68,1
Santa Rosa	45	-	-	45	100,0
Total	270	157	58,1	113	41,9

De acordo com a classificação climática de Köppen, a maior parte da região de estudo está localizada na zona climática fundamental temperada (C), tipo climático fundamental úmido (f) e variedade específica subtropical (Cfa), com precipitação pluvial distribuída durante todo ano e temperatura média do mês mais quente superior a 22°C (verões quentes). Apenas na porção nordeste da área de estudo, em regiões de maiores altitudes, o clima é Cfb, com temperatura média do mês mais quente inferior a 22°C (verões amenos) (Köppen, 1948).

3.2 Análises

3.2.1 Estatística descritiva

Para caracterização da produção de grãos dos cereais de estação fria, com ênfase na cultura do trigo, na região de estudo, foram calculadas estatísticas descritivas dos dados oficiais de safras agrícolas. Os dados oficiais foram obtidos do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA/IBGE), disponibilizado no endereço eletrônico do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). Os dados, de 2000 a 2008, foram obtidos para o Rio Grande do Sul e para os municípios que compõem as regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa.

Foram obtidos dados de área cultivada (ha) de aveia branca, centeio, cevada, trigo e triticales. Para cultura do trigo, além da área cultivada, foram analisados dados de área colhida (ha) e quantidade produzida de grãos (kg). Os dados de área cultivada referem-se aos disponibilizados pelo LSPA sob a denominação “área plantada”.

Os dados de área cultivada de aveia branca, centeio, cevada, trigo e triticales foram agrupados de acordo com a regional à qual pertence o município. A área cultivada regional correspondeu à soma das áreas cultivadas municipais. Com as áreas cultivadas regionais foram elaborados gráficos de evolução temporal dos dados no período analisado.

Para os dados de área cultivada regional de trigo, além do gráfico de evolução temporal, foram obtidas as estatísticas descritivas média (aritmética), desvio padrão e coeficiente de variação (CV) e calculada a diferença entre área cultivada e área colhida. A área de trigo também foi expressa em termos de porcentagem da área total de cereais de estação fria, em cada regional.

Os dados municipais de quantidade produzida de grãos de trigo foram agrupados de acordo com a regional à qual pertence o município. A quantidade produzida regional correspondeu à soma das quantidades produzidas nos municípios. Foi elaborado gráfico de evolução temporal da quantidade produzida regional e obtidas as estatísticas descritivas média (aritmética), desvio padrão e coeficiente de variação (CV).

O rendimento regional de grãos de trigo (kg ha^{-1}) foi calculado dividindo-se a quantidade produzida regional pela área colhida regional (soma das áreas colhidas municipais). Foi construído gráfico de evolução temporal dos dados e determinadas as estatísticas descritivas média (aritmética), desvio-padrão e coeficiente de variação (CV). Também foi obtida a matriz de correlação (Pearson, a 1% de significância estatística), entre os rendimentos regionais e o rendimento estadual de grãos, no período analisado.

A existência de tendência tecnológica nos rendimentos regionais de grãos de trigo também foi verificada. O termo tendência tecnológica, introduzido em modelagem em 1975 (Braga, 1995), refere-se a aumentos anuais significativos no rendimento de grãos decorrentes da incorporação de novas tecnologias. Para verificação da existência desta tendência, foi ajustada uma regressão linear simples, na qual o rendimento de grãos é a variável dependente e o tempo (anos) a variável independente. A significância do coeficiente linear foi verificada pelo teste-t, a 5% de significância estatística.

Quando verificada a existência de tendência tecnológica, esta foi retirada dos valores de rendimentos regionais de grãos de trigo, de acordo com a regressão linear simples:

$$YC_i = Y_i - bX_i \quad (3)$$

Sendo YC_i o rendimento de grãos corrigido do ano i (kg ha^{-1}), Y_i o rendimento de grãos original do ano i (kg ha^{-1}), b o coeficiente da regressão linear e X o número do ano na série.

Semelhante às análises regionais, os rendimentos municipais de grãos de trigo foram obtidos dividindo-se a quantidade produzida municipal (kg) pela área colhida municipal (ha). Para este conjunto de dados foram obtidas as estatísticas descritivas valor máximo, valor mínimo, média (aritmética), desvio padrão e coeficiente de variação (CV). Foi verificada a possibilidade de identificação, através da análise de agrupamentos, de três regiões similares quanto ao rendimento de grãos de trigo dos municípios no período. A análise de agrupamentos foi realizada pelo método de Ward, que emprega a distância euclidiana ao quadrado como medida da similaridade entre os dados. Para cada grupo gerado foi calculado o rendimento médio de grãos de trigo. Os resultados da análise de agrupamento foram espacializados com uso do programa computacional Carta Linx.

Também foi calculado o rendimento municipal de grãos de trigo na média dos nove anos analisados (2000 a 2008). Com os dados de rendimento médio municipal foram construídos histogramas de distribuição de frequências e avaliada a normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (5% de significância estatística), em cada uma das regionais. As análises foram realizadas com emprego dos programas Excel (Microsoft Office 2007) e SPSS - *Statistical Package for the Social Sciences* versão 15.0.

3.2.2 Calendários agrícolas

Foram obtidos dados quinzenais de acompanhamento do ciclo da cultura do trigo nas safras agrícolas de 1999 a 2009. As informações, disponibilizadas pela EMATER/RS, foram referentes ao calendário agrícola e à quebra de safra. O calendário agrícola correspondeu à porcentagem de área cultivada na qual as lavouras de trigo se encontravam em crescimento vegetativo, florescimento, enchimento de grãos, maturação fisiológica e na colheita, de maio a dezembro. A quebra de safra correspondeu à redução do rendimento de grãos provocada pela ocorrência de eventos meteorológicos adversos (estiagens, chuvas excessivas, geadas, granizos), pragas e doenças. A redução do rendimento de grãos foi expressa na forma de porcentagem, considerando-se como 100% a expectativa inicial de rendimento de grãos. A expectativa inicial é calculada pela EMATER/RS com base na média de rendimento de grãos nos 10 anos anteriores ao ano em questão.

A organização e análise dos dados objetivaram caracterizar, espacial e temporalmente, o desenvolvimento das plantas de trigo em cada regional. Para isso, foram elaborados calendários agrícolas médios. Os calendários agrícolas médios foram obtidos calculando-se a média da porcentagem de área cultivada em que as lavouras se encontravam nas etapas do ciclo citadas. Para florescimento, enchimento de grãos,

maturação fisiológica e colheita, a média foi calculada com os dados de 1999 a 2009. Para o período vegetativo foram empregados os dados de 1999 a 2004, em virtude da mudança na metodologia de coleta da informação, nos anos seguintes.

Para verificação da variabilidade dos calendários agrícolas e das quebras de safras, no período analisado, foram elaborados gráficos de dispersão (diagramas de caixas).

3.2.3 Perfis temporais de NDVI/MODIS

Nas regionais EMATER/RS, as áreas agrícolas estabelecidas durante o período de outono-inverno-primavera foram caracterizadas por meio da evolução temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Para isso, foram empregadas 17 imagens NDVI (composições de 16 dias) provenientes do sensor MODIS (produto MOD13Q1, coleção 5), referentes aos meses de abril a dezembro, de 2000 a 2008. As imagens NDVI/MODIS são disponibilizadas no endereço eletrônico do programa EOS (<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome>). Neste trabalho, as imagens NDVI/MODIS do Estado do Rio Grande do Sul foram obtidas junto ao Laboratório de Estudos em Agricultura e Agrometeorologia (LEAA) do Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM/UFRGS). O recorte das regionais EMATER/RS foi realizado no programa computacional Envi 4.2.

Para elaboração de perfis temporais foi necessário identificar e realçar, nas imagens NDVI, as áreas agrícolas. Para isso, foram analisados os resultados de três etapas de processamento: (1) sem o emprego de metodologias de realce de áreas agrícolas, (2) via metodologia de máscara de cultivos e (3) via classificação não supervisionada das áreas identificadas pelas máscaras de cultivo. Após a aplicação das metodologias, foram extraídos os valores de NDVI máximos, mínimos e médios

considerando todos os *pixels* pertencentes às áreas realçadas. Os valores médios foram utilizados na construção dos perfis temporais de NDVI/MODIS. Quando provenientes da etapa 1 de processamento, os perfis temporais foram denominados “regionais”. Quando provenientes das etapas 2 e 3, os perfis foram denominados “máscaras de cultivo” e “classes”, respectivamente. Todo processamento das imagens NDVI/MODIS foi realizado no programa computacional Envi 4.2.

3.2.3.1 Regionais

Os perfis temporais regionais corresponderam àqueles elaborados considerando-se a área total abrangida por cada uma das regionais, sem a aplicação de metodologia de realce de áreas agrícolas. Foram obtidos perfis temporais anuais (2000 a 2008). Os perfis anuais foram empregados na elaboração do perfil temporal médio.

3.2.3.2 Máscaras de cultivos

Os perfis temporais máscaras de cultivo corresponderam aos obtidos das áreas agrícolas delimitadas através da metodologia de máscaras de cultivo. Nesse trabalho, a máscara de cultivos foi construída de acordo com a metodologia proposta por Fontana *et al.* (2007), já empregada no estudo de perfis temporais de NDVI/MODIS de áreas de cereais de estação fria no Rio Grande do Sul (Junges e Fontana, 2009). As máscaras de cultivo, para cada regional e ano, foram obtidas a partir de imagens de mínimo e máximo NDVI.

As imagens de mínimo e máximo NDVI corresponderam a composições de mínimo (ou máximo) valor de NDVI. Para composição da imagem de mínimo NDVI foi selecionado o menor valor do índice, *pixel a pixel*, nas imagens da primeira quinzena de abril à segunda quinzena de maio. Para a composição da imagem de máximo NDVI

foram selecionados os *pixels* com os maiores valores, considerando as imagens da segunda quinzena de junho à primeira de outubro.

A subtração das imagens de mínimo e máximo NDVI gerou as imagens diferença. Nas imagens diferença foram aplicados valores de corte (limiares) para identificação e realce das áreas com maior variação temporal do NDVI no período (possivelmente áreas de uso agrícola). Estas áreas compuseram a máscara de cultivos.

O limiar escolhido foi aquele que gerou, para cada regional e ano, máscara de cultivos com área (ha) igual à área agrícola cultivada no período de primavera-verão. Considerou-se como área cultivada de primavera-verão a soma das áreas cultivadas oficiais de milho e soja, de acordo com o LSPA/IBGE. A diferença entre áreas (máscara de cultivo e oficial) foi expressa em termos absolutos (ha) e porcentagem da área oficial.

A geração de máscaras de cultivo com áreas próximas à soma das áreas cultivadas de milho e soja objetivou identificar e realçar as áreas agrícolas estabelecidas no período de abril a dezembro, independente de estas serem cultivadas com cereais de estação fria, pastagens ou espécies de cobertura do solo.

Perfis temporais de NDVI/MODIS anuais (2000 a 2008) foram obtidos das áreas delimitadas pelas máscaras de cultivo. Os perfis anuais foram empregados na elaboração do perfil temporal médio.

3.2.3.3 Classes

Foi realizada classificação não supervisionada das imagens NDVI/MODIS, de abril a dezembro, considerando-se somente as áreas das máscaras de cultivo.

A classificação não supervisionada foi efetuada utilizando o algoritmo Isodata. Este algoritmo avalia o espaço multispectral e agrupa iterativamente os *pixels* em torno das médias das classes, cujo número é definido pelo usuário (Weber *et al.*, 2005). Neste

estudo foram estabelecidos 100 iterações e número de classes entre cinco (mínimo) e dez (máximo). As classes resultantes do processo de classificação não supervisionada foram transformadas em vetores. Os vetores foram sobrepostos às imagens NDVI/MODIS para construção dos perfis temporais. Foram elaborados perfis temporais de NDVI/MODIS anuais (2000 a 2008) das áreas delimitadas pelas classes. Os perfis anuais foram empregados na elaboração do perfil temporal médio.

Foi analisado se o perfil de NDVI/MODIS de uma das classes representou adequadamente a evolução temporal do índice de vegetação esperada de áreas agrícolas cultivadas para produção de grãos. A análise considerou a data de semeadura e o calendário agrícola da cultura do trigo, em cada uma das regionais. A classe escolhida foi denominada “cereais de estação fria”.

A área da classe cereais de estação fria foi comparada à área oficial de cereais de estação fria (soma das áreas cultivadas de aveia branca, centeio, cevada, trigo e triticale, de acordo com LSPA/IBGE). Para verificação das diferenças entre áreas (oficial e classificada) foi realizado teste de comparação de médias (teste t de Student, para amostras relacionadas, a 5% de significância estatística), com os dados regionais (18 observações) e para o conjunto total de dados (90 observações). O teste de comparação de médias foi realizado com aplicativo SPSS versão 15.0.

3.2.3.4 Relação com o ciclo da cultura e o rendimento de grãos de trigo

Os perfis temporais anuais (2000 a 2008) da classe cereais de estação fria foram empregados na elaboração dos perfis temporais médios. Desta maneira, procurou-se caracterizar a evolução temporal do NDVI, em cada uma das regionais, e relacioná-la às principais etapas do ciclo da cultura. Nos perfis temporais médios foram indicados os valores mínimos e máximos, para verificação da variabilidade interanual do NDVI.

A relação entre a variação temporal dos valores de NDVI/MODIS da classe cereais de estação fria e os rendimentos regionais de grãos de trigo foi analisada por meio de gráficos contendo distintos perfis temporais: (1) perfis temporais de anos de máximo e mínimo rendimento de grãos e (2) perfis temporais de NDVI/MODIS médios, elaborados com perfis de anos nos quais o rendimento de grãos foi superior/inferior a 2.500 kg ha^{-1} para a regional Caxias do Sul, 2.200 kg ha^{-1} (Erechim), 1.800 kg ha^{-1} (Passo Fundo) e 1.500 kg ha^{-1} (Ijuí e Santa Rosa). A determinação destes valores considerou os rendimentos médios de grãos de trigo das regionais na série analisada.

Também foram calculados NDVI área e o NDVI tempo. O NDVI área corresponde à área abaixo da curva descrita pelo perfil. A área foi calculada através da soma das áreas de triângulos e retângulos, até a quinzena de máximo valor de NDVI (Figura 9). O NDVI tempo correspondeu ao número de imagens entre o mínimo e o máximo NDVI (Figura 9). O objetivo foi verificar se os perfis temporais e valores de NDVI área e NDVI tempo, na medida em que representam o acúmulo de biomassa verde pelas plantas, podem ser associados ao rendimento regional de grãos de trigo.

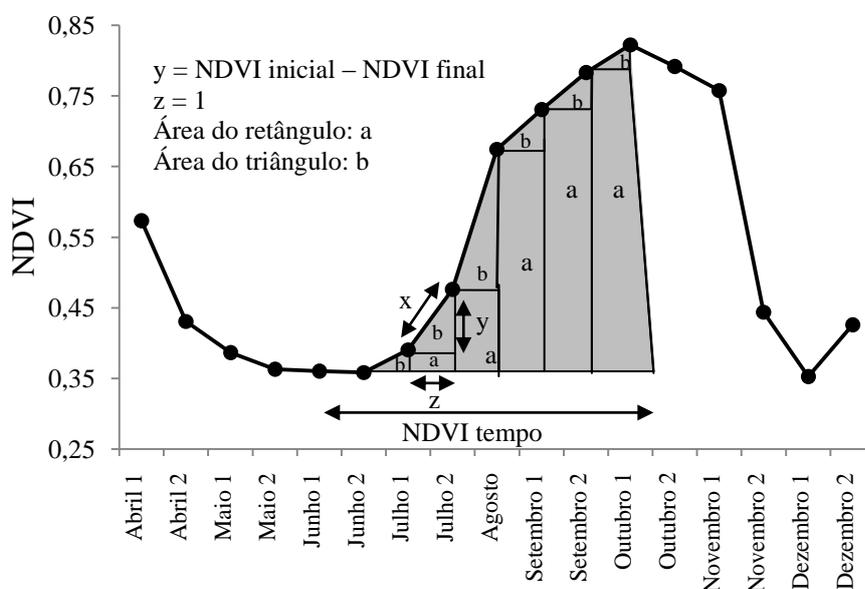


FIGURA 9. Cálculo do NDVI área (área abaixo da curva descrita pelo perfil temporal, até o máximo) e NDVI tempo (número de imagens, do mínimo ao máximo), sendo 1 e 2 a primeira e a segunda quinzena do mês, respectivamente.

3.2.4 Correlações

3.2.4.1. Variáveis espectrais e rendimento regional de grãos de trigo

Para seleção das variáveis espectrais a serem inseridas nos modelos de estimativa de rendimento de grãos, foram calculadas as correlações (Pearson) entre os dados espectrais (NDVI) e os rendimentos regionais de grãos de trigo. Foram analisados os valores quinzenais, máximo, mínimo, diferença (entre o máximo e o mínimo), NDVI área, NDVI tempo e soma em períodos específicos do ciclo de desenvolvimento das plantas de trigo (exemplo: soma dos valores de NDVI/MODIS de agosto e setembro, meses em que as lavouras de encontravam em florescimento na regional Santa Rosa).

As correlações foram obtidas com o aplicativo SPSS versão 15.0.

3.2.4.2 Variáveis meteorológicas e rendimento regional de grãos de trigo

Neste trabalho foram empregados dados meteorológicos diários de temperatura do ar (máxima e mínima) e precipitação pluvial, de abril a dezembro (2000 a 2008), das estações meteorológicas localizadas nos municípios de Caxias do Sul, Erechim, Ijuí e Santa Rosa (pertencentes à rede de estações do Centro Estadual de Meteorologia da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária – CEMETRS/FEPAGRO) e Passo Fundo (pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia - 8ºDISME/INMET).

Com os dados diários de temperatura máxima e mínima do ar foi calculada a temperatura média do ar (média aritmética), de acordo com a equação:

$$T_{med} = \frac{T_{máx} + T_{mín}}{2} \quad (4)$$

Sendo T_{med} a temperatura média do ar, $T_{máx}$ a temperatura máxima do ar e $T_{mín}$ a temperatura mínima do ar.

Com os dados diários de temperatura mínima do ar foram calculados os índices de geadas mensais. O índice de geadas correspondeu à soma das frequências de ocorrência das seguintes faixas de temperaturas mínimas: entre 2°C e 0°C (multiplicada pelo peso 1), entre 0°C e -2°C (multiplicada pelo peso 2) e abaixo de -2°C (multiplicada pelo peso 3), de acordo com metodologia adotada por Cunha *et al.* (2001).

Com os dados diários de temperatura média do ar foram calculados graus-dia. O acúmulo mensal de graus-dia foi calculado pelo método residual, considerando a temperatura basal mínima de 0°C, de acordo com a equação:

$$GD = \sum_{i=1}^n (T_{med} - T_b) \quad (5)$$

Sendo GD os graus-dia mensais, T_{med} a temperatura média do ar (diária), T_b a temperatura basal (0°C) e n o número de dias do mês.

Com os dados diários de precipitação pluvial foram calculados a precipitação pluvial mensal (soma dos valores diários) e o número de dias com precipitação pluvial.

Os dados meteorológicos utilizados neste trabalho constam no Apêndice 1.

Para seleção das variáveis agrometeorológicas a serem inseridas nos modelos de estimativa de rendimento de grãos, foram calculadas as correlações (Pearson) entre os dados agrometeorológicos (precipitação pluvial e temperaturas do ar – máxima, mínima e média, e suas derivações – graus-dia e índice de geadas) e os rendimentos regionais de grãos de trigo.

As correlações foram obtidas com o aplicativo SPSS versão 15.0.

3.2.5 Ajuste de modelos agrometeorológicos-espectrais

Foram ajustadas equações de regressão linear múltipla, nas quais o rendimento regional de grãos de trigo é a variável dependente e os dados agrometeorológicos e espectrais são as variáveis independentes.

Foram consideradas variáveis independentes, a serem inseridas nos modelos, aquelas que apresentaram os maiores coeficientes de correlação. Além do valor da correlação, foi verificado se a variável tem efetivamente relação com o rendimento final, de acordo com a revisão bibliográfica. O objetivo foi evitar a inserção nos modelos, de variáveis que, mesmo apresentando correlação significativa com o rendimento de grãos, não atuam na definição deste.

A seleção das variáveis foi realizada através do método de eliminação para trás (*backward elimination*). Neste método, o processo de seleção inicia-se com a regressão completa (com todas as variáveis) e, em cada etapa, é eliminada a variável cuja saída do modelo conduz a uma equação de regressão com menor erro (Hair Jr. *et al.*, 2009).

Como indicador de qualidade das regressões lineares múltiplas foram empregados os coeficiente de determinação (R^2) ajustados e a significância estatística do coeficiente linear (20% de significância estatística pelo teste t).

O ajuste dos modelos foi realizado com aplicativo SPSS versão 15.0.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estatísticas descritivas

Neste trabalho, as estimativas de rendimento de grãos de trigo dos modelos agrometeorológicos-espectrais foram comparadas ao rendimento de grãos obtido das estimativas oficiais de área colhida e quantidade produzida. Sendo assim, a análise exploratória dos dados oficiais auxiliou na caracterização da produção de trigo na região de estudo, identificando as diferenças existentes entre regionais, em termos de valor ou de evolução temporal dos rendimentos de grãos.

4.1.1 Área cultivada de cereais de estação fria

A evolução temporal da área cultivada com cereais de estação fria, nos anos 2000 a 2008, indicou que no Rio Grande do Sul as áreas de centeio, cevada e triticale decresceram, enquanto que a área destinada ao cultivo de aveia branca aumentou no período analisado.

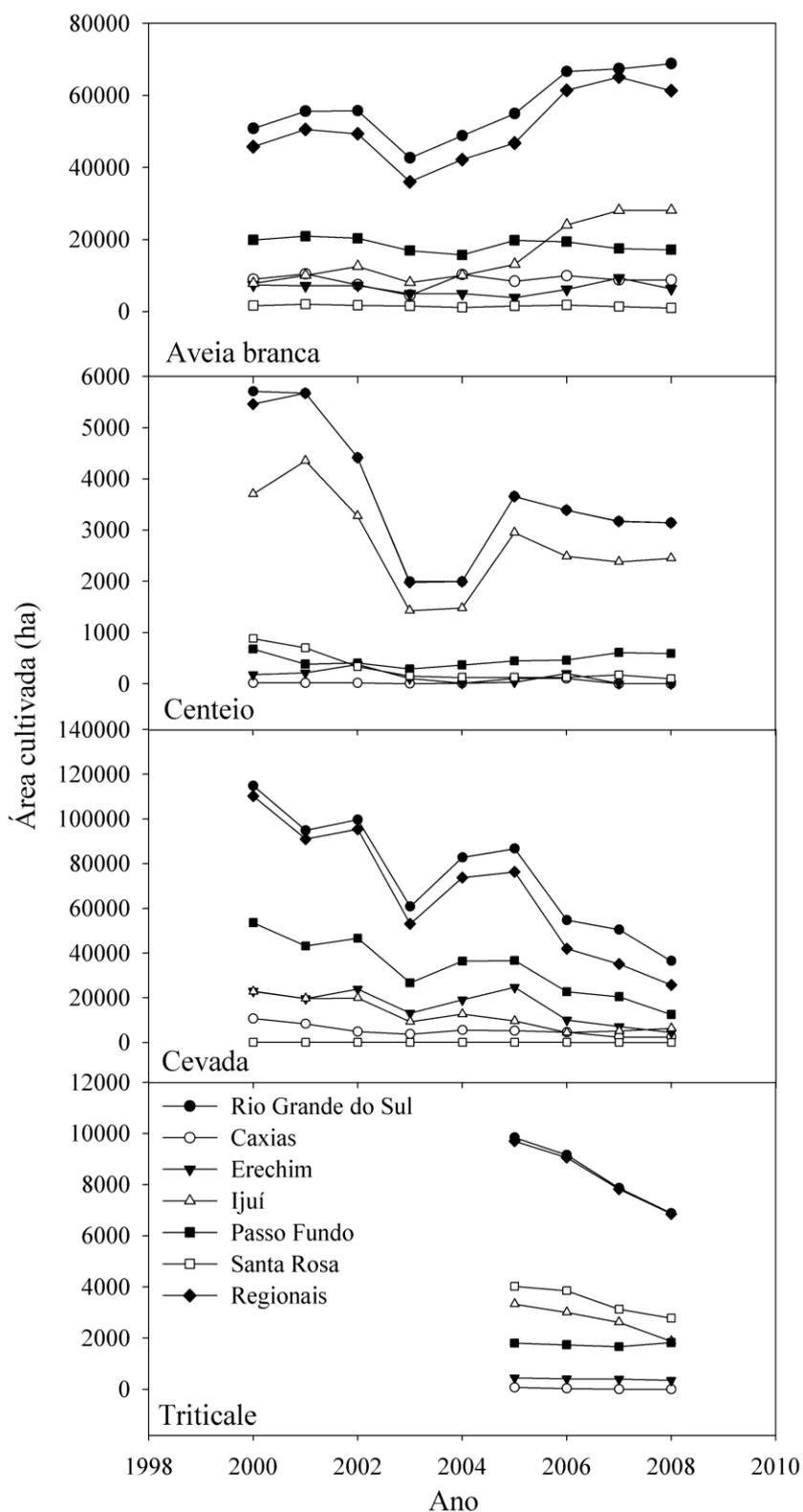


FIGURA 10. Evolução temporal da área cultivada (ha) de aveia branca, centeio, cevada e triticale nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí, Santa Rosa e nas cinco regionais, 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).

No Rio Grande do Sul, considerando o período de 2000 a 2008, a área cultivada de aveia branca aumentou a partir de 2003. O valor máximo ocorreu em 2007, quando foram semeados no Estado 68.775 ha, dos quais 61.310 ha corresponderam à soma da área cultivada de aveia branca nas regionais analisadas. A maior área cultivada foi registrada na regional Passo Fundo (de 32 a 37% da área cultivada no Estado) entre os anos 2000 e 2005 e, de 2006 a 2008, na regional Ijuí (36% a 41%). Nesta última foram verificados os maiores incrementos de área - de 7.810 ha (7% da área cultivada do Estado, em 2000) para 28.095 ha (41%, em 2008). De acordo com Floss *et al.* (2007), o aumento da área cultivada de aveia branca pode ser atribuído à necessidade de diversificação de culturas, disponibilidade de cultivares de elevados rendimentos e preços favoráveis no mercado interno, além do aumento do consumo de alimentos à base de aveia e o desenvolvimento de bacias leiteiras em regiões tradicionalmente produtoras de grãos.

No período analisado, a área destinada ao cultivo de centeio decresceu no Rio Grande do Sul, passando de 5.710 ha em 2000 para 3.143 ha em 2008. A soma da área cultivada nas cinco regionais foi equivalente a 100% da área cultivada no Estado. A maior área cultivada foi registrada na regional Ijuí (responsável por 65% a 81% da área cultivada no Estado). O desenvolvimento de cultivares de trigo mais adaptadas e de maior rentabilidade econômica, além da maior disponibilidade de sementes de trigo, aveia e cevada, comparativamente à de centeio, têm sido apontados como os principais responsáveis pelo decréscimo da área cultivada de centeio no Rio Grande do Sul (Embrapa Trigo, 2010).

O cultivo de cevada no Rio Grande do Sul ocupou 75.719 ha, na média dos anos analisados. A área cultivada reduziu aproximadamente 70%, passando de 114.852 ha em 2000 para 36.460 ha em 2008. A soma da área cultivada nas cinco regionais ficou

entre 69 e 96% da área cultivada no Estado. A maior área cultivada foi registrada na regional Passo Fundo (responsável por 34 a 47% da área cultivada de cevada no Estado). De acordo com Antunes (2009), a área destinada à cultura da cevada tem reduzido em todo País, em virtude de adversidades climáticas e políticas de incentivo ao cultivo de trigo.

A área cultivada de triticales passou a constar as estimativas oficiais de safras agrícolas a partir de 2005. Assim, no período com disponibilidade de dados, a área cultivada de triticales decresceu no Rio Grande do Sul, passando de 9.843 ha para 6.879 ha. A maior área foi cultivada na regional Santa Rosa. As variações de área cultivada de triticales estão relacionadas à cadeia produtiva do milho, pois ambos são empregados na fabricação de ração animal (Nascimento Jr., 2009).

A evolução temporal da área cultivada de trigo no Estado (Figura 11) indicou que, de 2000 a 2004, a área aumentou, ultrapassando um milhão de hectares. Em 2005 e 2006, foi registrada diminuição da área cultivada, com novo incremento em 2007 (850.169 ha) e 2008 (970.375 ha). No Rio Grande do Sul, a área cultivada média foi de 836.618 ha, com coeficiente de variação de 22% e diferença de 565.000 ha entre os valores máximo (1.125.000 ha, ano 2004) e mínimo (560.560 ha, ano 2000).

De acordo com Canziani e Guimarães (2009), a cultura do trigo se caracteriza pela elevada variabilidade de área cultivada e de rendimento de grãos, em função das condições meteorológicas e das políticas econômicas do País. Na questão econômica, de 1995 a 1999, a valorização do Real favoreceu as importações de trigo. De 1999 a 2004, a área cultivada aumentou em decorrência dos maiores preços do produto no mercado interno. De 2005 a 2007, novamente as importações se tornaram a principal fonte de trigo. Em 2008, a área cultivada voltou a crescer em todo País, dado o alto preço das *commodities* agrícolas no mercado internacional (Canziani e Guimarães, 2009)

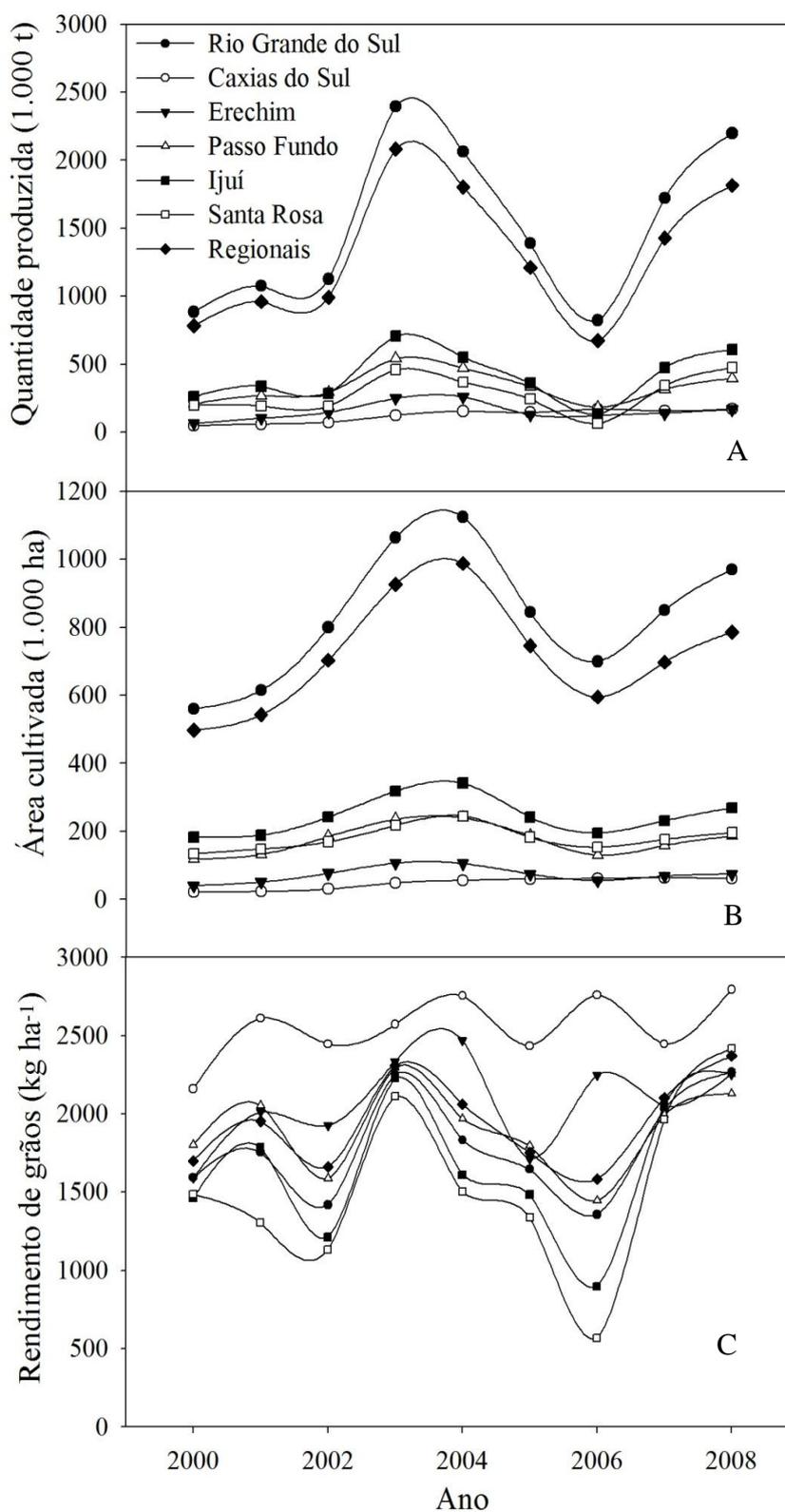


FIGURA 11. Evolução temporal da quantidade produzida (1.000 t) (A), área cultivada (ha) (B) e rendimento de grãos de trigo (kg ha⁻¹) (C) nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí, Santa Rosa e nas cinco regionais, 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).

Na média dos anos analisados, a área cultivada nas regionais foi equivalente a 86% da área cultivada de trigo no Estado. A partir deste resultado foi possível deduzir que a produção gaúcha de trigo está concentrada na região de estudo. As maiores áreas cultivadas foram registradas nas regionais Ijuí (entre 27 e 33% da área cultivada no Estado), Santa Rosa (20 a 24%) e Passo Fundo (19 a 23%). Os maiores coeficientes de variação foram registrados nos dados de Caxias do Sul (37%) e Erechim (31%), e o menor em Santa Rosa (19%). Passo Fundo e Ijuí apresentaram coeficientes de variação da área cultivada semelhantes ao registrados nos dados estaduais (25% e 23%, respectivamente).

A comparação das áreas cultivadas com cereais de estação fria indicou que o trigo foi a cultura que ocupou a maior área cultivada (Figura 12). Na regional Caxias do Sul entre 53% e 85% da área cultivada de cereais de estação fria foi estabelecida com trigo no período analisado. Na regional Erechim, a porcentagem variou entre 57 e 87%, em Passo Fundo entre 61 e 85%, em Ijuí entre 84 a 94%, e, em Santa Rosa entre 96 e 98%. Dessa maneira, o trigo é a principal cultura produtora de grãos estabelecida no período de outono-inverno-primavera nestas regionais.

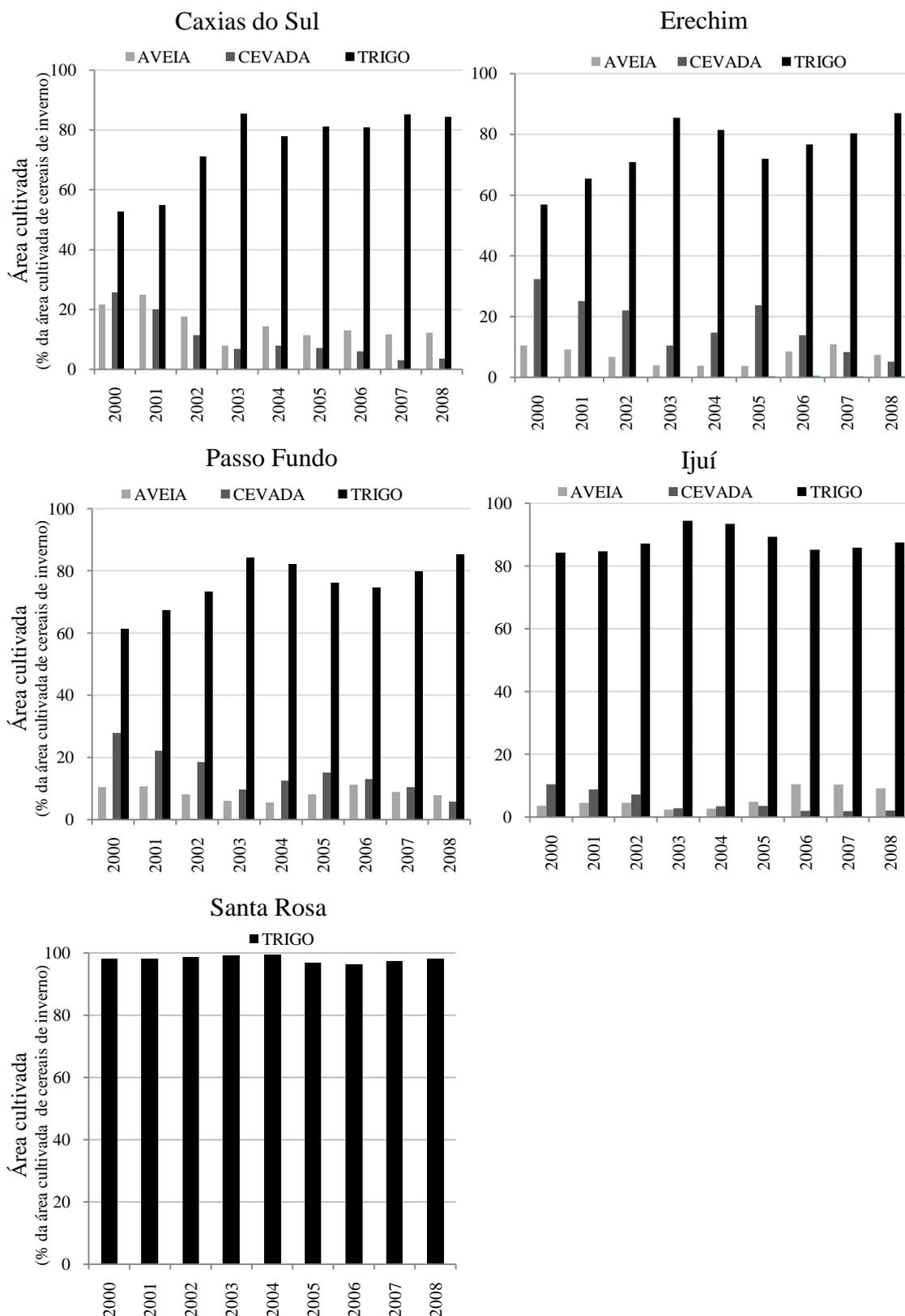


FIGURA 12. Área cultivada com os principais cereais de estação fria, expressa em termos de porcentagem da área total nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).

4.1.2 Área colhida de trigo

A evolução temporal da área colhida de trigo foi semelhante à evolução da área cultivada. Considerando os dados do Rio Grande do Sul, a área colhida média foi de 824.500 ha. O valor máximo ocorreu em 2004, quando foram colhidos 1.124.800 ha, dos quais 30% na regional Ijuí, 22% em Passo Fundo, 20% em Santa Rosa, 10% em Erechim e 4,5% em Caxias do Sul. A menor área estabelecida com lavouras de trigo foi colhida no Estado em 2000 (555.000 ha).

A área colhida de trigo, na soma das cinco regionais, correspondeu a 86% da área colhida no Estado, na média dos anos (variação de 81% a 89%).

No Rio Grande do Sul, o coeficiente de variação da área colhida de trigo foi de 25%. Valor semelhante a este foi verificado nos dados das regionais Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, respectivamente 26%, 26,5% e 23%. Os maiores coeficientes de variação de área colhida, assim como verificado nos dados de área cultivada, foram os das regionais Caxias do Sul e Erechim, respectivamente 37% e 31%.

A diferença entre área cultivada e área colhida é uma informação simples que, associada ao calendário agrícola e às informações meteorológicas, auxilia na caracterização das quebras de safras. No período analisado, a maior diferença entre áreas foi verificada nos dados de 2006. Em 2006, não foram colhidos 92.182 ha de lavouras de trigo no Estado, dos quais 47.530 ha estavam localizados na regional Ijuí e 39.000 ha na regional Santa Rosa. De acordo com dados disponibilizados pela EMATER/RS, 50% da área cultivada de trigo no Estado foi atingida por evento meteorológico adverso neste ano. A quebra de safra foi provocada pela ocorrência de geadas nos meses de agosto e setembro (Junges e Fontana, 2008). Nos demais anos analisados, a diferença entre as áreas cultivada e colhida, na soma das cinco regionais, situou-se entre 100 ha (em 2008) e 6.120 ha (em 2000).

4.1.3 Quantidade produzida de grãos de trigo

A evolução temporal da quantidade produzida de grãos de trigo (Figura 11) indicou que, no período analisado, a maior produção estadual ocorreu em 2003 (2.396.000 toneladas de grãos) e, a menor, em 2006 (823.000 toneladas, equivalentes a 34% do valor máximo). Os coeficientes de variação foram de 37% para os dados do Estado, 37,5% para regional Caxias do Sul, 39% (Erechim), 42% (Passo Fundo), 33% (Ijuí) e 46% (Santa Rosa).

A regional Santa Rosa se caracterizou pelos menores coeficientes de variação de área cultivada e área colhida. No entanto, em termos de quantidade produzida, apresentou a maior variabilidade. Este resultado indica que, embora o cultivo de trigo esteja consolidado, em termos de área destinada à cultura, a produção de grãos foi afetada, dentre outros fatores, pelas condições meteorológicas.

A quantidade produzida de grãos de trigo, na soma das cinco regionais, correspondeu a 86% da quantidade produzida no Estado, na média dos anos.

4.1.4 Rendimento de grãos de trigo

4.1.4.1 Regionais

A evolução temporal dos rendimentos regionais de grãos de trigo (Figura 11) indicou que as regionais Caxias do Sul, Erechim e Passo Fundo apresentaram, na maior parte dos anos analisados, rendimentos superiores ao rendimento estadual.

Na média dos anos, os maiores rendimentos regionais de grãos foram os de Caxias do Sul (2.553 kg ha⁻¹), Erechim (2.066 kg ha⁻¹) e Passo Fundo (1.896 kg ha⁻¹). Nas regionais Ijuí e Santa Rosa, os rendimentos regionais de grãos foram, respectivamente, de 1.667 kg ha⁻¹ e 1.536 kg ha⁻¹ (Tabela 4). Os coeficientes de

variação do rendimento regional de grãos de trigo oscilaram entre 7,6% (para os dados da regional Caxias do Sul) e 34% (para os dados da regional Santa Rosa) (Tabela 4).

TABELA 4. Média, desvio-padrão e coeficiente de variação dos rendimentos de grãos de trigo do Rio Grande do Sul e das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).

	Rendimentos de grãos de trigo		
	Média (kg ha ⁻¹)	Desvio-Padrão (kg ha ⁻¹)	Coeficiente de Variação (%)
Rio Grande do Sul	1.795	314	17,5
Caxias do Sul	2.553	193	7,6
Erechim	2.066	274	13,3
Passo Fundo	1.896	252	13,3
Ijuí	1.667	435	26,1
Santa Rosa	1.536	526	34,3
Média regionais	1.919	360	18,8

Maiores rendimentos de grãos de trigo foram registrados nas regionais localizadas na porção leste da área de estudo, enquanto que, em termos de coeficiente de variação, foi verificada ordem inversa. Os resultados apontaram para existência de variação espacial, no sentido leste-oeste, do rendimento de grãos de trigo no Estado. De acordo com Cunha *et al.* (2009), as regiões de maior altitude têm sido definidas como as que possuem características ambientais mais propícias ao adequado desenvolvimento das plantas de trigo, resultando em maiores rendimentos de grãos e menor variabilidade entre safras. Este fato está relacionado, especialmente, à relação entre radiação solar e temperatura do ar (quociente fototermal) no período de 30 dias próximos à antese. O decréscimo do quociente fototermal, no sentido leste-oeste, faz com que o potencial de rendimentos de grãos também diminua no mesmo sentido (Cunha *et al.*, 2005).

A matriz de correlação (Tabela 5) indicou que podem ser relacionados (linearmente) os rendimentos das regionais Caxias do Sul e Erechim, e os rendimentos das regionais Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa. O rendimento estadual de grãos de trigo

foi significativamente relacionado ao rendimento de grãos das regionais Passo Fundo (0,93), Ijuí (0,97) e Santa Rosa (0,95), bem como ao rendimento médio das cinco regionais (0,99). A identificação da associação entre o rendimento de grãos obtido por diferentes regionais contribui para melhor compreensão do efeito de características edafo-climáticas no crescimento e desenvolvimento das plantas de trigo em lavouras situadas nas porções leste (Caxias e Erechim) e central-oeste (Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa) da região de estudo.

TABELA 5. Matriz de correlação dos rendimentos de grãos de trigo do Rio Grande do Sul (RS), das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa e do rendimento médio das cinco regionais, 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).

	RS	Caxias	Erechim	Passo Fundo	Ijuí	Santa Rosa	Média regionais
Rio Grande do Sul	1,00						
Caxias	0,27	1,00					
Erechim	0,44	0,86*	1,00				
Passo Fundo	0,93*	0,15	0,34	1,00			
Ijuí	0,97*	0,13	0,29	0,95*	1,00		
Santa Rosa	0,95*	0,05	0,22	0,86*	0,95*	1,00	
Média regionais	0,99*	0,38	0,55	0,92*	0,95*	0,92*	1,00

* Correlação de Pearson, a 1% de significância estatística.

Os resultados da regressão linear para verificação da tendência tecnológica indicaram que, no período analisado, não houve incremento significativo nos rendimentos regionais de grãos de trigo (Tabela 6). Cunha *et al.* (1999) verificaram a existência de tendência tecnológica no rendimento estadual de grãos de trigo. Os autores empregaram, no entanto, uma série maior de dados (1920 a 1997). Dada ausência de tendência tecnológica no período analisado, as variações interanuais dos rendimentos regionais de grãos de trigo podem ser atribuídas às variações das condições meteorológicas, principalmente.

TABELA 6. Coeficientes lineares (b) das equações de regressão do rendimento regional de grãos de trigo em função do tempo, regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008.

	Coeficiente linear (b)	Significância estatística
Caxias do Sul	42,21	0,11 ^{ns}
Erechim	46,46	0,24 ^{ns}
Passo Fundo	43,75	0,50 ^{ns}
Ijuí	5,56	0,88 ^{ns}
Santa Rosa	63,33	0,42 ^{ns}

^{ns} Não significativo pelo teste t a 5% de significância estatística.

4.1.4.2 Municipais

As estatísticas descritivas referentes aos rendimentos municipais constam na Tabela 7. A maior média de rendimento máximo ocorreu na regional Caxias do Sul (3.160 kg ha^{-1}), seguida por Passo Fundo (2.948 kg ha^{-1}) e Erechim (2.753 kg ha^{-1}). O maior valor absoluto (3.600 kg ha^{-1}) também foi registrado em município pertencente à regional Caxias do Sul (Guabiju, em 2006). A regional Santa Rosa, apesar de possuir rendimento máximo inferior ao das demais na média dos anos (2.133 kg ha^{-1}), registrou incremento em 2007 e 2008. A menor média de rendimento mínimo ocorreu na regional Passo Fundo (797 kg ha^{-1}) e o menor valor mínimo absoluto foi 210 kg ha^{-1} , em município da regional Santa Rosa (Tucunduva), em 2006.

As maiores amplitudes de rendimentos municipais ocorreram em anos distintos: em Caxias do Sul e Erechim (2.700 e 2.400 kg ha^{-1}) em 2005, em Passo Fundo (2.833 kg ha^{-1}) em 2000 e, nas regionais Ijuí e Santa Rosa (1.580 e 2.040 kg ha^{-1}) em 2008.

TABELA 7. Valor máximo, mínimo e médio do rendimento municipal de grãos de trigo, regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).

	Máximo									
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Média
Caxias	3.000	3.000	3.000	3.000	3.300	3.300	3.600	3.000	3.240	3.160
Erechim	2.100	2.700	2.400	2.880	3.000	3.000	3.000	2.700	3.000	2.753
Passo Fundo	3.333	2.700	2.700	3.300	3.000	2.500	3.000	3.000	3.000	2.948
Ijuí	2.160	2.580	1.800	2.700	2.100	2.100	1.500	2.400	2.880	2.247
Santa Rosa	1.920	1.800	1.500	2.700	1.920	1.860	1.800	2.400	3.300	2.133
Média	2.503	2.556	2.280	2.916	2.664	2.552	2.580	2.700	3.084	2.648
	Mínimo									
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Média
Caxias	900	1.000	1.000	1.000	1.000	600	1.000	1.000	1.143	960
Erechim	900	767	800	900	1.157	600	633	1.000	1.000	862
Passo Fundo	500	900	897	1.224	900	700	420	735	900	797
Ijuí	660	1.200	500	1.200	1.160	720	300	1.000	1.300	893
Santa Rosa	794	800	720	1.500	720	960	210	1.083	1.260	894
Média	751	933	783	1.165	987	716	513	964	1.121	881
	Médio									
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Média
Caxias	1.638	1.811	1.861	2.208	2.268	2.051	2.216	2.168	2.299	2031
Erechim	1.498	1.861	1.801	2.175	2.276	1.583	2.055	1.939	2.105	1921
Passo Fundo	1.635	1.903	1.654	2.267	1.980	1.668	1.370	1.964	2.003	1827
Ijuí	1.428	1.772	1.224	2.115	1.600	1.499	856	2.015	2.171	1631
Santa Rosa	1.381	1.249	1.149	2.059	1.446	1.324	552	1.846	2.272	1475
Média	1.512	1.714	1.533	2.158	1.907	1.619	1.403	1.980	2.170	1777

Os maiores rendimentos médios municipais (média dos nove anos analisados), foram obtidos pelos seguintes municípios: Capão Bonito do Sul (regional Caxias do Sul, 2.913 kg ha⁻¹), Sananduva (regional Erechim, 2.507 kg ha⁻¹), Água Santa (regional Passo Fundo, 2.604 kg ha⁻¹), Sede Nova (regional Ijuí, 1.940 kg ha⁻¹) e Rolador (regional Santa Rosa, 1.808 kg ha⁻¹).

A análise visual do histograma de frequências dos rendimentos médios municipais (Figura 13) indicou que os dados da regional Caxias do Sul não apresentaram distribuição normal.

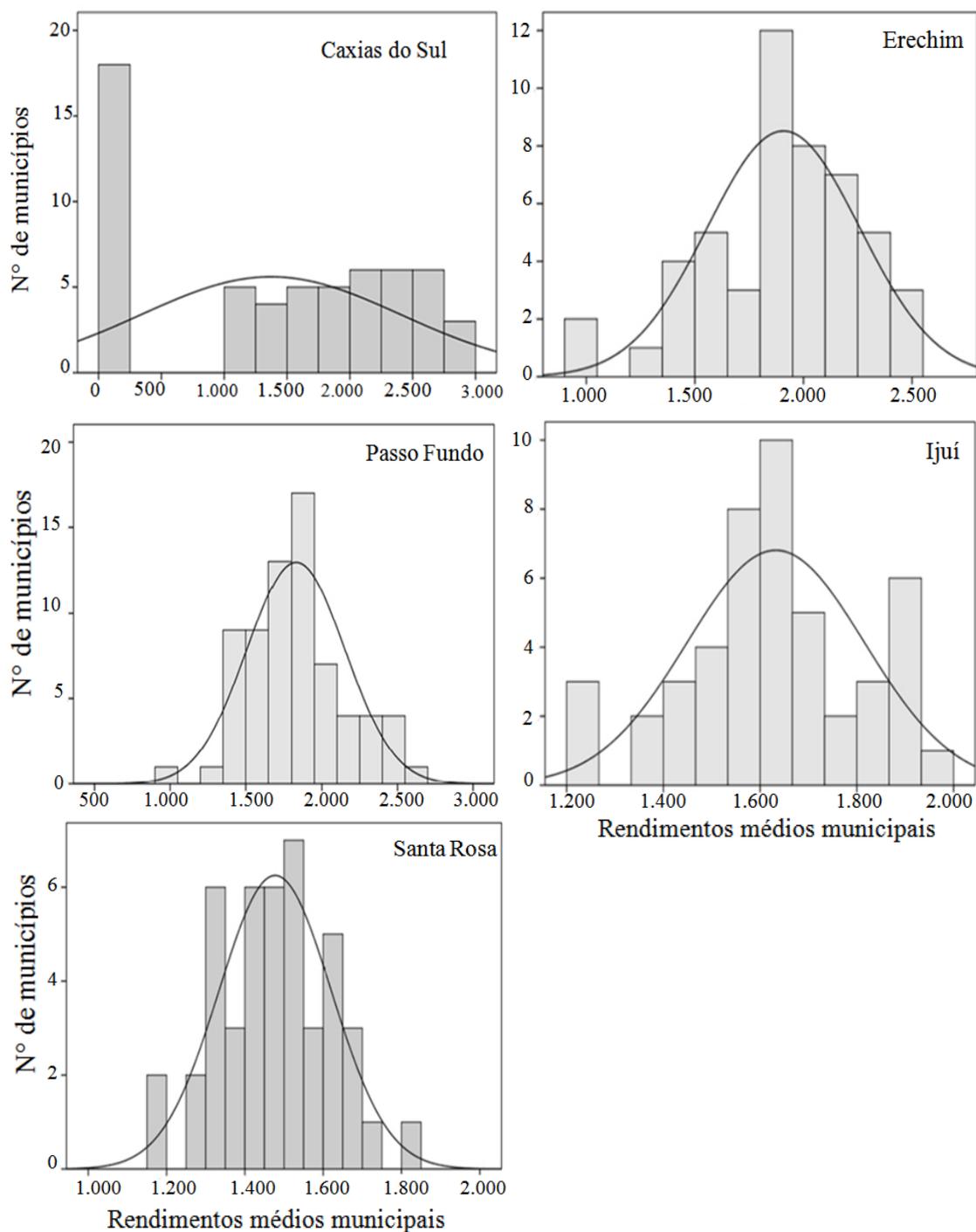


FIGURA 13. Distribuição de frequências dos rendimentos médios municipais de grãos de trigo das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa. Média 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).

O teste de Kolmogorov-Smirnov confirmou a não normalidade dos dados de rendimento médio municipal na regional Caxias do Sul (Tabela 8). Além disso, na regional Caxias do Sul, a média dos rendimentos médios municipais (1.372 kg ha^{-1}) foi inferior à mediana (1.500 kg ha^{-1}) e não se situou na classe de maior frequência (0 a 500 kg ha^{-1}) (Tabela 8). O coeficiente de variação dos dados foi elevado (75%). Esses resultados foram decorrentes da existência, no conjunto de dados, de 18 municípios que não apresentaram, nos anos analisados, dados oficiais de área cultivada e quantidade produzida de grãos, variáveis empregadas na obtenção do rendimento de grãos municipal. Os rendimentos médios municipais, nas demais regionais, tiveram distribuição normal. A média foi próxima da mediana e localizada na classe de maior frequência, logo, representativa dos rendimentos médios municipais de grãos de trigo. O teste de Kolmogorov-Smirnov confirmou a distribuição normal dos dados nas regionais Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa.

TABELA 8. Estatísticas descritivas (média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação) e teste de normalidade dos dados (Kolmogorov-Smirnov) de rendimentos municipais de grãos de trigo, nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).

	Caxias do Sul	Erechim	Passo Fundo	Ijuí	Santa Rosa
Nº municípios	58	50	70	47	45
Média	1.372	1.908	1.829	1.632	1.477
Mediana	1.500	1.935	1.827	1.633	1.489
Desvio padrão	1.032	351	323	184	144
Coef. Variação	75%	18%	18%	11%	10%
Valor igual a 0	Sim (18)	Não	Não	Não	Não
Classe (maior frequência)	0 a 500	1.501 a 2000	1.501 a 2000	1.501 a 2000	1.001 a 1.500
Distribuição normal (Kolmogorov-Smirnov)	Significativo	Não significativo	Não significativo	Não significativo	Não significativo

Na análise de agrupamentos pelo método de Ward, foram formados três grupos similares quanto ao rendimento municipal de grãos de trigo nos anos 2001 a 2008

(Figura 14). O rendimento médio foi de 1.444 kg ha^{-1} (grupo 1), 1.746 kg ha^{-1} (grupo 2) e 2.283 kg ha^{-1} (grupo 3), sendo estes denominados, respectivamente, de grupo de baixos, médios e altos rendimentos municipais de grãos de trigo. No grupo de baixos rendimentos foram inseridos 76 municípios, no de médios rendimentos, 88 municípios e, no de altos rendimentos, 71 municípios. Trinta e cinco municípios não foram inseridos nos grupos formados em função de não apresentarem dados oficiais de área colhida e quantidade produzida de grãos de trigo em, no mínimo, um dos anos analisados. Destes 35 municípios, 30 estão localizados na regional Caxias do Sul e, destes, 18 não apresentaram dados oficiais em nenhum dos anos analisados. Estes municípios, considerados não produtores, localizaram-se na porção leste da regional Caxias do Sul.

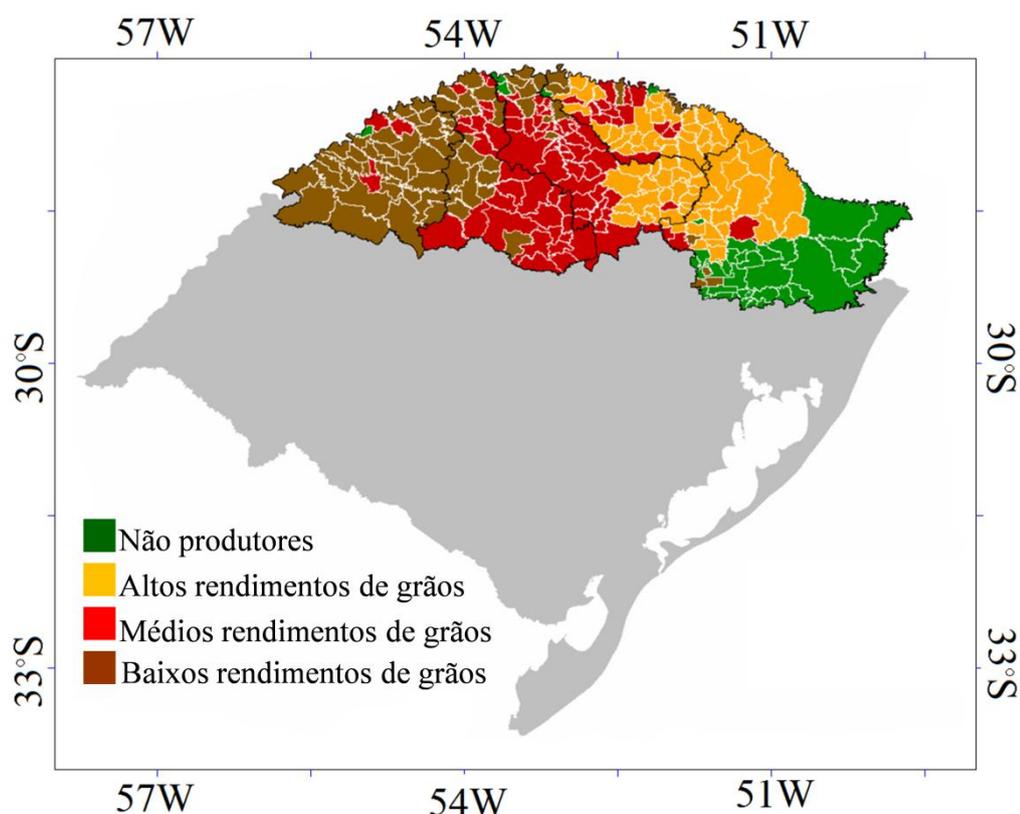


FIGURA 14. Grupos homogêneos de municípios quanto ao rendimento municipal de grãos de trigo no período de 2001 a 2008. Fonte dos dados: LSPA/IBGE (2010).

A análise de agrupamentos, bem como a espacialização desta, identificou as diferenças em termos de rendimento de grãos de trigo, entre as regionais, e, principalmente, entre municípios que compõem uma mesma regional.

Apesar da existência de maior número de municípios não produtores na regional Caxias do Sul, comparativamente as demais, todos municípios produtores estão inseridos no grupo de altos rendimentos. Os municípios não produtores estão localizados na porção leste da regional.

Os municípios da regional Erechim foram inseridos nos grupos de altos e médios rendimentos. Os municípios Ametista do Sul e Mariano Moro foram identificados como não produtores de trigo.

Os municípios da regional Passo Fundo foram inseridos nos três grupos, da seguinte maneira: aqueles localizados próximos à regional Caxias do Sul pertenceram ao grupo de altos rendimentos, os localizados na porção central da regional pertenceram ao grupo de médios rendimentos, e os municípios localizados próximos à regional Ijuí foram inseridos no grupo de baixos rendimentos. Palmitinho e Pinheirinho do Vale foram considerados municípios não produtores.

Nas regionais Ijuí e Santa Rosa, a maioria dos municípios pertenceu ao grupo de baixos rendimentos. Na regional Ijuí todos os municípios foram considerados produtores. Na regional Santa Rosa, Porto Vera Cruz foi o município pertencente ao grupo de municípios não produtores de trigo.

A análise de agrupamentos foi considerada uma técnica estatística exploratória eficiente na detecção de municípios semelhantes, no que diz respeito ao rendimento de grãos de trigo. A análise de agrupamentos evidenciou a existência de gradiente no sentido leste-oeste dos rendimentos de grãos de trigo, concordando com a variação do quociente fototermal no Estado (Cunha *et al.*, 2005).

Diferenças de rendimento de grãos de trigo, existentes entre municípios vizinhos, pertencentes ou não a uma mesma regional, podem ser associadas às características edafo-climáticas, sistemas de manejo, cultivares e demais fatores determinantes da produção de grãos. Nesse sentido, os grupos formados neste trabalho, homogêneos quanto ao rendimento municipal de grãos de trigo, apresentaram semelhança espacial com as regiões ecoclimáticas do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 15), quais sejam Alto e Médio Vale do Uruguai, Planalto Médio e Planalto Superior Serra do Nordeste. As onze regiões ecoclimáticas do Estado foram definidas de acordo com a vegetação natural e a amplitude das variáveis temperatura do ar, soma térmica, horas de frio, temperatura da superfície do solo, geadas, precipitação pluvial, número de dias de chuva, evaporação, evapotranspiração potencial, excesso e deficiência hídrica, umidade relativa do ar, insolação e radiação solar global (Maluf e Caiaffo, 2001).

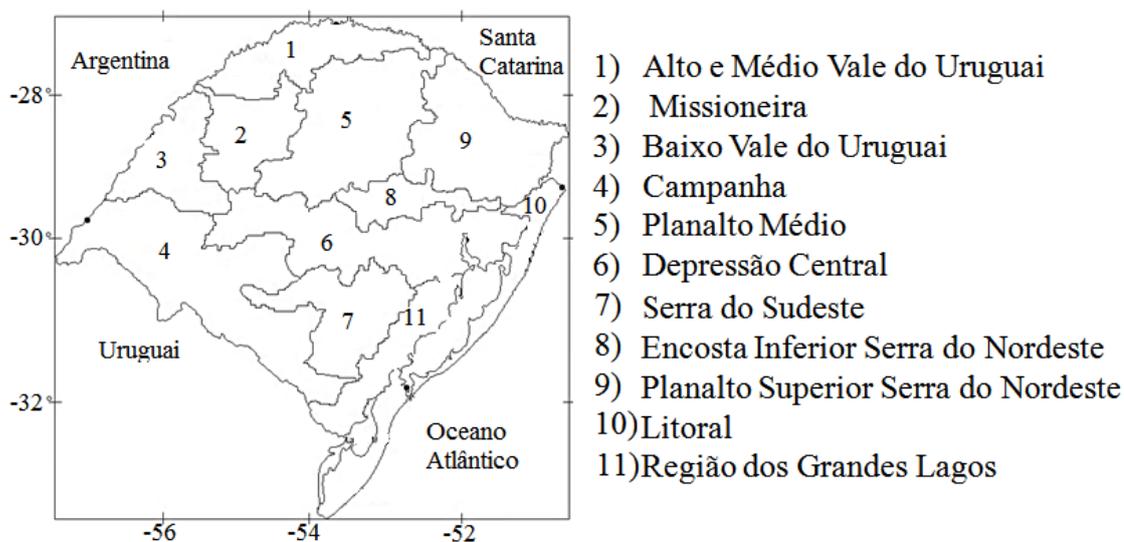


FIGURA 15. Regiões ecoclimáticas do Estado do Rio Grande do Sul. Fonte: adaptado de Rio Grande do Sul (1994).

4.2 Calendários agrícolas

A análise dos dados oficiais de área cultivada indicou que, dentre os cereais de estação fria, o trigo é a principal cultura produtora de grãos estabelecida na região de estudo. Responsáveis por mais de 80% da produção de grãos de trigo, as regionais analisadas compõem a principal região tritícola do Rio Grande do Sul. A partir desta informação, justifica-se o ajuste de modelos de estimativa de rendimento de grãos de trigo.

A fim de que os modelos ajustados fossem condizentes com a realidade da produção de trigo, nas diferentes regionais, foi necessário caracterizar o ciclo da cultura. A caracterização do ciclo foi realizada com os calendários agrícolas da EMATER/RS.

Os calendários agrícolas permitiram a localização, no tempo, das principais etapas do ciclo da cultura.

As etapas do ciclo também foram relacionadas às necessidades bioclimáticas da cultura. A associação entre tempo (mês, quinzena), calendário agrícola (etapa do ciclo) e necessidades climáticas (temperatura do ar e precipitação pluvial) foi fundamental para o ajuste dos modelos de estimativa de rendimento de grãos. Isso porque, em modelos nos quais são inseridas variáveis meteorológicas mensais, é necessário avaliar se a variável tem, efetivamente, atuação na definição do rendimento de grãos, considerando a etapa do ciclo em que as lavouras se encontravam, no mês em questão. Assim, procurou-se evitar a inserção nos modelos de variáveis agrometeorológicas e espectrais cuja relação com o rendimento de grãos fosse espúria.

A caracterização do ciclo das culturas por meio de calendários agrícolas também auxiliou na interpretação dos perfis temporais de NDVI/MODIS das regionais. Nesse sentido, foi possível associar a variação temporal do NDVI aos estádios de desenvolvimento em que se encontravam as lavouras.

Os calendários agrícolas médios (Figura 16) identificaram variação temporal do ciclo da cultura do trigo, no sentido oeste-leste da região de estudo.

Na regional Santa Rosa, em mais de 50% da área cultivada as lavouras de trigo estiveram em crescimento vegetativo na segunda quinzena de junho. Na regional Caxias do Sul, a mesma porcentagem de área cultivada com lavouras em crescimento vegetativo foi atingida, na média dos anos, um mês depois, ou seja, na segunda quinzena de julho. Estes resultados foram condizentes com o período recomendado de semeadura de trigo.

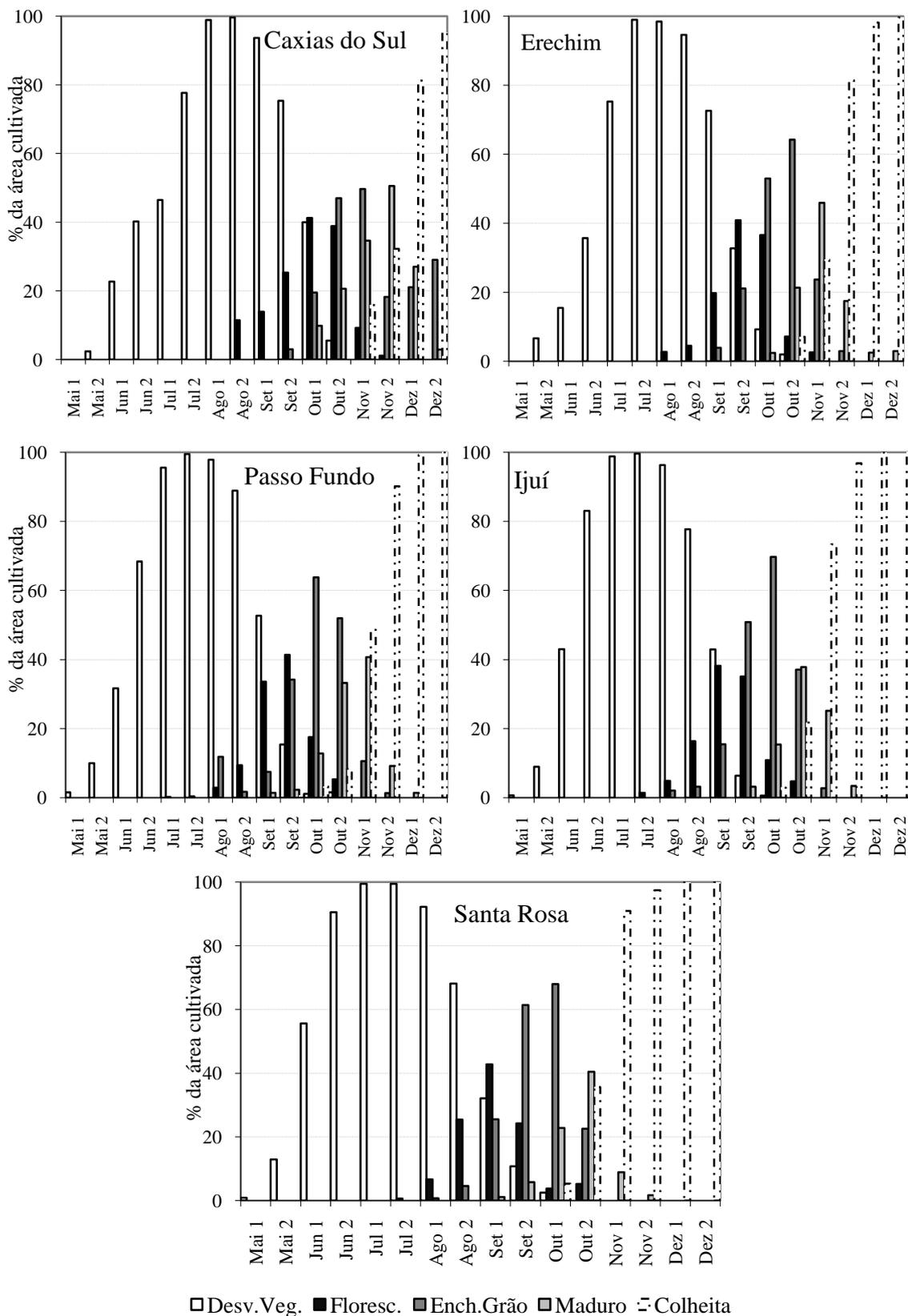


FIGURA 16. Porcentagem de área cultivada na qual as lavouras de trigo se encontravam em desenvolvimento vegetativo, florescimento, enchimento de grãos, maturação fisiológica e colheita nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 1999 a 2009. Fonte dos dados: EMATER/RS (2010).

Na regional Santa Rosa, 25 dos 45 municípios têm recomendação de início da semeadura na primeira quinzena de maio (Cunha *et al.*, 2001). Em Caxias do Sul, para 48 dos 58 municípios a recomendação é de início da semeadura na primeira quinzena de junho (Cunha *et al.*, 2001). Assim, em ambas regionais, cerca de 30 dias decorreram desde a implantação até, no mínimo, 50% da área cultivada apresentarem lavouras em desenvolvimento vegetativo.

De acordo com os calendários agrícolas médios, nas demais regionais, em mais de 50% da área cultivada as lavouras de trigo encontraram-se em desenvolvimento vegetativo na segunda quinzena de junho (Ijuí e Passo Fundo) e na primeira quinzena de julho (Erechim).

Durante o desenvolvimento vegetativo, as plantas de trigo podem ser afetadas negativamente pela ocorrência de altas temperaturas do ar, que provocam a aceleração do ciclo (menor duração do período entre a emergência e o florescimento) (Mundstock, 1999). Como consequência da aceleração do ciclo, as plantas apresentam folhas pequenas e flores e espiguetas em número reduzido (Mundstock, 1999). Ao longo do crescimento vegetativo, a sensibilidade da cultura às baixas temperaturas do ar é menor. No entanto, baixas temperaturas do ar podem provocar danos às folhas (necrose) ou rompimento das paredes celulares nos pontos de crescimento/alongamento dos entrenós (estrangulamento do colmo) (Scheeren *et al.*, 2000).

Os diagramas de dispersão dos dados indicaram que o florescimento, na maior parte da área cultivada de trigo, ocorreu no mês de setembro (Figura 17).

Na média dos anos analisados, na maior parte da área cultivada, o trigo encontrava-se em florescimento na primeira quinzena de setembro nas regionais Santa Rosa e Ijuí, e na segunda quinzena de setembro nas regionais Erechim e Passo Fundo. Em Caxias do Sul, na maior parte da área cultivada, o trigo estava em florescimento em

outubro (aproximadamente 40% da área em cada quinzena). No caso da regional Erechim, embora as lavouras em 41% da área cultivada de trigo tenham se encontrado em florescimento na segunda quinzena de setembro, porcentagem semelhante de área cultivada (aproximadamente 37%) floresceu na primeira quinzena de outubro.

Estes resultados indicaram que setembro é mês crítico para definição da produção de grãos de trigo no Estado, pois no florescimento é definido o número de grãos por espiga, um dos principais componentes do rendimento. Condições ambientais adversas, neste estágio, podem afetar o processo de fertilização e o início da formação de grãos (Mundstock, 1999).

A partir do florescimento as plantas de trigo são prejudicadas por baixas temperaturas do ar em função da desidratação das células provocada pelo congelamento do líquido intercelular, que pode provocar a esterilidade das estruturas reprodutivas e a conseqüente não formação dos grãos (Mundstock, 1999).

Para a cultura do trigo, uma importante etapa do ciclo de desenvolvimento das plantas é a antese. A disponibilidade de radiação solar e a temperatura do ar, em um período de 30 dias em torno da data da antese, podem afetar o rendimento de grãos (Cunha *et al.*, 2009). Nesse sentido, a radiação solar afeta o número de grãos por unidade de superfície, em função de uma relação linear positiva com a taxa de crescimento da cultura (acúmulo de biomassa). A temperatura do ar, por sua vez, afeta negativamente o número de grãos, por acelerar o desenvolvimento da planta no período crítico entre 20 dias antes e 10 dias após a antese. A relação entre a radiação solar e a temperatura do ar, expressa na forma de quociente fototermal, determina, na ausência de fatores limitantes, o potencial de rendimento de grãos nas diferentes zonas de produção de trigo no Rio Grande do Sul (Cunha *et al.*, 2009).

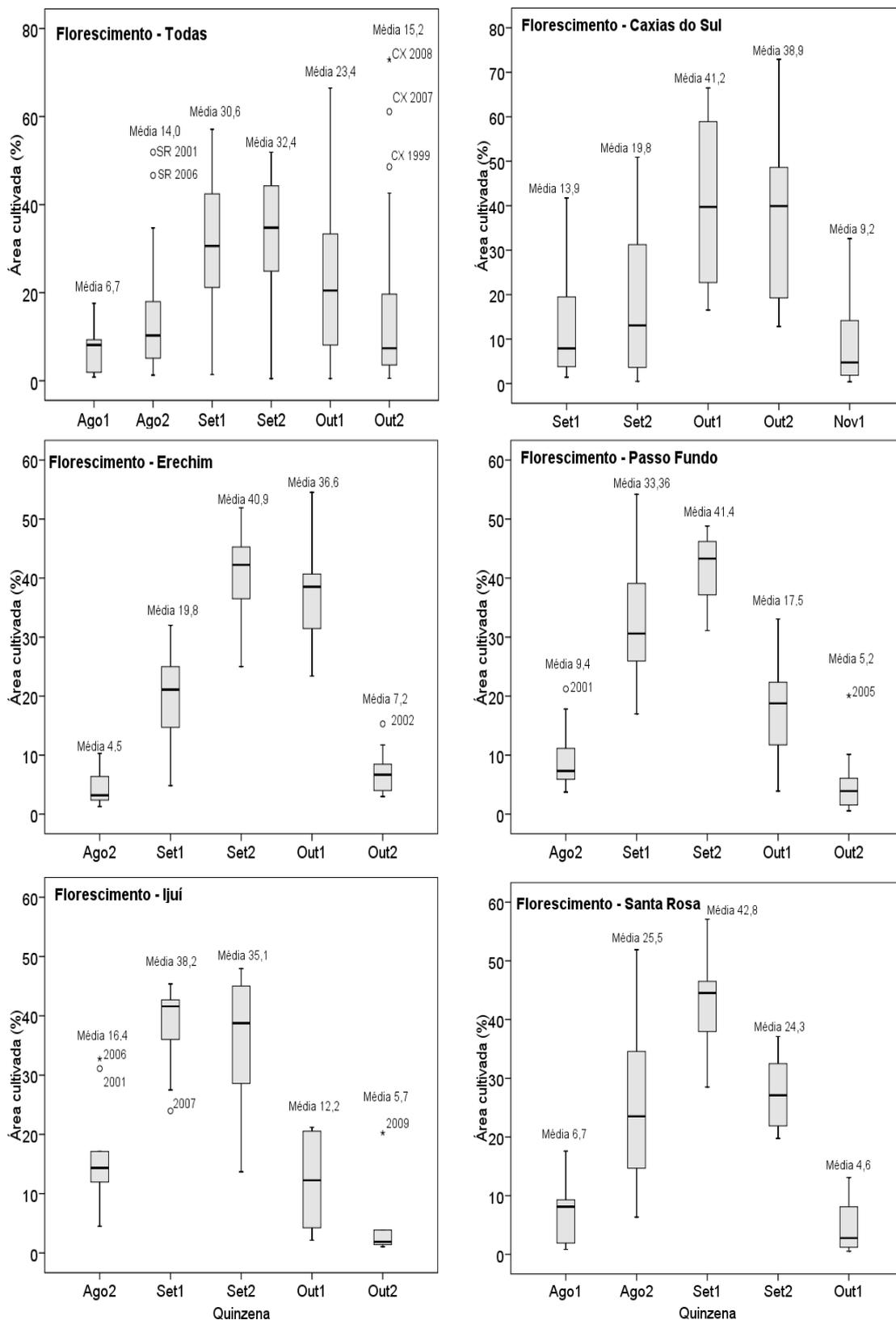


FIGURA 17. Diagramas de dispersão dos dados de porcentagem de área cultivada de trigo em florescimento nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa e no conjunto dos dados (todas), 1999 a 2009. Fonte dos dados: EMATER/RS (2010).

Considerando os dados de todas as regionais, na maior parte da área cultivada o trigo encontrou-se em enchimento de grãos no mês de outubro (56,7% da área cultivada na primeira e 45,6% na segunda quinzena) (Figura 18). Na primeira quinzena de outubro as lavouras de trigo estavam em enchimento de grãos em 68%, 69,7% e 63,8% da área cultivada nas regionais Santa Rosa, Ijuí e Passo Fundo, na média dos anos, respectivamente. A segunda quinzena de outubro foi quando, na maior parte da área cultivada na regional Erechim (64,2%), o trigo encontrou-se em enchimento de grãos. Na regional Caxias do Sul o enchimento de grãos, na média dos anos, concentrou-se na segunda quinzena de outubro (47% da área cultivada) e primeira quinzena de novembro (49,6%).

No enchimento de grãos é definido o componente do rendimento peso do grão. Nesta etapa do ciclo, as variáveis meteorológicas que podem afetar negativamente o rendimento de grãos são a temperatura do ar e a precipitação pluvial. Decréscimos na taxa de enchimento de grãos podem ser causados por “golpes de calor” (temperatura do ar superior a 32°C por dois ou mais dias) (Mundstock, 1999). Altas temperaturas afetam negativamente o peso do grão em função da redução de deposição de amido, o que também compromete a qualidade industrial dos grãos (Franceschi *et al.*, 2009).

O excesso de precipitação pluvial afeta negativamente o rendimento de grãos em função da menor disponibilidade de radiação solar (que diminui a fotossíntese líquida e, conseqüentemente, o aporte de fotoassimilados aos grãos), além de favorecer a ocorrência de doenças de espiga.

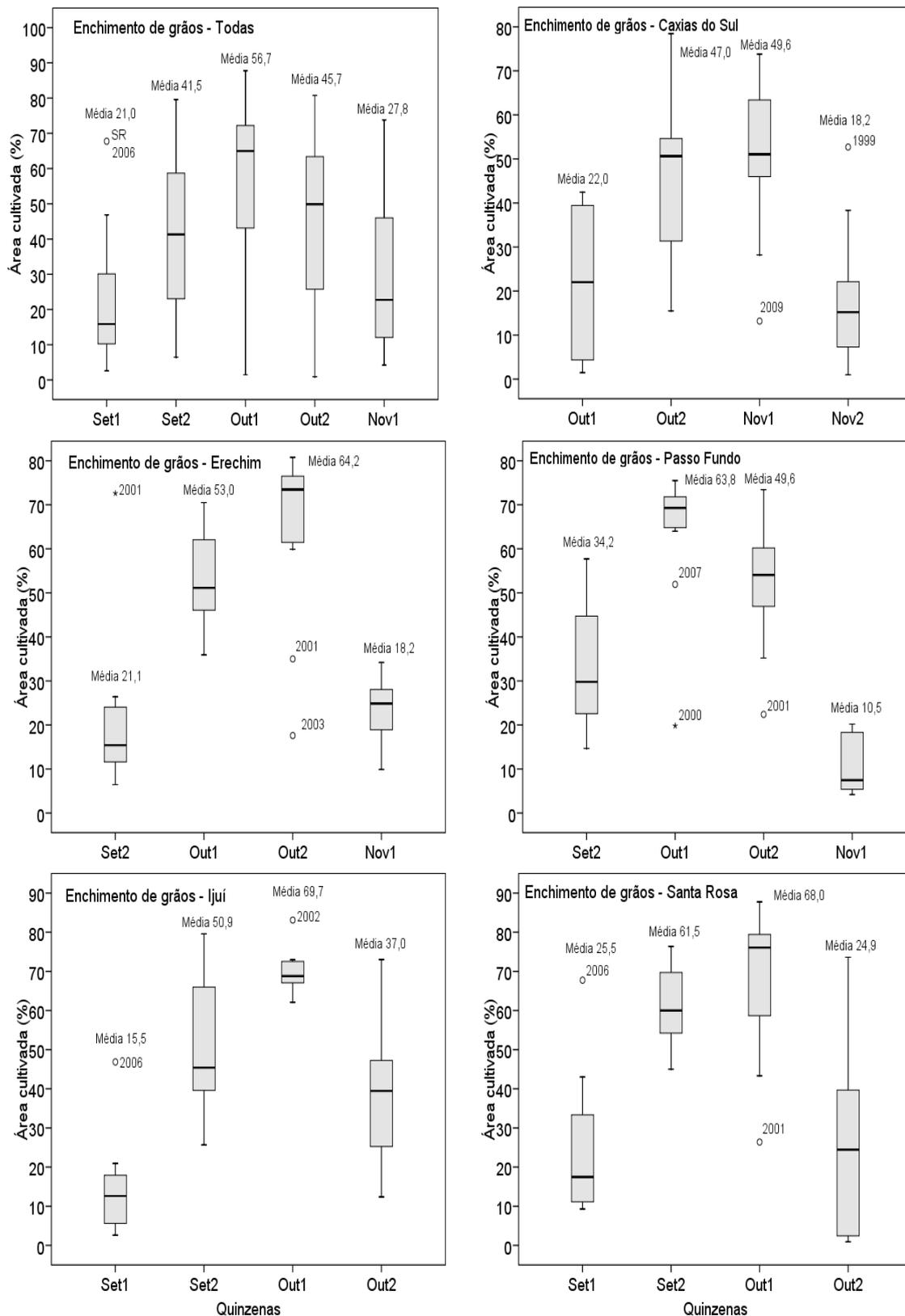


FIGURA 18. Diagramas de dispersão dos dados de porcentagem de área cultivada de trigo em enchimento de grãos nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa e no conjunto dos dados (todas), 1999 a 2009. Fonte dos dados: EMATER/RS (2010).

Considerando os dados de todas as regionais, a maturação fisiológica do trigo ocorreu, em 33% da área cultivada, na segunda quinzena de outubro (Figura 19). Esta porcentagem de área cultivada foi semelhante à da primeira quinzena de novembro (31,3%), de maneira que ambas podem ser consideradas na caracterização temporal desta etapa do ciclo da cultura. Analisando-se os dados das regionais foi possível verificar que na maior parte da área cultivada, a maturação fisiológica das lavouras ocorreu nas seguintes quinzenas: segunda de outubro (regionais Santa Rosa e Ijuí), primeira de novembro (regionais Passo Fundo e Erechim) e segunda de novembro (regional Caxias do Sul).

A partir da maturação fisiológica, os grãos de trigo podem ser afetados pela ocorrência de germinação pré-colheita. Com a germinação ocorre o consumo das reservas acumuladas no grão e redução do peso (principal componente do rendimento afetado) (Guarienti *et al.*, 2003). Para a germinação ocorrer é necessário que o grão absorva água. Dessa maneira, a principal variável meteorológica que atua na definição do rendimento de grãos nesta etapa do ciclo é a precipitação pluvial. É importante salientar que condições de elevada umidade do ar favorecem o desenvolvimento de doenças, especialmente fúngicas (Cunha *et al.*, 2009; Mundstock, 1999), que afetam negativamente o rendimento de grãos de trigo (Guarienti *et al.*, 2003; Pria, 2005).

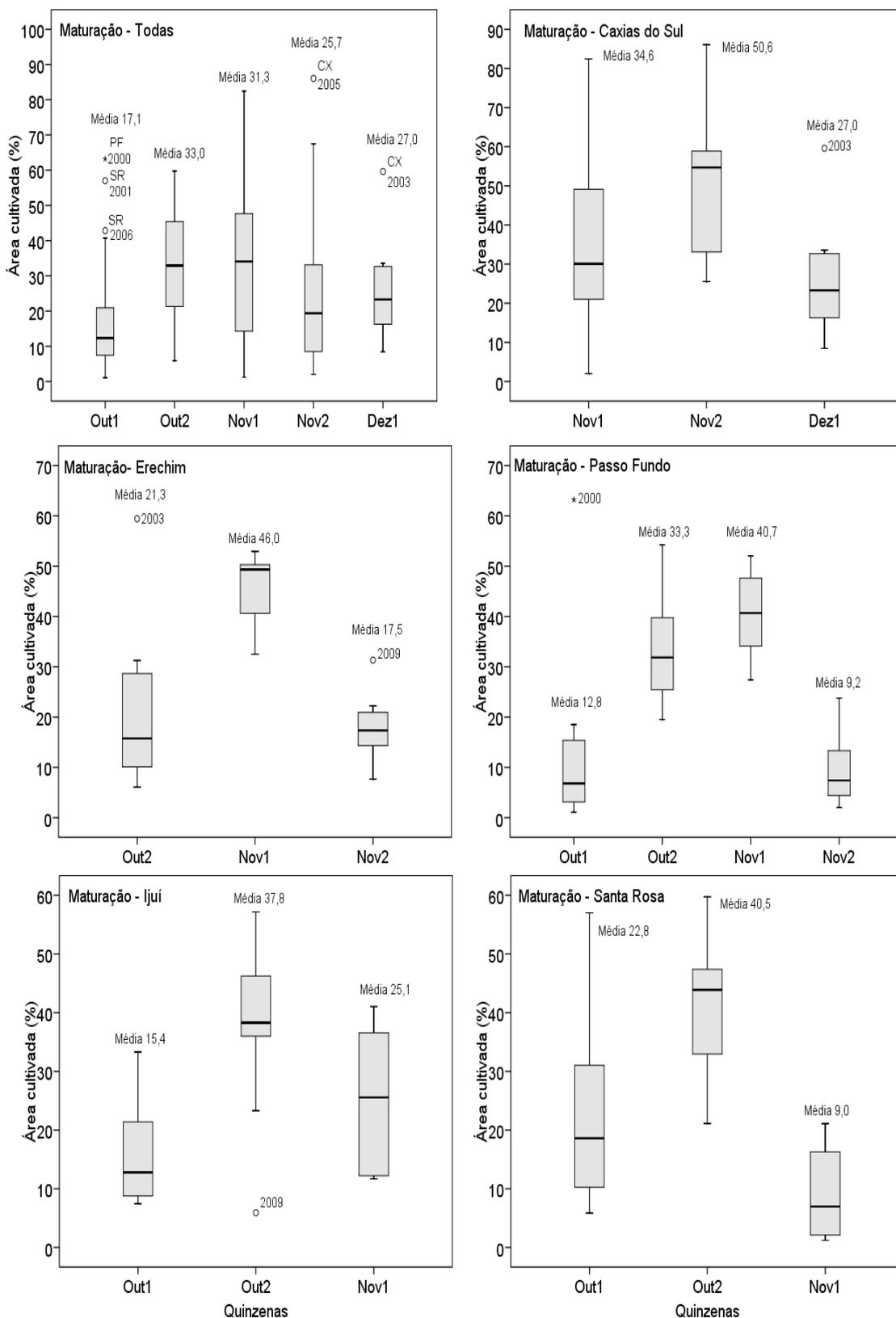


FIGURA 19. Diagramas de dispersão dos dados de porcentagem de área cultivada de trigo em maturação fisiológica nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 1999 a 2009. Fonte dos dados: EMATER/RS (2010).

A colheita, embora não seja um estágio fenológico, é uma etapa importante do ciclo das culturas agrícolas. Na média dos anos, mais de 50% da área cultivada de trigo já tinham sido colhidos na primeira quinzena de novembro nas regionais (Figura 20). Mais de 50% da área cultivada com trigo foram colhidos na primeira quinzena de novembro nas regionais Santa Rosa e Ijuí e segunda quinzena de novembro nas regionais Passo Fundo e Erechim. Na regional Caxias do Sul, a colheita ocorreu na primeira quinzena de dezembro.

A colheita do trigo deve ser realizada quando os grãos estiverem com teor de umidade menor que 14% (ou menor que 25%, caso o grão passe, posteriormente, por processo de secagem). A recomendação é de que os grãos sejam colhidos tão logo a umidade ideal seja atingida, a fim de evitar prejuízos à qualidade e ao poder germinativo (Comissão, 2004). Precipitações pluviais intensas ou frequentes podem reduzir o rendimento de grãos por impedirem a colheita no momento adequado.

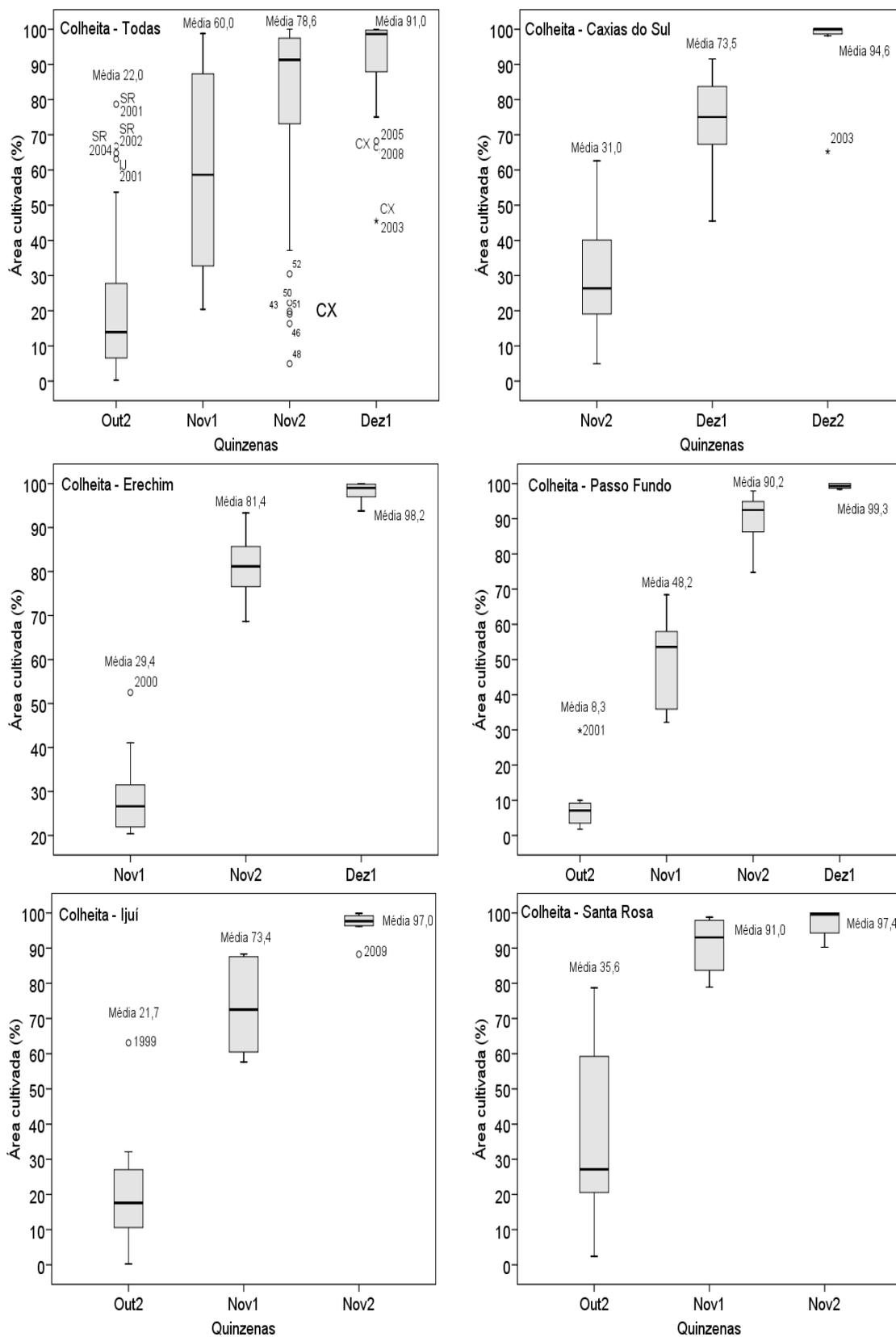


FIGURA 20. Diagramas de dispersão dos dados de porcentagem de área de trigo colhida nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa e no conjunto dos dados (todas), 1999 a 2009. Fonte dos dados: EMATER/RS (2010).

As quinzenas em que as lavouras de trigo da maior parte da área cultivada encontraram-se nas etapas do ciclo analisadas foram semelhantes para as regionais Santa Rosa e Ijuí, e para as regionais Passo Fundo e Erechim (Tabela 9).

TABELA 9. Quinzenas nas quais as lavouras de trigo se encontraram em florescimento, enchimento de grãos, maturação fisiológica e colheita, na maior parte da área cultivada nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 1999 a 2009. Fonte dos dados: EMATER/RS (2010).

Etapas do ciclo	Quinzena	Regionais
Florescimento	1 ^a Setembro	Santa Rosa e Ijuí
	2 ^a Setembro	Passo Fundo e Erechim
	1 ^a Outubro	Caxias do Sul
Enchimento de grãos	1 ^a Outubro	Santa Rosa, Ijuí e Passo Fundo
	2 ^a Outubro	Erechim e Caxias do Sul
	1 ^a Novembro	Caxias do Sul
Maturação Fisiológica	2 ^a Outubro	Santa Rosa e Ijuí
	1 ^a Novembro	Passo Fundo e Erechim
	2 ^a Novembro	Caxias do Sul
Colheita (mais de 50% da área cultivada)	1 ^a Novembro	Santa Rosa e Ijuí
	2 ^a Novembro	Passo Fundo e Erechim
	1 ^a Dezembro	Caxias do Sul

A caracterização do ciclo da cultura do trigo foi realizada em termos de área cultivada média. Os diagramas de caixa também mostraram a dispersão dos dados e os valores atípicos. A dispersão dos dados pode auxiliar na interpretação dos perfis temporais de NDVI/MODIS, dado que o valor do índice, a cada 16 dias, também sofre variações interanuais. Da mesma maneira, a identificação de valores atípicos pode auxiliar na caracterização de uma determinada safra agrícola, servindo de base para estudos de caso.

As porcentagens de redução da expectativa inicial de rendimento de grãos de trigo decorrente de evento meteorológico (quebras de safras) foram maiores a partir da segunda quinzena de agosto (Figura 21). Os dados referentes às quinzenas anteriores

não foram mostrados, pois, nestas, as quebras de safra foram inferiores a 5%, na média dos anos dos anos analisados.

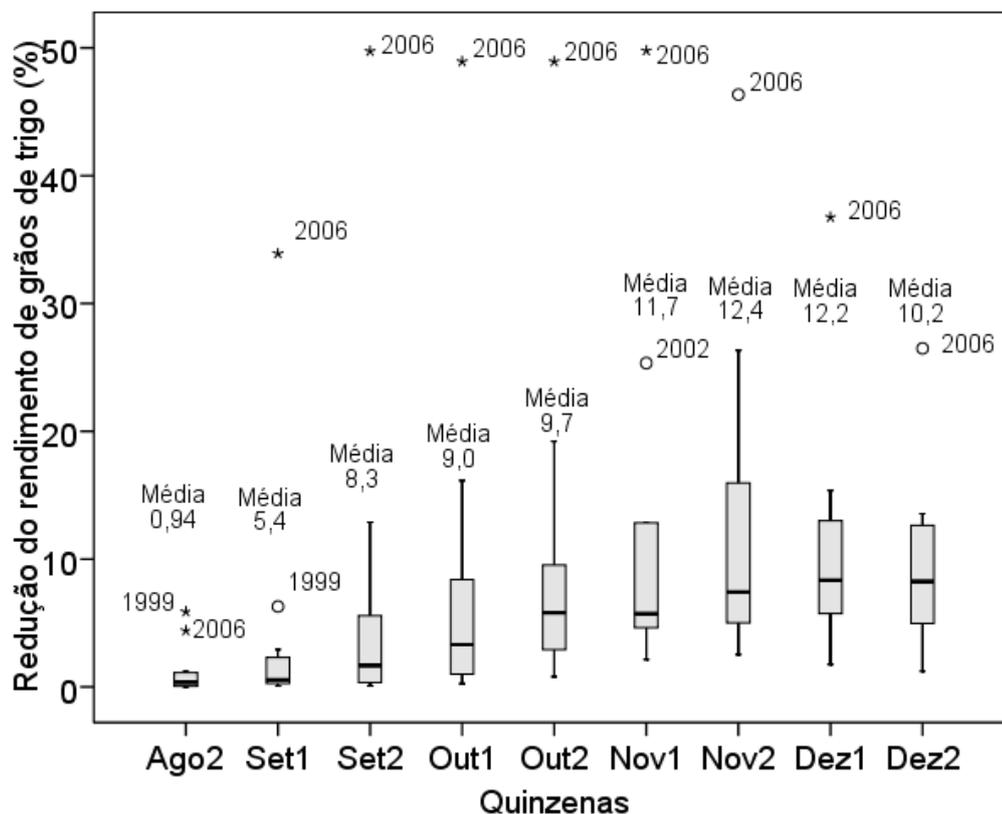


FIGURA 21. Diagramas de dispersão da porcentagem de redução da expectativa inicial de rendimento de grãos de trigo decorrente de eventos meteorológicos adversos (quebras de safras). Dados da segunda quinzena de agosto à segunda quinzena de dezembro para o Rio Grande do Sul, 1999 a 2009. Fonte dos dados: EMATER/RS (2010).

No Estado, a redução do rendimento de grãos decorrente de eventos meteorológicos adversos foi inferior a 1% em agosto, na média dos anos. Em setembro a quebra de safra foi maior, comparativamente a do mês anterior: 5,4% e 8,3% na primeira e segunda quinzenas de setembro, respectivamente. Nas etapas finais do ciclo da cultura as quebras variaram de 11,7%, na primeira quinzena de novembro a 12,4% na primeira quinzena de dezembro. É importante salientar que reduções no rendimento de grãos ocorridas em setembro tendem ser incluídas nos dados de novembro, ou seja, a informação é cumulativa.

Em 2006, a porcentagem de redução do rendimento de grãos de trigo foi superior à porcentagem dos anos anteriores no Rio Grande do Sul. As quebras ocorridas da segunda quinzena de agosto à segunda de dezembro foram consideradas valores atípicos no conjunto de dados. Em 2006, eventos meteorológicos adversos provocaram redução de 34% no rendimento de grãos de trigo na primeira quinzena de setembro e, na segunda quinzena, esta redução chegou a 50%. Estes dados confirmaram que a menor área colhida de trigo, a menor produção e, conseqüentemente, o menor rendimento de grãos, observados nas estimativas oficiais de 2006, foram provocados por eventos meteorológicos que afetaram negativamente as lavouras de trigo. Estes eventos meteorológicos atingiram a cultura em setembro, quando o trigo estava em florescimento na maior parte da área cultivada. Embora seja considerado um ano atípico em termos de quebra de safra, os dados de 2006 confirmam o mês de setembro como crítico para a cultura do trigo. As geadas, ocorridas no final de agosto e início de setembro foram as principais responsáveis pelas quebras de safras de trigo em 2006, conforme verificado por Junges *et al.* (2008).

4.3 Perfis temporais de NDVI/MODIS

Os perfis de NDVI/MODIS resultantes da análise regional, das máscaras de cultivos e das classes permitiram o acompanhamento da evolução temporal do índice de vegetação, de abril a dezembro, nas regionais analisadas.

Os perfis resultantes da aplicação de metodologias de realce de áreas agrícolas foram considerados adequados para o monitoramento dos cultivos. Estes perfis indicaram a evolução temporal de NDVI característica de áreas agrícolas. Nesse sentido, menores valores de NDVI ocorreram nos meses de abril e maio, período de semeadura das lavouras de cereais de estação fria, na região de estudo. Os valores máximos

ocorreram entre agosto e outubro, quando as lavouras se encontraram em florescimento e início da formação dos grãos. Dessa maneira, os perfis temporais de NDVI/MODIS das máscaras de cultivo e das classes puderam ser associados ao calendário da cultura do trigo, nas regionais analisadas.

4.3.1 Regionais

Os perfis temporais de NDVI/MODIS médios das regionais Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa forma semelhantes quanto à evolução temporal do índice de vegetação (Figura 22). Os menores valores de NDVI ocorreram na segunda quinzena de abril e foram crescentes até agosto (máximos). De agosto à segunda quinzena de novembro os valores foram decrescentes. A partir da segunda quinzena de novembro os valores voltaram a aumentar. Embora a evolução temporal de NDVI/MODIS tenha sido semelhante nestas regionais, a amplitude dos valores foi distinta: em Erechim, a amplitude foi de 0,04 unidades do índice (mínimo de 0,63 em abril 2 e máximo de 0,67 em agosto), em Passo Fundo, de 0,12 (mínimo de 0,57 em abril 2 e máximo de 0,69 em agosto), em Ijuí, de 0,18 (mínimo de 0,53 em abril 2 e máximo de 0,71 em agosto) e, em Santa Rosa, de 0,07 (mínimo de 0,60 em abril 2 e máximo de 0,67 em agosto).

Em virtude da maior amplitude dos valores de NDVI, os perfis temporais médios das regionais Passo Fundo e Ijuí foram, comparativamente, mais semelhantes ao perfil típico de áreas agrícolas. Este resultado foi decorrente da maior porcentagem de área cultivada com cereais de estação fria, em termos de área total territorial, nestas regionais. A área destinada ao estabelecimento de lavouras de aveia branca, centeio, cevada, trigo e triticale, na média de 2000 a 2008, representou 13,3% da área territorial da regional Passo Fundo e 16% da área territorial da regional Ijuí. Por sua vez, nas

regionais Erechim e Santa Rosa, a área média destinada ao cultivo de cereais de estação fria foi de 8,9% e 10,7% da área territorial, respectivamente.

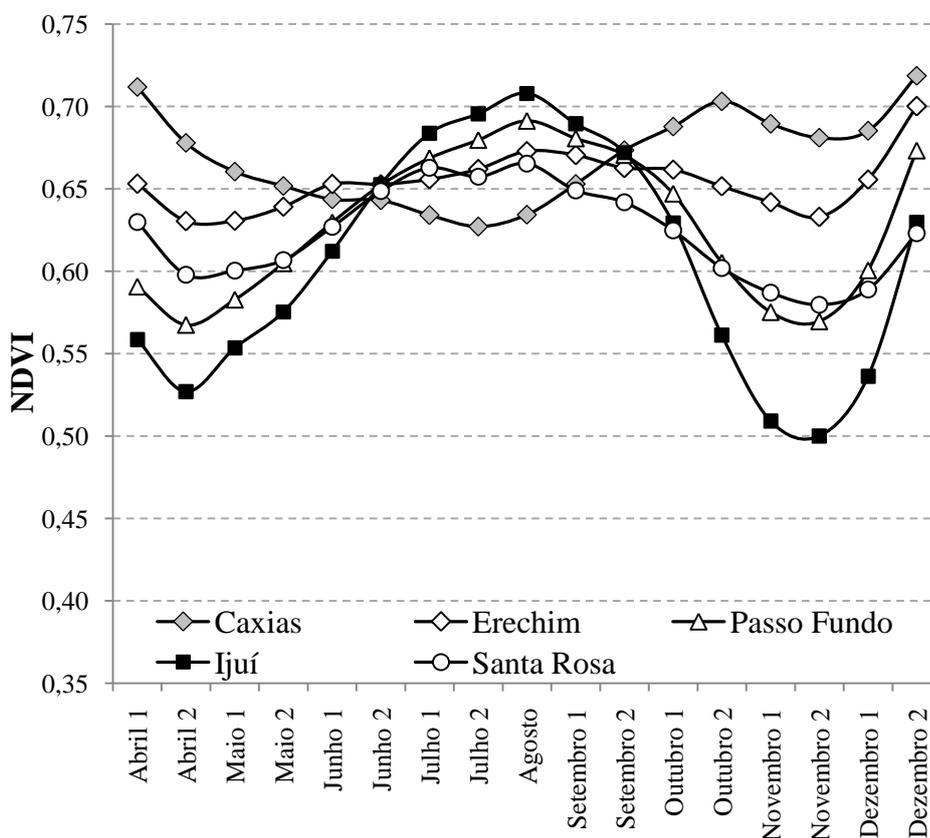


FIGURA 22. Perfis temporais de NDVI/MODIS, de abril a dezembro, das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 2000 a 2008.

A regional Caxias do Sul apresentou perfil temporal médio de NDVI/MODIS distinto dos perfis das demais regionais. Os valores do índice foram decrescentes de abril a julho (de 0,68 em abril 2 a 0,62 em julho 2) e crescentes de agosto a outubro (até 0,70 na segunda quinzena de outubro). Nesta regional, a porcentagem de área destinada ao cultivo de cereais de estação fria representou 2,4% da área territorial, na média dos anos. Assim, o perfil temporal de NDVI/MODIS na regional Caxias do Sul não foi considerado típico de lavouras.

Os perfis temporais de NDVI/MODIS corroboraram os perfis temporais de NDVI, obtidos para as macrozonas do Estado do Rio Grande do Sul por Jacóbsen *et al.* (2003), utilizando imagens AVHRR/NOAA (Figura 23).

Os perfis temporais de NDVI/MODIS das regionais Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa foram semelhantes ao perfil de áreas agrícolas (tipo 2). Áreas agrícolas do tipo 2 caracterizam-se pelo uso intensivo do solo, com lavouras agrícolas estabelecidas tanto no período de outono-inverno, quanto de primavera-verão (Jacóbsen *et al.*, 2003). O perfil temporal de NDVI/MODIS da regional Caxias do Sul foi semelhante ao perfil dos campos (campos sujos e Campos de Cima da Serra). Os perfis de áreas de campos caracterizam-se pelos baixos valores de NDVI no outono-inverno, período de menor crescimento da vegetação (Jacóbsen *et al.*, 2003).

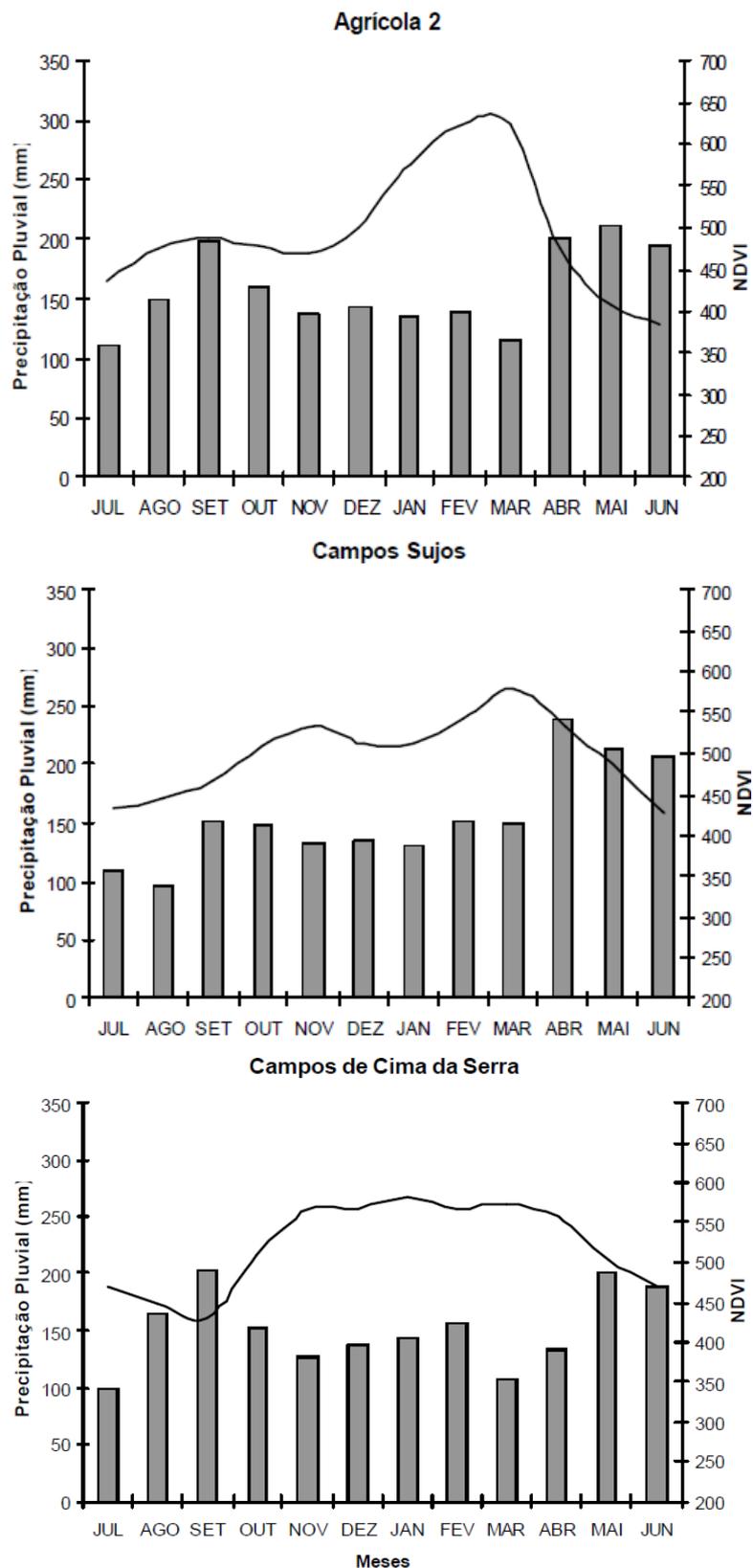


FIGURA 23. Perfis temporais de NDVI/NOAA das zonas de cobertura e uso do solo agrícola 2, campos sujos e Campos de Cima da Serra, no Planalto Meridional. Os valores de NDVI encontram-se multiplicados por 1000. Fonte: Jacóbsen *et al.*, 2003.

É importante salientar que, na geração dos perfis temporais de NDVI/MODIS regionais não foram aplicadas metodologias de identificação e realce de áreas agrícolas. Sendo assim, no perfil constaram valores de NDVI provenientes de áreas não destinadas ao cultivo agrícola, tais como corpos d'água, áreas urbanas e matas.

Os perfis regionais caracterizaram o padrão de variação do NDVI e mostraram que, no período de abril a dezembro, a evolução temporal deste índice de vegetação é distinta entre as regionais. As diferenças nos perfis temporais de NDVI/MODIS médios puderam ser associadas à dinâmica da vegetação predominante em cada uma das regionais. Nesse sentido, os perfis temporais expressaram a evolução do acúmulo de biomassa verde de culturas agrícolas somente quando estas predominam, em termos de área, na regional. Melo *et al.* (2008) ajustaram modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de grãos de soja para região norte do Rio Grande do Sul, no qual a variável espectral (NDVI) foi obtida de imagens AVHRR/NOAA. Nesse caso, como a soja é o cultivo de primavera-verão predominante, as estimativas foram precisas sem que houvesse a utilização de metodologias de realce de áreas agrícolas.

4.3.2 Máscaras de cultivos

Os perfis temporais de NDVI/MODIS médios, elaborados com base na metodologia de máscara de cultivos (Figura 24), refletiram a variação temporal do índice esperada de áreas agrícolas cultivadas no período de outono-inverno-primavera.

Os valores de NDVI foram menores (0,49 a 0,52) no período de implantação das lavouras (segunda quinzena de abril e primeira de maio) e crescentes (0,68 a 0,73) até agosto (para as regionais Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa) e setembro (0,70 para a regional Caxias do Sul). Os valores máximos de NDVI ocorreram em quinzenas próximas, mas anteriores, às quinzenas nas quais o trigo, na maior parte da área

cultivada, estava em florescimento (Tabela 9). Assim, os perfis temporais médios indicaram que o acúmulo de biomassa verde atingiu valor máximo no final do crescimento vegetativo. Em experimento com 20 genótipos de trigo, Moreira *et al.* (2005) encontraram maiores coeficientes de correlação entre fitomassa seca total da parte aérea e NDVI no florescimento e início do enchimento de grãos.

De agosto, setembro para a regional Caxias do Sul, até a segunda quinzena de novembro, os valores de NDVI decresceram. O decréscimo do NDVI pode ser atribuído ao processo de translocação de fotoassimilados aos grãos e à senescência das plantas, que ocorrem a partir do florescimento e do início do enchimento de grãos. Os baixos valores de NDVI em novembro (0,42 a 0,56) foram decorrentes da maturação fisiológica e da colheita dos cereais de estação fria. Os valores crescentes de NDVI a partir de dezembro indicaram a implantação e o início do desenvolvimento vegetativo das lavouras de primavera-verão, especialmente soja. Esta informação está de acordo com os perfis temporais de NDVI/MODIS de áreas de soja obtidos por Pinto e Fontana (2010).

Nos perfis temporais de NDVI/MODIS das áreas identificadas pelas máscaras de cultivo, a amplitude do índice de vegetação foi superior à amplitude verificada nos perfis regionais. A amplitude foi de 0,17 na regional Caxias do Sul, 0,16 (Erechim), 0,23 (Passo Fundo), 0,31 (Ijuí) e 0,21 (Santa Rosa). A metodologia de máscara de cultivos mostrou-se satisfatória para o realce das áreas com maiores variações temporais do NDVI no período de abril a dezembro. Estas áreas foram, possivelmente, de uso agrícola, dada as variações de biomassa da semeadura à colheita que ocorrem nas lavouras.

Os perfis temporais de NDVI/MODIS das áreas identificadas pelas máscaras de cultivo permitiram acompanhar o ciclo das culturas agrícolas estabelecidas no período

de outono-inverno-primavera. A metodologia de máscara de cultivo também foi empregada no realce de áreas agrícolas e monitoramento dos cultivos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul (Klering, 2007) e cereais de estação fria na região de abrangência da Cooperativa Cotrijal (norte do Estado) (Junges e Fontana, 2009).

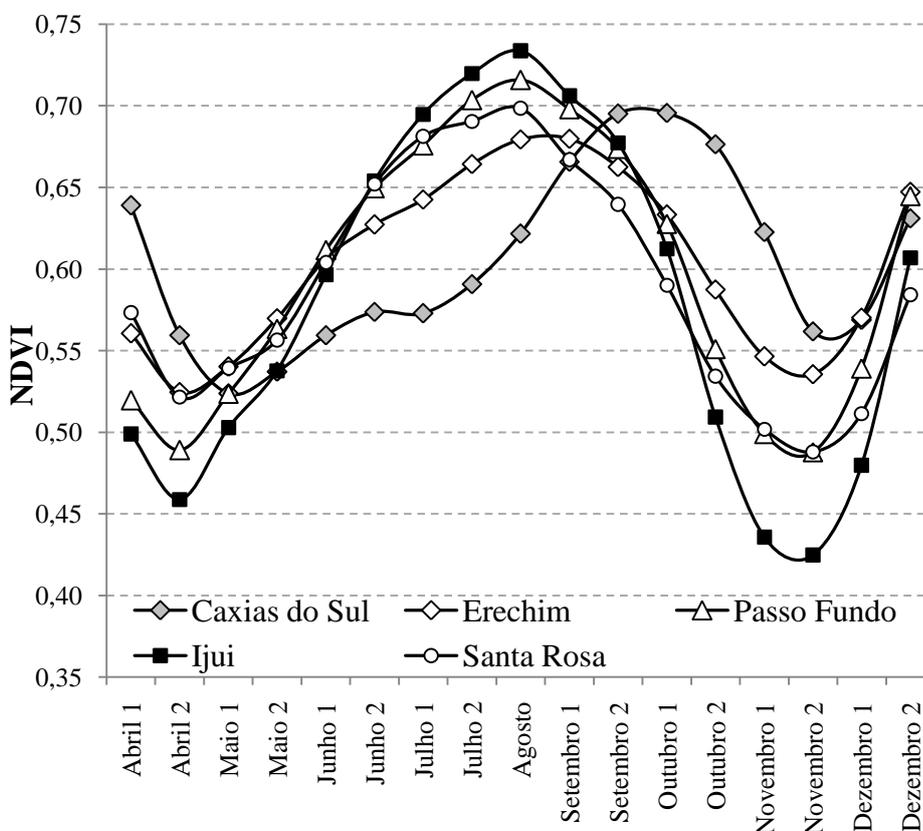


FIGURA 24. Perfis temporais de NDVI/MODIS, de abril a dezembro, das áreas agrícolas identificadas pela metodologia de máscaras de cultivo, nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 2000 a 2008.

A cada ano foram definidos valores de corte (limiares) para geração de máscaras de cultivo com área igual ou superior à soma das áreas cultivadas oficiais de milho e soja (Tabela 10). As diferenças entre áreas (oficial e máscara de cultivos) foram, em todos os casos (anos e regionais), inferiores a 10%. Na média dos anos, a diferença foi de 23.546 ha (2,8% da área oficial) na regional Santa Rosa, 13.955 ha (1%) na regional Ijuí, 19.447 ha (2%) na regional Passo Fundo, 7.882 ha (1,6%) na regional Erechim e

6.539 (2,2%) na regional Caxias do Sul. A maior diferença, em termos de porcentagem da área oficial, ocorreu em 2000, na regional Caxias do Sul (7,7%). De modo geral, as maiores diferenças ocorreram nos anos iniciais da série analisada (2000 e 2001).

É importante salientar que os limiares apresentados (Tabela 10) delimitaram máscaras de cultivo com área igual ou superior à soma da área cultivada de milho e soja. Em alguns casos, no entanto, a diferença entre áreas poderia ser diminuída caso fosse escolhido um limiar maior, cuja área delimitada fosse mais próxima, porém inferior, à área oficial. Na regional Passo Fundo, por exemplo, no ano 2000, a aplicação do limiar 0,11 geraria uma máscara de cultivo de 948.502 ha, valor mais próximo à área cultivada de milho e soja (951.075 ha).

A geração de máscaras de cultivo com base na área cultivada de milho e soja foi adotada em função da menor variabilidade interanual da área ocupada com esses cultivos de primavera-verão. O coeficiente de variação da área cultivada de milho e soja foi de aproximadamente 1% nas regionais Ijuí e Santa Rosa, 2% em Erechim e Passo Fundo e 15% na regional Caxias do Sul. A variabilidade dos dados de área cultivada de milho e soja de 2000 a 2008 foi inferior à verificada nos dados de área cultivada de trigo, no mesmo período.

TABELA 10. Limiares (valores de corte) empregados na geração das máscaras de cultivo das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa; área cultivada de milho e soja (LSPA/IBGE) e diferença entre áreas (limiar e oficial), 2000 a 2008.

Ano	CAXIAS DO SUL				IJUÍ			
	Limiar		Área (ha) milho e soja ⁽¹⁾	Diferença ⁽²⁾ (ha, %)	Limiar		Área (ha) milho e soja ⁽¹⁾	Diferença ⁽²⁾ (ha, %)
	Nº	Área (ha)			Nº	Área (ha)		
2000	0,07	248.482	230.622	17.860 (7,7)	0,13	1.073.457	1.061.105	12.352 (1,2)
2001	0,14	247.158	241.112	6.046 (2,5)	0,22	1.061.167	1.054.448	6.719 (0,6)
2002	0,13	270.217	261.883	8.334 (3,2)	0,20	1.075.491	1.073.580	1.911 (0,2)
2003	0,14	291.293	288.682	2.611 (0,9)	0,24	1.097.981	1.079.930	18.051 (1,7)
2004	0,18	321.544	315.196	6.348 (2,0)	0,27	1.088.798	1.087.675	1.123 (0,1)
2005	0,14	338.558	336.864	1.694 (0,5)	0,12	1.108.225	1.102.702	5.523 (0,5)
2006	0,19	349.332	342.966	6.366 (1,9)	0,24	1.106.098	1.087.662	18.436 (1,7)
2007	0,25	343.737	340.431	3.306 (1,0)	0,23	1.089.414	1.082.552	6.862 (0,6)
2008	0,22	349.817	343.531	6.286 (1,8)	0,26	1.095.245	1.070.250	24.995 (2,3)
Média	0,16	306.682	300.143	6.539 (2,2)	0,21	1.091.722	1.077.767	13.955 (1,0)
Desvio	0,05	42.992	45.863	-	0,05	11.950	14.751	-
CV (%)	33,2	14,0	15,3	-	25,34	1,09	1,37	-
Ano	ERECHIM				PASSO FUNDO			
	Limiar		Área (ha) milho e soja ⁽¹⁾	Diferença ⁽²⁾ (ha, %)	Limiar		Área (ha) milho e soja ⁽¹⁾	Diferença ⁽²⁾ (ha, %)
	Nº	Área (ha)			Nº	Área (ha)		
2000	0,07	503.607	490.490	13.117 (2,7)	0,10	985.389	951.075	34.314 (3,6)
2001	0,12	513.834	496.385	17.449 (3,5)	0,17	982.726	960.354	22.372 (2,3)
2002	0,11	500.177	488.495	11.682 (2,4)	0,16	980.124	968.720	11.404 (1,2)
2003	0,11	500.759	495.691	5.068 (1,0)	0,18	985.648	977.190	8.458 (0,9)
2004	0,15	512.140	506.140	6.000 (1,2)	0,20	1.023.985	1.000.810	23.175 (2,3)
2005	0,10	513.636	513.446	190 (0,04)	0,13	1.015.403	1.011.306	4.097 (0,4)
2006	0,15	519.787	518.173	1.614 (0,3)	0,20	1.035.650	1.006.370	29.280 (2,9)
2007	0,11	522.054	510.163	11.891 (2,3)	0,18	1.022.900	1.002.750	20.150 (2,0)
2008	0,18	507.380	503.455	3.925 (0,8)	0,22	1.003.620	981.575	22.045 (2,2)
Média	0,12	510.375	502.493	7.882 (1,6)	0,17	1.010.856	984.461	19.447 (2,0)
Desvio	0,03	7.921	10.383	-	0,04	34.525	21.815	-
CV (%)	26,8	1,6	2,1	-	22,9	3,4	2,2	-

continuação TABELA 10. Limiares (valores de corte) empregados na geração das máscaras de cultivo das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa; área cultivada de milho e soja (LSPA/IBGE) e diferença entre áreas (limiar e oficial), 2000 a 2008.

SANTA ROSA				
Ano	Limiar		Área (ha) milho e soja ⁽¹⁾	Diferença ⁽²⁾ (ha, %)
	Nº	Área (ha)		
2000	0,06	890.999	852.944	38.055 (4,5)
2001	0,11	880.434	846.762	33.672 (4,0)
2002	0,11	866.987	835.618	31.369 (3,8)
2003	0,12	873.079	851.685	21.394 (2,5)
2004	0,13	858.874	852.624	6.250 (0,7)
2005	0,07	885.422	857.185	28.237 (3,3)
2006	0,14	852.880	848.860	4.020 (0,5)
2007	0,13	858.874	834.925	23.949 (2,9)
2008	0,16	862.139	837.175	24.964 (3,0)
Média	0,11	869.965	846.420	23.546 (2,8)
Desvio	0,03	13.270	8.404	-
CV (%)	28,01	1,53	0,99	-

(1) Soma das áreas cultivadas de milho e soja, de acordo com o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA/IBGE). (2) Diferença = área delimitada pelo limiar – área cultivada de milho e soja.

A menor variabilidade interanual da área cultivada de milho e soja não permitiu que fosse adotado um valor único de limiar. Assim, os valores dos limiares foram distintos para cada regional e ano, apresentando coeficientes de variação de 23% (Passo Fundo), 25% (Ijuí), 27% (Erechim), 28% (Santa Rosa) e 33% (Caxias do Sul). Junges (2008), também não encontrou um único valor de limiar que pudesse ser empregado na geração de máscaras de cultivo das áreas agrícolas estabelecidas no período de outono-inverno-primavera na região de abrangência da Cooperativa Cotrijal (13 municípios pertencentes à regional EMATER/RS Passo Fundo). Fontana *et al.* (2007) e Klering (2007) mostraram a existência de valor de limiar único e estável ao longo dos anos para

geração de máscaras de cultivo de trigo na Austrália e arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

A menor variabilidade da área cultivada de milho e soja, apesar de não permitir a aplicação de limiar único, possibilita que sejam geradas máscaras de cultivo com área próxima à área cultivada média de milho e soja, em cada regional. Isto facilitaria a inserção da metodologia em sistemas de previsão de safras, pois não seria necessário esperar a divulgação dos dados oficiais de área cultivada para elaboração das máscaras.

4.3.3 Classes

A classificação não supervisionada das imagens NDVI/MODIS, de abril a dezembro, considerando-se as áreas delimitadas pelas máscaras de cultivo, indicou cinco classes nas regionais. O perfil temporal médio das classes consta nas Figuras 25 a 27. A localização espacial das classes foi exemplificada com as imagens classificadas de 2008 (Figura 28 a 22).

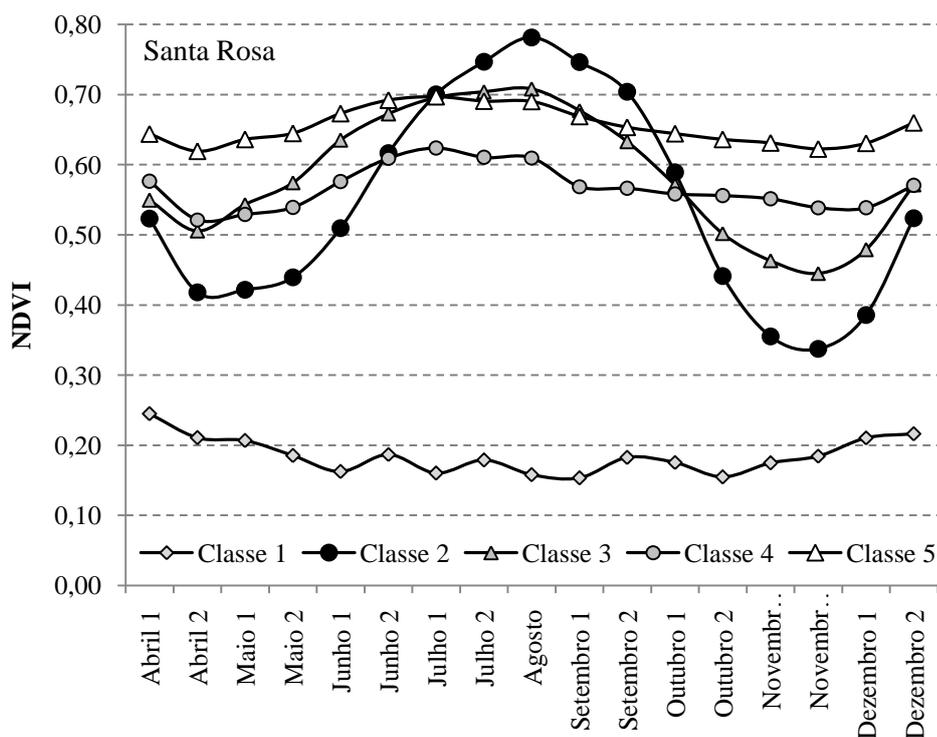


FIGURA 25. Perfis temporais de NDVI/MODIS médios, de abril a dezembro, das classes 1 a 5 na regional EMATER/RS Santa Rosa, média de 2000 a 2008.

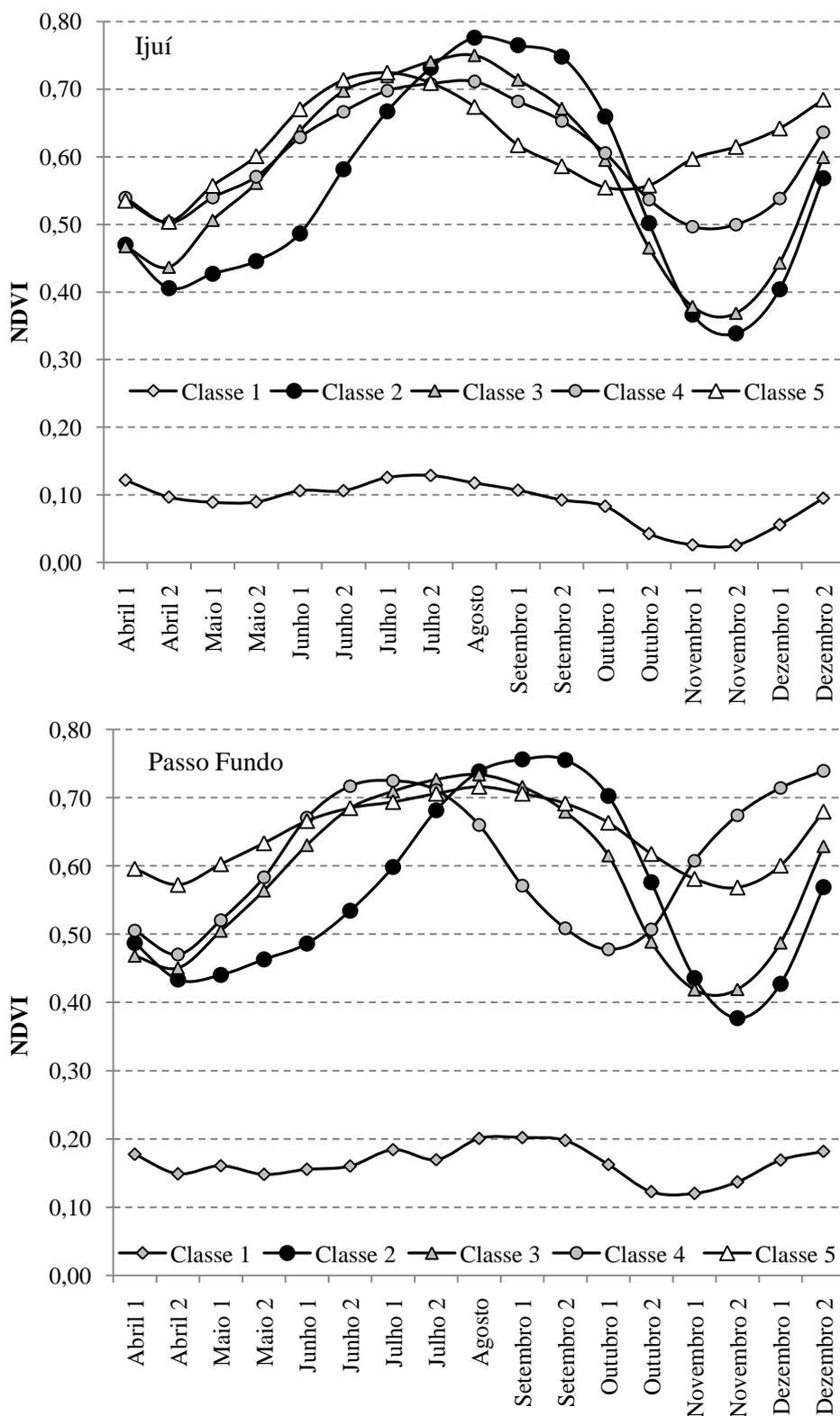


FIGURA 26. Perfis temporais de NDVI/MODIS médios, de abril a dezembro, das classes 1 a 5, nas regionais EMATER/RS Ijuí e Passo Fundo, média de 2000 a 2008.

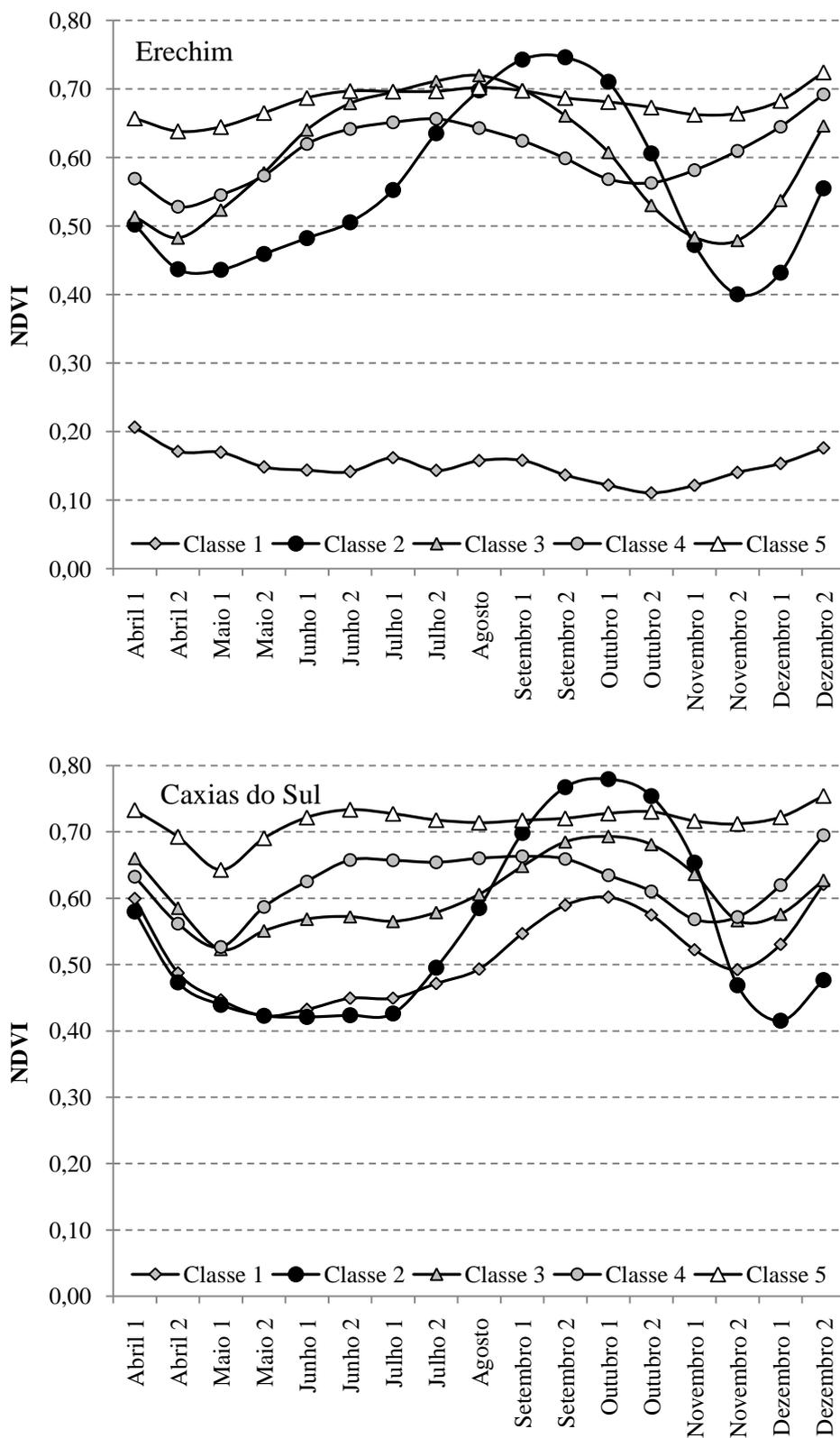


FIGURA 27. Perfis temporais de NDVI/MODIS médios, de abril a dezembro, das classes 1 a 5, nas regionais EMATER/RS Erechim e Caxias do Sul, média de 2000 a 2008.

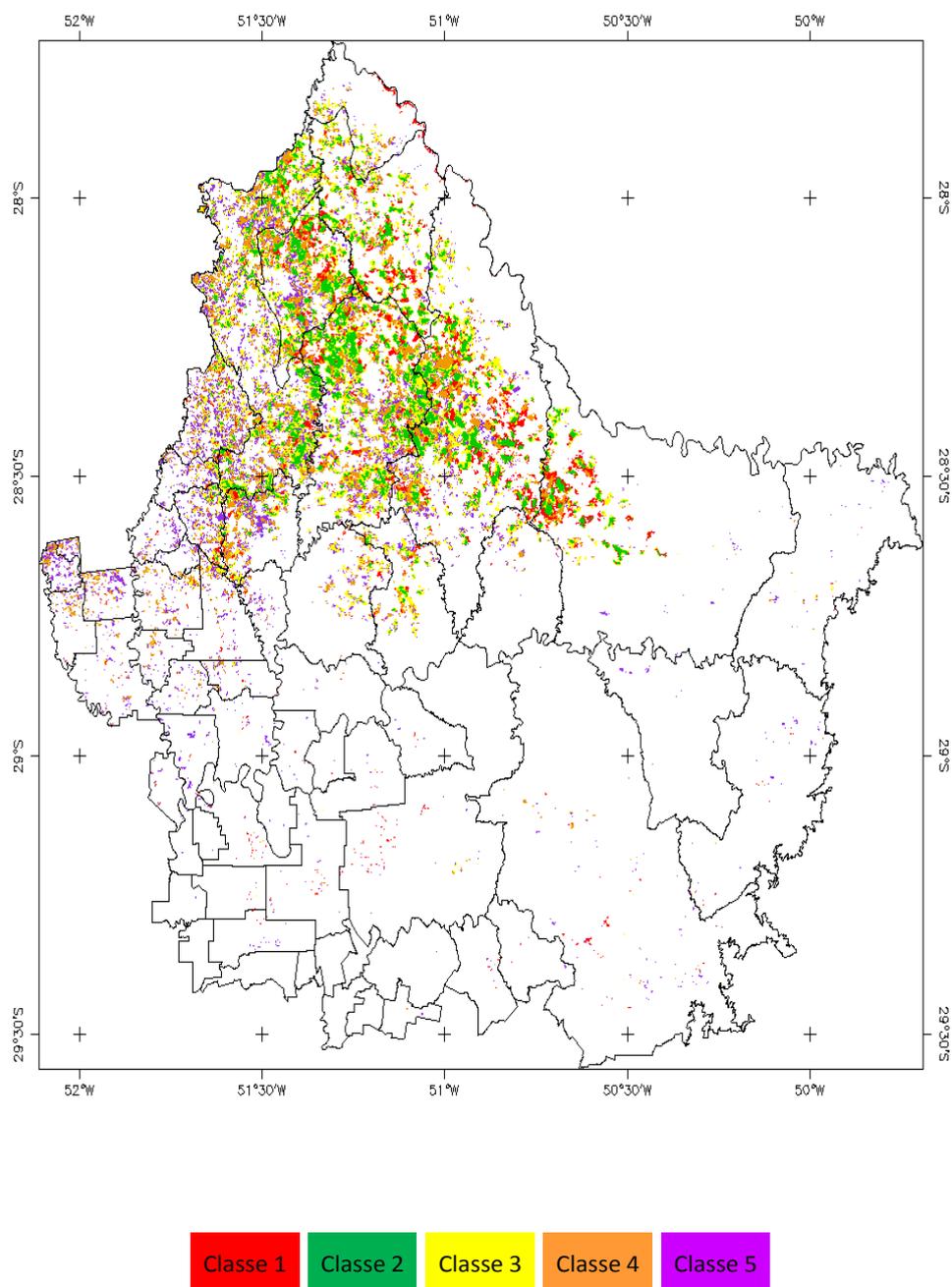


FIGURA 28. Localização espacial das classes 1 a 5, oriundas da classificação não supervisionada de áreas agrícolas identificadas por máscara de cultivo, em imagens NDVI/MODIS de abril a dezembro, regional EMATER/RS Caxias do Sul, 2008.

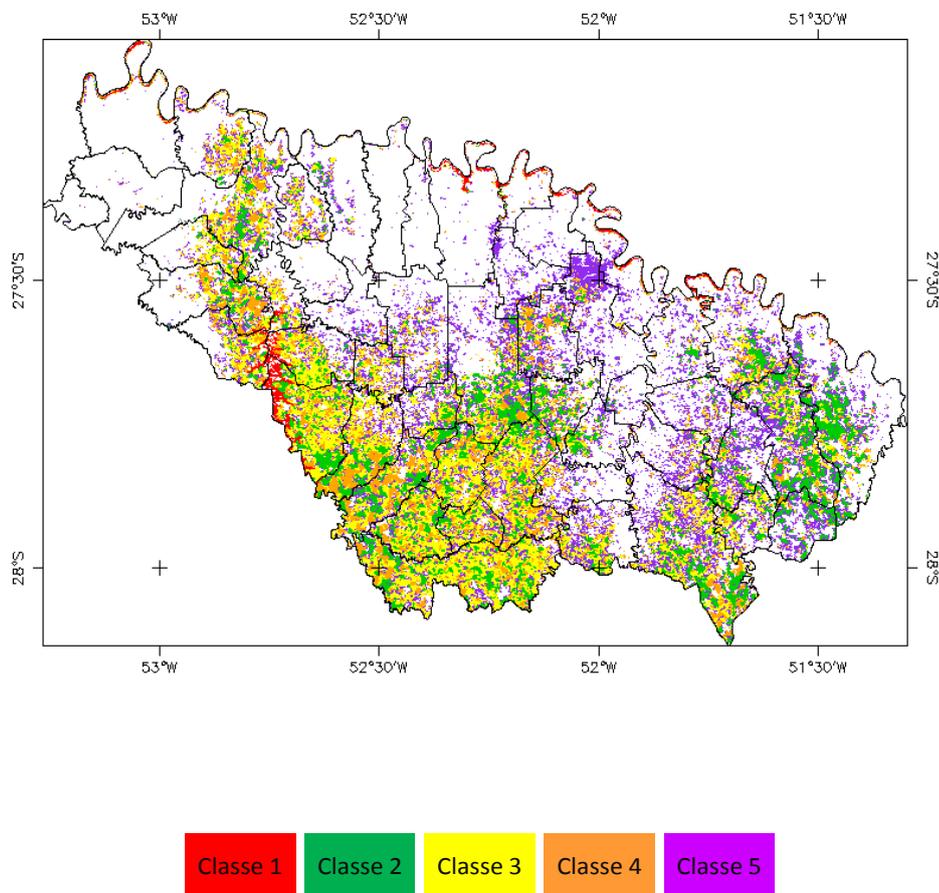


FIGURA 29. Localização espacial das classes 1 a 5, oriundas da classificação não supervisionada de áreas agrícolas identificadas por máscara de cultivo, em imagens NDVI/MODIS de abril a dezembro, regional EMATER/RS Erechim, ano 2008.

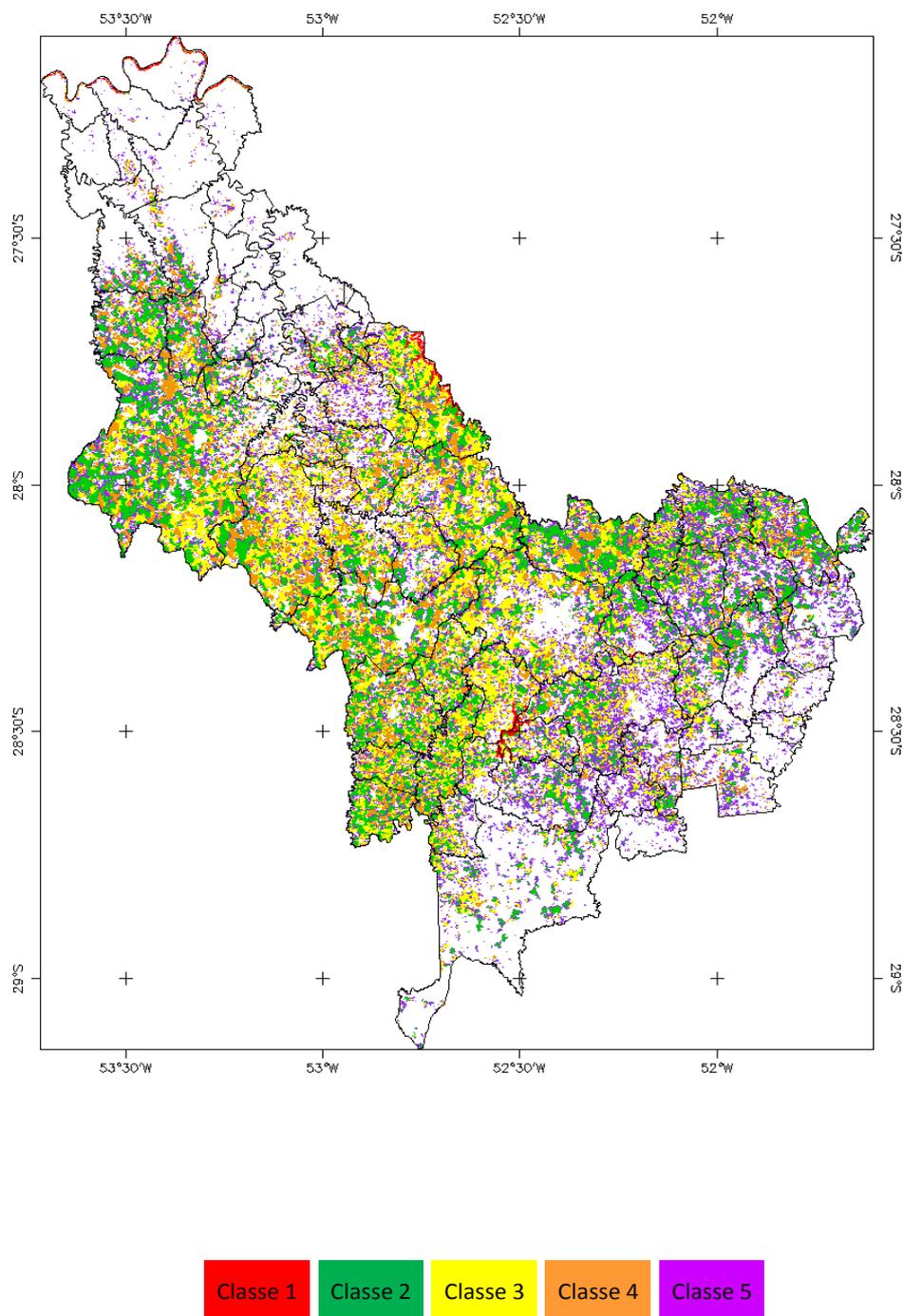


FIGURA 30. Localização espacial das classes 1 a 5, oriundas da classificação não supervisionada de áreas agrícolas identificadas por máscara de cultivo, em imagens NDVI/MODIS de abril a dezembro, regional EMATER/RS Passo Fundo, ano 2008.

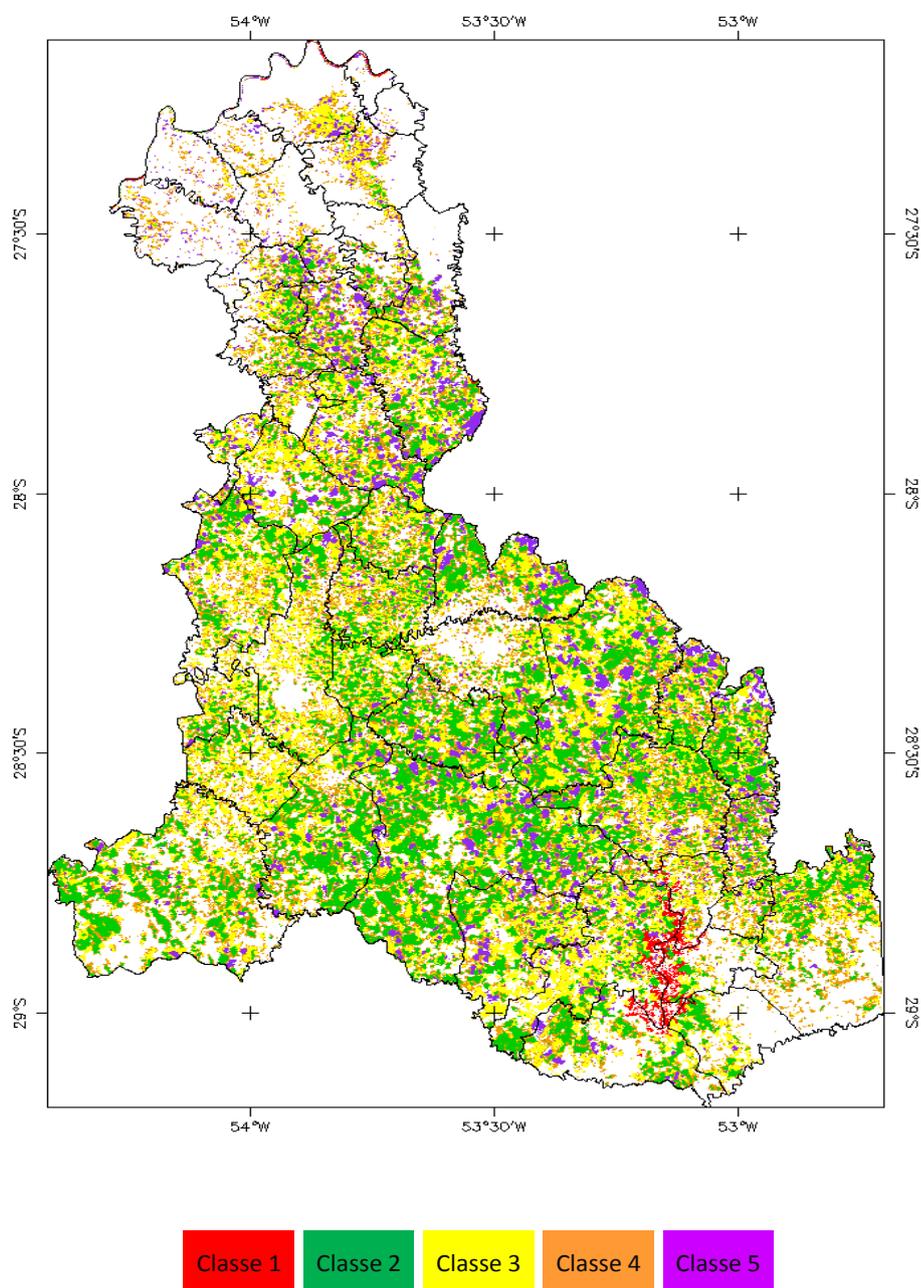


FIGURA 31. Localização espacial das classes 1 a 5, oriundas da classificação não supervisionada de áreas agrícolas identificadas por máscara de cultivo, em imagens NDVI/MODIS de abril a dezembro, regional EMATER/RS Ijuí, ano 2008.

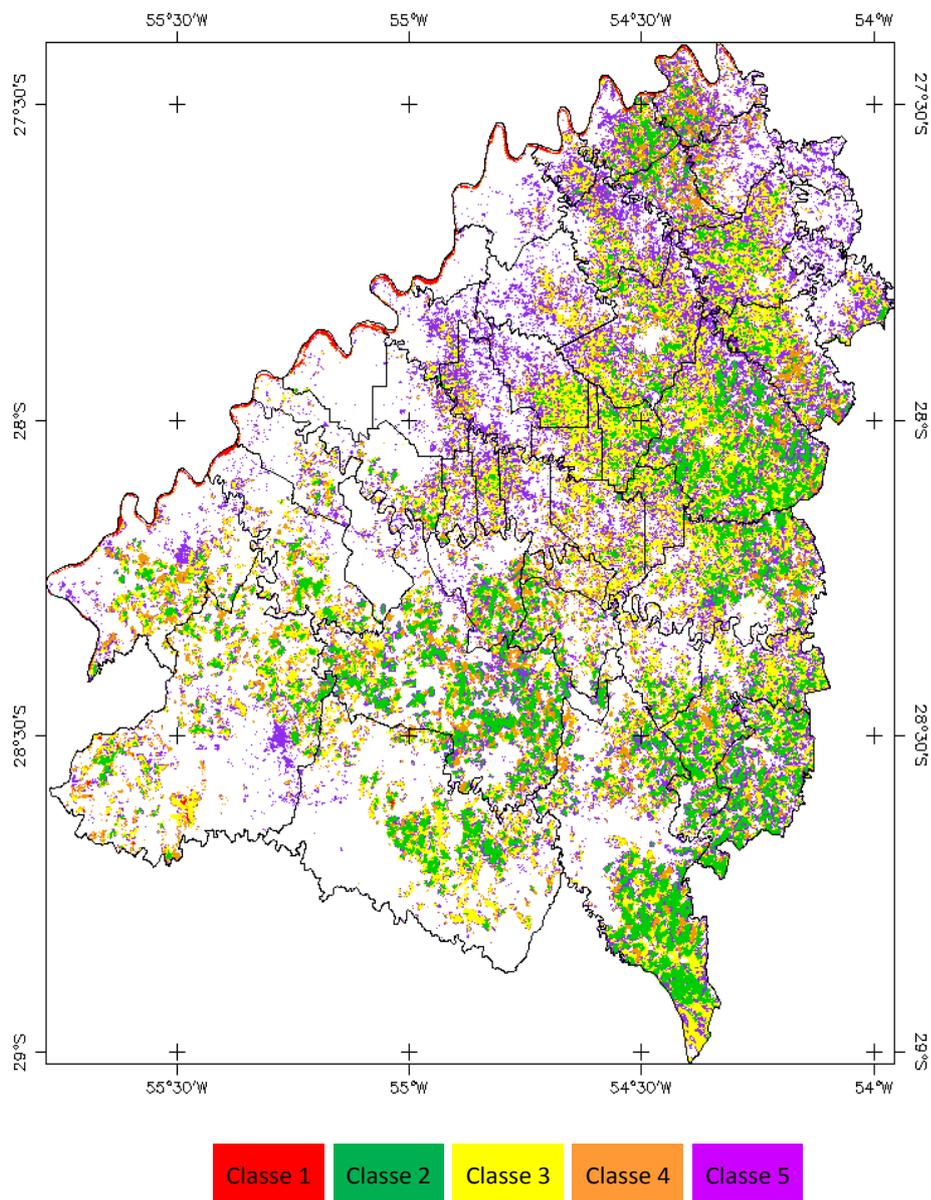


FIGURA 32. Localização espacial das classes 1 a 5, oriundas da classificação não supervisionada de áreas agrícolas identificadas por máscara de cultivo, em imagens NDVI/MODIS de abril a dezembro, regional EMATER/RS Santa Rosa, ano 2008.

O perfil temporal de NDVI/MODIS da classe 1, em todas regionais, com exceção de Caxias do Sul, apresentou baixos valores de NDVI no período de abril a dezembro. Os valores oscilaram entre 0,10 e 0,20 nas regionais Erechim, Passo Fundo e Santa Rosa, e entre 0,03 e 0,13 na regional Ijuí. Na regional Caxias do Sul, nenhuma das classes apresentou perfil temporal de NDVI/MODIS semelhante ao perfil descrito.

A pequena variação temporal do NDVI, aliada à localização espacial próxima a corpos d'água indicou que as áreas da classe 1 não corresponderam a áreas destinadas a cultivos agrícolas. A classificação não supervisionada apontou que áreas não agrícolas, tais como as da classe 1, foram incluídas nas máscaras de cultivos. Tal inclusão ocorreu, possivelmente, em decorrência dos valores de NDVI máximos (0,78) e mínimos (-0,20) de alguns *pixels*, nas imagens de abril a dezembro.

Na média dos anos a classe 1 ocupou 12.073 ha na regional Erechim (equivalentes a 2,4% da área média das máscaras de cultivo), 8.080 ha na regional Passo Fundo (0,8%), 13.860 ha na regional Ijuí (1,3%) e 9.120 ha na regional Santa Rosa (1,0%).

As áreas classificadas como pertencentes à classe 2 foram as que apresentaram, em todas as regionais, perfil temporal de NDVI mais condizente com a evolução do índice esperada de áreas agrícolas cultivadas com cereais de estação fria, para produção de grãos. Os perfis temporais anuais de NDVI/MODIS da classe 2 foram empregados na elaboração dos perfis temporais médios (Figura 33).

Para a maioria dos municípios das regionais Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, o período recomendado de início da semeadura de trigo ocorre no mês de maio (Cunha *et al.*, 2001). O período recomendado de semeadura para a maior parte dos municípios da regional Caxias do Sul é junho. Assim, os valores de NDVI nos meses de maio e junho devem ser baixos, indicando as etapas de germinação e início do

desenvolvimento vegetativo dos cereais de estação fria. Os perfis temporais da classe 2 indicaram adequadamente essa etapa inicial do ciclo da cultura, em todas as regionais, com valores mínimos de NDVI próximos de 0,40.

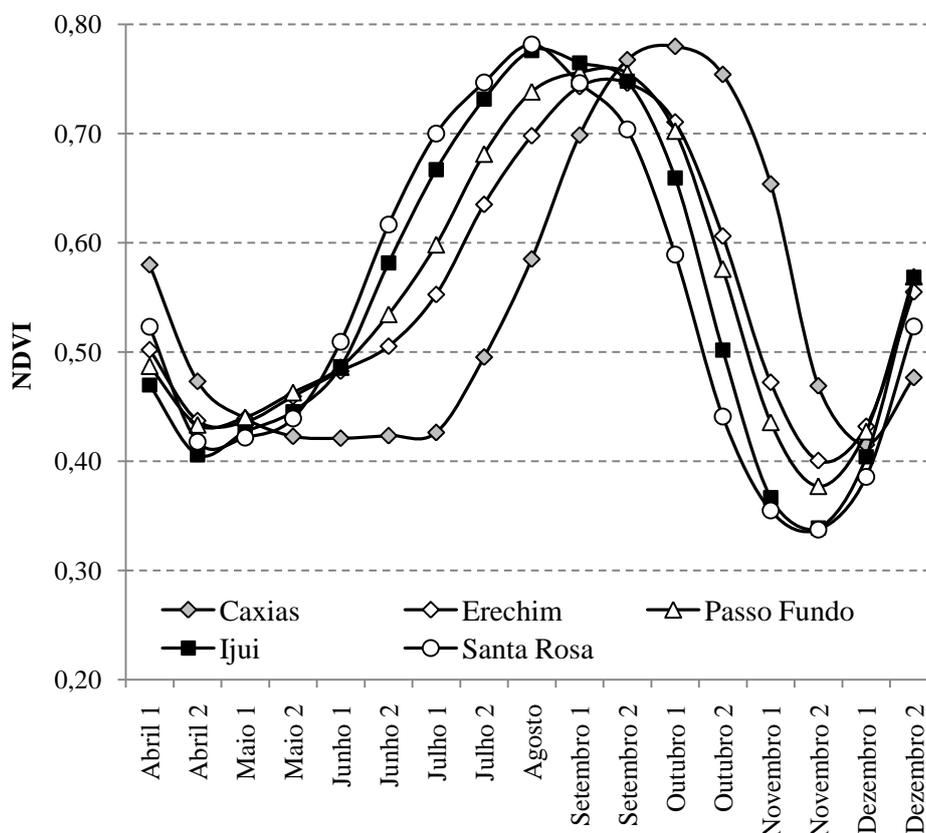


FIGURA 33. Perfis temporais de NDVI/MODIS médios da classe 2 nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 2000 a 2008.

Na média dos anos, os valores máximos de NDVI ocorreram em agosto (regionais Santa Rosa e Ijuí), primeira quinzena de setembro (regionais Passo Fundo e Erechim) e primeira quinzena de outubro (Caxias do Sul). Os valores máximos ocorreram em quinzenas anteriores à quinzena correspondente ao florescimento (Tabela 7). Maiores valores de NDVI anteriores à etapa de florescimento também foram encontrados por Variani *et al.* (2010). Analisando a variação do NDVI, obtido com sensor remoto ativo (Greenseeker), ao longo do ciclo de cultivares de trigo submetidas

a diferentes doses de nitrogênio em cobertura, os maiores valores do índice ocorreram no emborrachamento (18 dias antes do florescimento), quando da aplicação de 40, 60 e 80 kg ha⁻¹ de N, e no espigamento (10 dias antes do florescimento) quando as doses de N em cobertura foram de 0 e 20 kg ha⁻¹ de N (Variani *et al.*, 2010).

A partir do florescimento, as plantas passam a translocar nutrientes para formação do grão. O material transportado para o grão provém da fotossíntese realizada pelas partes verdes da planta e da remobilização de nutrientes previamente armazenados no colmo, folhas e raízes (Mundstock, 1999). A redução de biomassa verde após o florescimento decorre tanto da remobilização de nutrientes, quanto da senescência foliar. Esta redução foi verificada nos perfis temporais médios da classe 2, pelo decréscimo dos valores de NDVI a partir das quinzena em que o trigo, na maior parte da área cultivada, encontrou-se em enchimento de grãos (Tabela 9).

A maior parte da área cultivada de trigo foi colhida até a segunda quinzena de novembro (regionais Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa) e primeira quinzena de dezembro (regional Caxias do Sul). Os menores valores de NDVI, nos perfis temporais da classe 2 ocorreram nas quinzenas citadas.

Os perfis temporais da classe 2 foram considerados condizentes com o ciclo de crescimento e desenvolvimento das lavouras de cereais de inverno estabelecidas para produção de grãos. Os perfis da classe 2 refletiram as diferenças esperadas, entre regionais, no que diz respeito à evolução do índice de vegetação, dada as diferentes épocas de semeadura (variação, no sentido oeste-leste). Neste trabalho, considerou-se que o calendário de acompanhamento de lavouras de trigo é representativo, também, do ciclo dos demais cereais de estação fria cultivados para produção de grãos no período de outono-inverno-primavera, na região de estudo.

Os perfis temporais das áreas classificadas como pertencentes à classe 3 apresentaram baixos valores de NDVI na segunda quinzena de abril, com incremento destes valores a partir de maio. Esta variação temporal também foi verificada nos perfis da classe 2. No entanto, nos perfis da classe 3, os valores de NDVI no mês de maio foram maiores, comparativamente aos valores de NDVI da classe 2 no mesmo período.

Nos perfis da classe 3, a taxa de incremento dos valores de NDVI nas primeiras quinzenas foi superior à verificada na classe 2. Este resultado indicou que as áreas pertencentes à classe 3 se caracterizam pelo rápido acúmulo de biomassa. Segundo Silva *et al.* (2006), o rápido desenvolvimento inicial da aveia preta faz desta a principal espécie estabelecida para cobertura do solo, na região sul do Brasil.

O perfil temporal de NDVI/MODIS das áreas pertencentes à classe 3 caracterizou adequadamente o crescimento e desenvolvimento de lavouras de aveia preta destinadas à cobertura do solo (com ciclo até novembro, para posterior cultivo de soja), em todas as regionais, com exceção de Caxias do Sul.

Os perfis temporais de NDVI/MODIS da classe 4 foram semelhantes aos da classe 3, especialmente nas primeiras quinzenas do período (abril e maio). Nas demais quinzenas, porém, não apresentaram uma evolução temporal homogênea, quando da comparação entre regionais. Na regional Passo Fundo, a classe 4 apresentou um decréscimo nos valores de NDVI a partir da segunda quinzena de julho e valores mínimos na primeira de outubro. Este resultado pode indicar que essas áreas são cultivadas, no período de primavera-verão, com milho. O crescimento dos valores de NDVI a partir da primeira quinzena de outubro indica o início do desenvolvimento das lavouras de milho e corrobora o trabalho de Bergamaschi *et al.* (2007), que mostrou que 50% da área cultivada encontram-se semeados com milho em 10 de outubro, na regional Passo Fundo.

Nas demais regionais, os perfis temporais de NDVI/MODIS da classe 4, juntamente com os da classe 5, não foram considerados típicos de lavouras estabelecidas para produção de grãos. Dada a menor variação do índice no período de abril a dezembro, estas áreas podem indicar áreas de pastagens, inclusive de aveia preta. Perfis semelhantes foram obtidos por Fonseca *et al.* (2010) em áreas de azevém anual. Valores de NDVI mais altos no início do ciclo do azevém, comparativamente aos observados em trigo, decorrem da maior densidade de sementes por área empregadas no estabelecimento de pastagens, enquanto que a estabilização dos valores de NDVI está associada ao manejo das áreas (supressão do pastoreio em períodos curtos ou diminuição da carga animal) (Fonseca *et al.*, 2010). Na regional Caxias do Sul, o perfil temporal de NDVI/MODIS da classe 1 concordou com o perfil de NDVI obtido por Jacobsen *et al.* (2003) para campos e campos sujos, os quais caracterizaram-se pelos incrementos de NDVI a partir do mês de agosto (rebrote no início da primavera).

As máscaras de cultivo geraram perfis temporais condizentes com o ciclo dos cereais de estação fria. No entanto, nas máscaras, também foram incluídas áreas agrícolas que, apesar da variação temporal de NDVI no período de abril a dezembro, não correspondem a cultivos destinados à produção de grãos.

Os perfis temporais de NDVI/MODIS das classes revelaram que a classificação não supervisionada foi adequada para identificação de áreas agrícolas destinadas à produção de grãos, cobertura do solo ou pastagens. A identificação foi baseada na distinta evolução temporal do NDVI nestas áreas. É importante salientar que a aveia preta cultivada para cobertura do solo ou em pastagens, e os cereais de estação fria cultivados para a produção de grãos, além de serem estabelecidos no mesmo período do ano, são gramíneas com semelhanças morfológicas e fenológicas, o que dificulta a identificação e caracterização destes cultivos. Neste trabalho, o estudo multitemporal

empregando imagens referentes ao ciclo das culturas, foi considerado adequado para distinção das áreas agrícolas estabelecidas para produção de grãos, das demais. Estudo multitemporal empregando imagens NDVI/MODIS também foi realizado por Caresani (2010), para geração de perfis temporais de trigo e azevém anual, no Rio Grande do Sul.

A metodologia de classificação não supervisionada de áreas agrícolas identificadas por máscaras de cultivo também obteve resultados satisfatórios no que diz respeito à localização espacial. Nesse sentido, na porção leste da regional Caxias do Sul, onde estão localizados municípios não produtores de trigo, de acordo com os resultados da análise de agrupamentos (Figura 14), poucas áreas foram classificadas como cereais de estação fria (Figura 28).

Os perfis temporais de NDVI/MODIS da classe 2 foram os que melhor representaram a evolução temporal do índice de vegetação esperado de áreas agrícolas cultivadas para produção de grãos. Assim, a classe 2 foi denominada “cereais de estação fria”. As variáveis espectrais empregadas no ajuste dos modelos agrometeorológicos-espectrais foram obtidas a partir da aplicação desta metodologia (classificação não supervisionada das áreas identificadas pelas máscaras de cultivo). Os perfis temporais de NDVI/MODIS médios das regionais, das máscaras de cultivo e da classe cereais de estação fria, quando analisados conjuntamente (Figuras 34 a 36) evidenciam o resultado obtido pela metodologia no realce de áreas agrícolas.

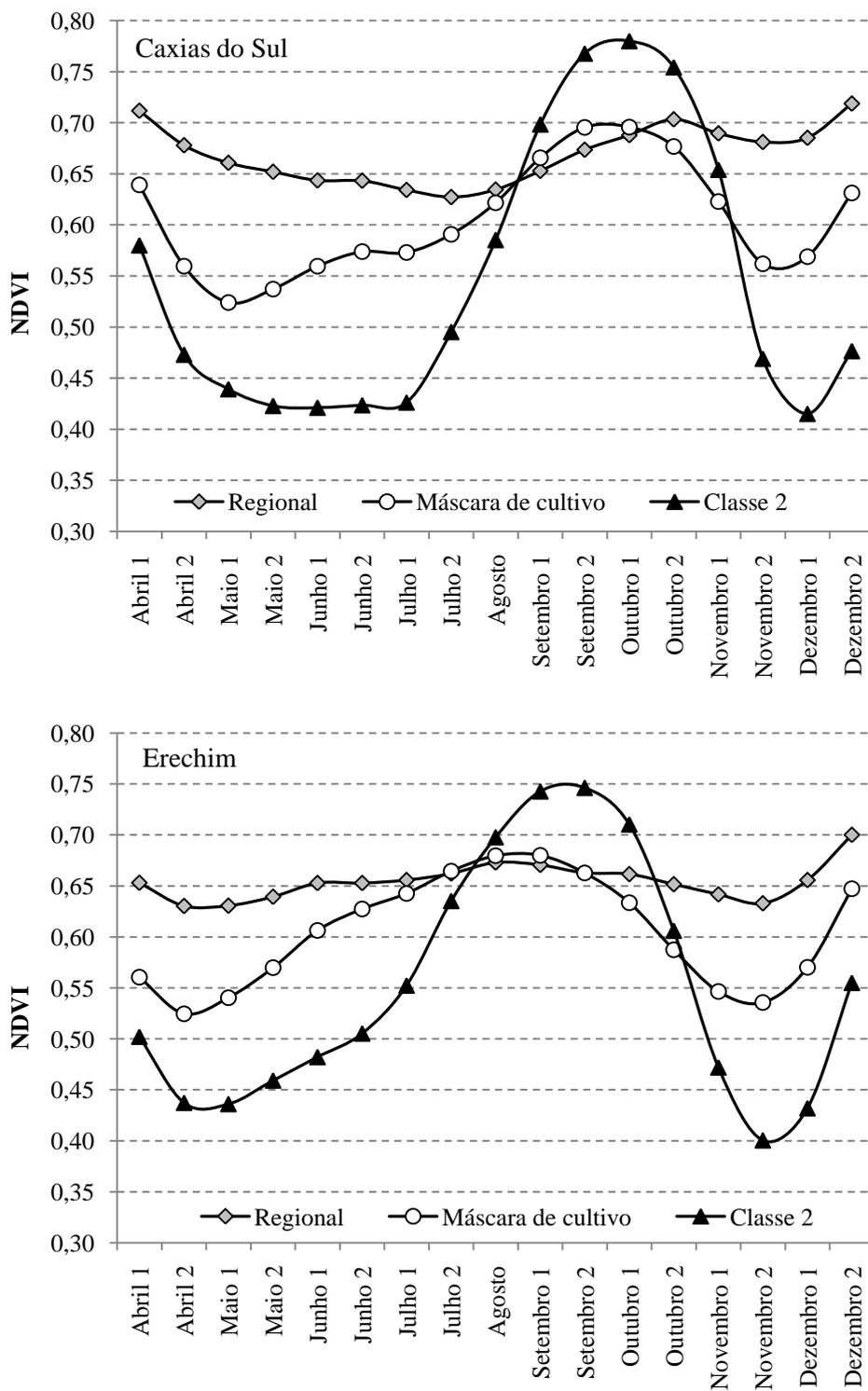


FIGURA 34. Perfis temporais de NDVI/MODIS, de abril a dezembro, das regionais, máscaras de cultivo e classe 2 (cereais de estação fria) nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul e Erechim, média 2000 a 2008.

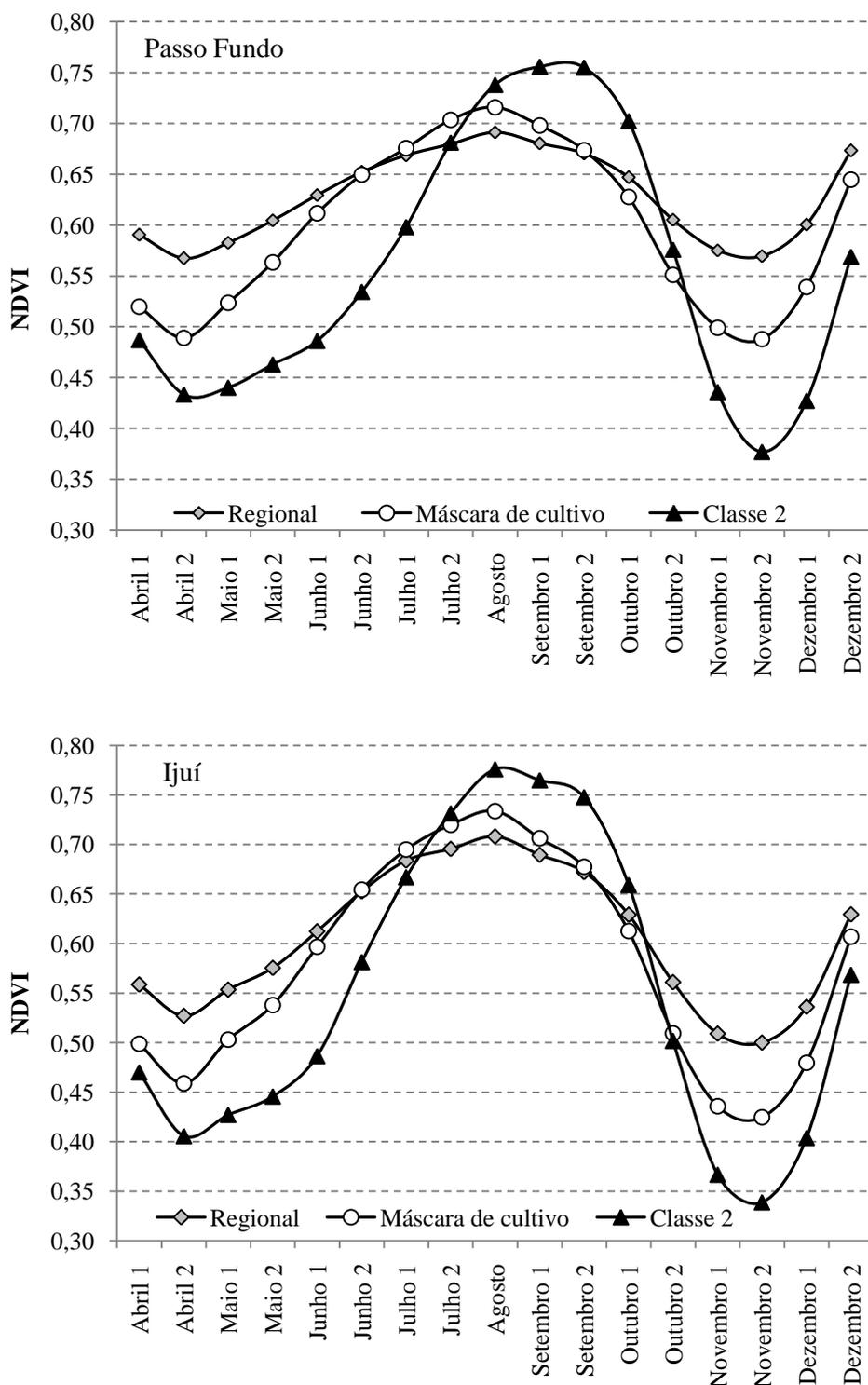


FIGURA 35. Perfis temporais de NDVI/MODIS, de abril a dezembro, da regional, máscara de cultivo e classe 2 (cereais de estação fria), nas regionais EMATER/RS Passo Fundo e Ijuí, média 2000 a 2008.

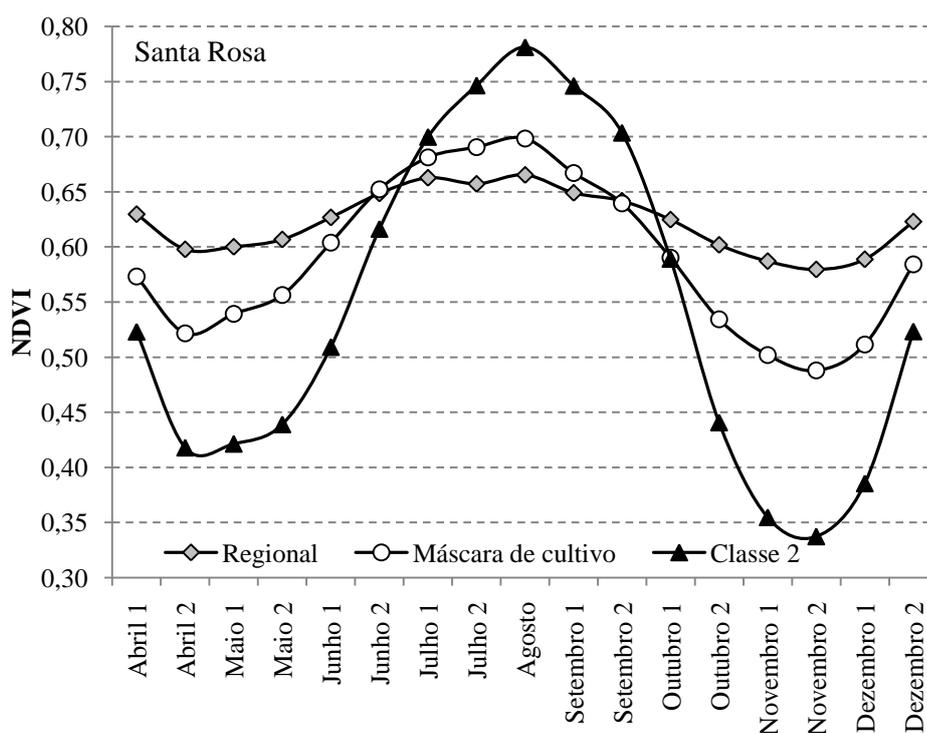


FIGURA 36. Perfis temporais de NDVI/MODIS, de abril a dezembro, das regionais, máscaras de cultivo e classe 2 (cereais de estação fria) na regional EMATER/RS Santa Rosa, média 2000 a 2008.

A facilidade de obtenção das imagens NDVI/MODIS, disponibilizadas gratuitamente e com correções atmosféricas e geométricas, aliada à resolução temporal adequada ao monitoramento do ciclo dos cereais de estação fria, fizeram com que estas fossem empregadas no ajuste de modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento de grãos de trigo. Cabe salientar que a resolução espacial das imagens NDVI/MODIS é de 250 metros. Isso significa que a área mínima identificada pelo sensor (*pixel*) corresponde a 6,25 ha.

De acordo com o Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2011), no Rio Grande do Sul, a área dos estabelecimentos agropecuários que cultivam espécies temporárias corresponde a 6.347.494 ha. No Estado, o número de estabelecimentos é de 357.000. Estes dados indicam que a área média das propriedades gaúchas é de 17,8 ha.

Analisando-se os dados das microregiões estaduais, a área média das propriedades é de 10 ha na região de Santa Rosa e Três Passos, 14 ha em Erechim, 27 ha em Ijuí e Santo Ângelo, 26 ha em Passo Fundo e Não-me-Toque e 32 ha em Vacaria. Na região de Santa Rosa, onde a área média dos estabelecimentos é de 10 ha, é possível que existam áreas cultivadas de trigo inferiores à área equivalente a um *pixel* na imagem NDVI/MODIS.

A área oficial cultivada com cereais de estação fria (soma das áreas cultivadas de aveia branca, centeio, cevada, trigo e triticale) foi comparada à área da classe cereais de estação fria em cada regional (Tabela 11). Na média dos anos, a diferença entre as áreas representou 16,8% da área oficial na regional Caxias do Sul, 19,2% em Erechim, 12,2% em Passo Fundo, 17,1% em Ijuí e 11,5% em Santa Rosa. Os maiores valores de diferença ocorreram em 2003, na regional Ijuí (a área classificada foi 38,5% inferior à área oficial) e em 2001, na regional Santa Rosa (área classificada foi 45,2% superior à área oficial).

Os resultados dos testes de comparação de médias indicaram que não houve diferença significativa entre a área oficial e a área classificada como cereais de estação fria nas regionais e no conjunto dos dados (Tabela 12).

TABELA 11. Área oficial destinada ao cultivo de cereais de estação fria (LSPA/IBGE), área ocupada pela classe cereais de estação fria e diferença entre as áreas (em ha e porcentagem da área oficial), nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008.

		Área (ha) - Cereais de inverno							
	Classe	IBGE	Diferença			Classe	IBGE	Diferença	
			Ha	%				Ha	%
Caxias do Sul	2000	51.831	41.667	10.164	24,4	219.235	217.625	1.610	0,7
	2001	49.418	41.845	7.573	18,1	253.540	223.055	30.485	13,7
	2002	60.904	42.270	18.634	44,1	304.307	278.447	25.860	9,3
	2003	55.406	56.651	-1.245	-2,2	207.629	337.351	-129.722	-38,5
	2004	69.476	71.680	-2.204	-3,1	310.211	366.230	-56.019	-15,3
	2005	62.935	73.359	-10.424	-14,2	305.120	271.211	33.909	12,5
	2006	70.390	75.958	-5.568	-7,3	290.285	229.540	60.745	26,5
	2007	95.111	74.457	20.654	27,7	337.089	269.450	67.639	25,1
	2008	65.156	72.156	-7.000	-9,7	347.838	308.010	39.828	12,9
	Média	64.514	61.116	9.274	16,8	286.139	277.880	49.539	17,1
Des.Pad.	13.615	15.437			49.235	51.647			
CV (%)	21	25			17,2	18,6			
Erechim	2000	86.071	70.991	15.080	21,2	149.504	136.458	13.046	9,6
	2001	100.561	78.018	22.543	28,9	218.935	150.822	68.113	45,2
	2002	91.141	108.216	-17.075	-15,8	198.208	171.314	26.894	15,7
	2003	91.940	124.800	-32.860	-26,3	218.356	219.592	-1.236	-0,6
	2004	93.922	129.380	-35.458	-27,4	210.095	246.505	-36.410	-14,8
	2005	94.331	103.738	-9.407	-9,1	189.446	188.871	575	0,3
	2006	89.326	72.098	17.228	23,9	174.354	159.406	14.948	9,4
	2007	91.023	85.376	5.647	6,6	175.161	180.777	-5.616	-3,1
	2008	97.421	85.673	11.748	13,7	190.574	199.668	-9.094	-4,6
	Média	92.860	95.366	18.561	19,2	191.626	183.713	19.548	11,5
Des.Pad.	4.318	22.048			22.897	34.604			
CV (%)	4,6	23,1			11,9	18,8			
Passo Fundo	2000	201.774	192.280	9.494	4,9				
	2001	217.280	196.696	20.584	10,5				
	2002	195.442	252.247	-56.805	-22,5				
	2003	248.304	279.434	-31.130	-11,1				
	2004	267.590	292.287	-24.697	-8,4				
	2005	252.047	245.595	6.452	2,6				
	2006	205.486	174.277	31.209	17,9				
	2007	230.782	198.857	31.925	16,1				
	2008	252.676	218.357	34.319	15,7				
	Média	230.153	227.781	27.402	12,2				
Des.Pad.	26.226	41.472							
CV (%)	11,4	18,2							

TABELA 12. Resultado do teste de comparação de médias (áreas oficial e classificada de cereais de estação fria) nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa e no conjunto de dados (todas), 2000 a 2008.

	Valor t	Significância estatística
Caxias do Sul	0,97	0,36 ^{ns}
Erechim	-0,34	0,74 ^{ns}
Passo Fundo	0,22	0,83 ^{ns}
Ijuí	0,39	0,71 ^{ns}
Santa Rosa	0,82	0,43 ^{ns}
Todas	0,78	0,44 ^{ns}

^{ns} Não significativo pelo teste t a 5% de significância estatística.

As áreas cultivadas de cereais de inverno, oficiais e provenientes da classificação não supervisionada de imagens NDVI/MODIS, foram apresentadas em gráficos de dispersão de valores em torno da reta 1:1 que passa na origem (Figura 37). O melhor ajuste, representado pela aproximação dos pontos à reta, ocorreu para o conjunto de dados. Os diagramas de caixa (Figura 38) também indicaram que, quando considerado o conjunto total de dados, os valores apresentaram dispersão semelhante e a correlação entre as áreas foi significativa (0,92). Porém, nas análises individualizadas (regionais), a correlação entre as áreas não foi significativa, os dados apresentaram elevada dispersão em torno do valor médio e os pontos não se ajustaram à reta 1:1.

A classificação não supervisionada das áreas agrícolas identificadas pelas máscaras de cultivo não teve como objetivo principal estimar a área cultivada de cereais de estação fria. A fim de que esta metodologia seja empregada na estimativa de área, mais estudos devem ser realizados. A amostragem de áreas cultivadas, em número adequado à representação da variabilidade das lavouras de cereais de estação fria estabelecidas na porção norte do Rio Grande do Sul, pode gerar informações que contribuam para o aprimoramento desta metodologia, reduzindo a diferença entre áreas (classificada e oficial).

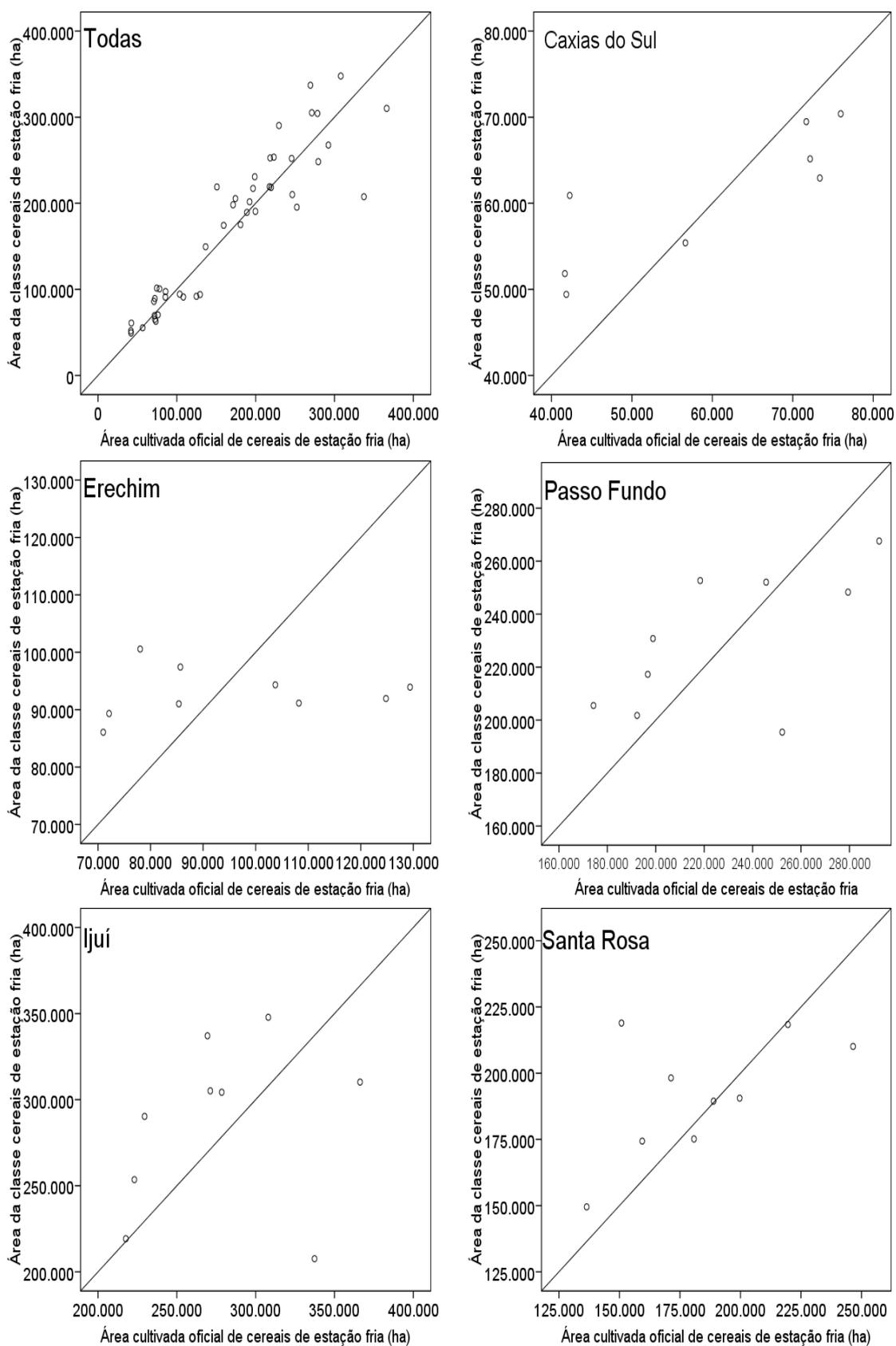


FIGURA 37. Dispersão em torno da reta 1:1 das áreas cultivadas de cereais de estação fria oficial (LSPA/IBGE) e classificada (classe) nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa e no conjunto dos dados (todas), 2000 a 2008.

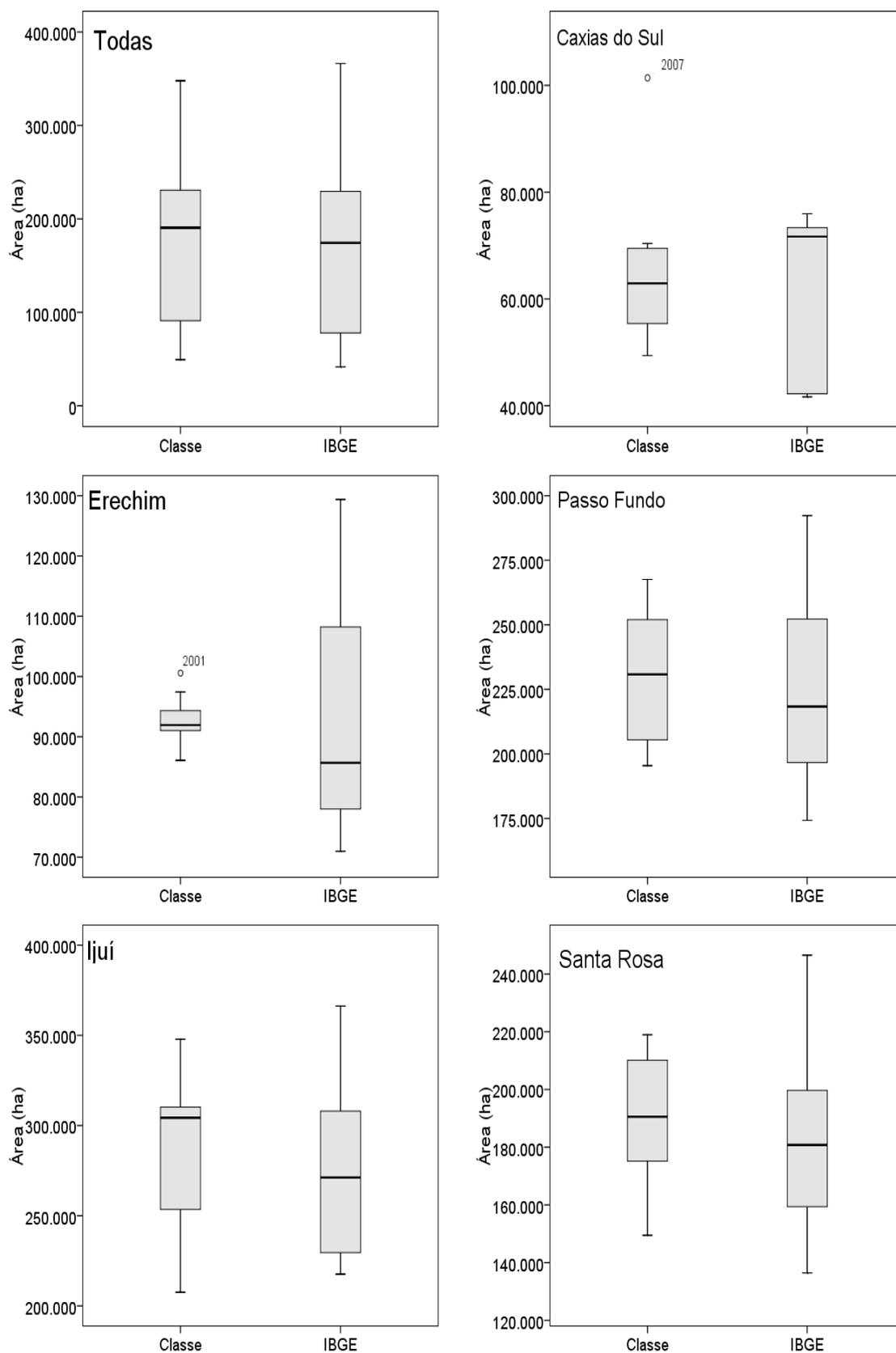


FIGURA 38. Diagramas de dispersão das áreas cultivadas de cereais de estação fria oficial (LSPA/IBGE) e classificada (classe) nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa e para o conjunto dos dados (todas), 2000 a 2008.

4.3.4 Relação com o ciclo da cultura e o rendimento de grãos de trigo

Os perfis temporais de NDVI/MODIS da classe cereais de estação fria indicaram as principais etapas do ciclo e permitiram o estabelecimento de relações entre o comportamento temporal do índice de vegetação e o desenvolvimento das plantas de trigo. A relação entre o perfil e o calendário agrícola determinou que a classe fosse considerada representativa do ciclo dos cereais de estação fria destinados à produção de grãos, na região de estudo.

Embora a escolha da classe tenha sido feita com base nos perfis temporais de NDVI/MODIS médios, a variabilidade interanual dos perfis também deve ser analisada (Figuras 39 e 40). Foi possível verificar que as maiores amplitudes nos valores de NDVI ocorreram nas etapas iniciais do ciclo: até a primeira quinzena de setembro para regional Caxias do Sul, agosto para Erechim e Passo Fundo e segunda quinzena de julho para as regionais Ijuí e Santa Rosa. Nas quinzenas equivalentes às etapas de estabelecimento das lavouras e início do crescimento vegetativo das plantas os valores de NDVI variaram em até 0,20 unidades. Este resultado pode ser consequência da variabilidade das condições meteorológicas, especialmente temperatura do ar, temperatura do solo e disponibilidade de radiação solar, e do manejo das lavouras (época de semeadura, cultivares e adubação). As condições meteorológicas e de manejo afetam a duração da etapa semeadura-emergência, taxa de crescimento inicial das plantas e o acúmulo de biomassa verde, parâmetro biofísico da vegetação do qual o NDVI é indicador.

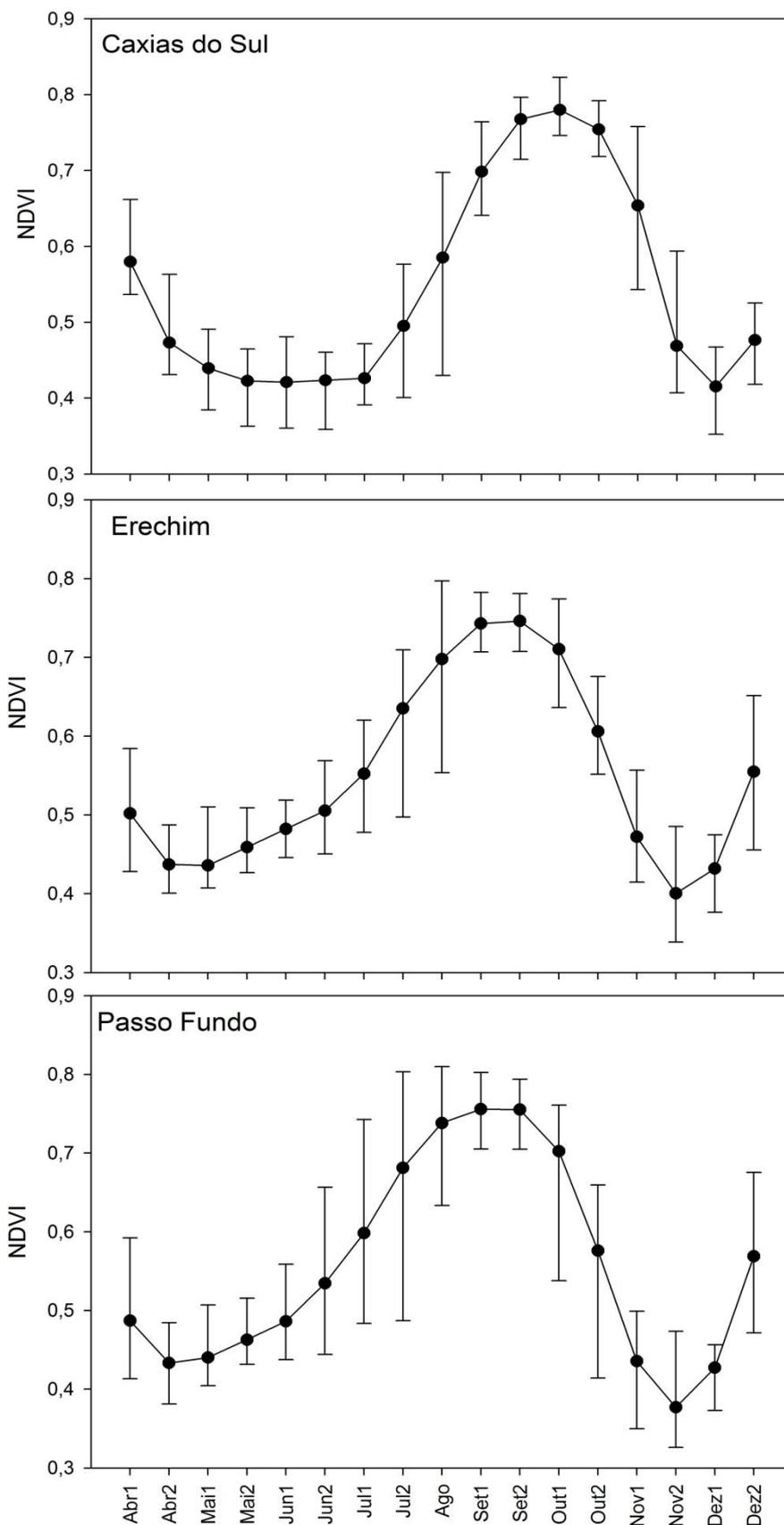


FIGURA 39. Perfis temporais de NDVI/MODIS (valores médios, máximos e mínimos) da classe cereais de estação fria nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim e Passo Fundo, 2000 a 2008.

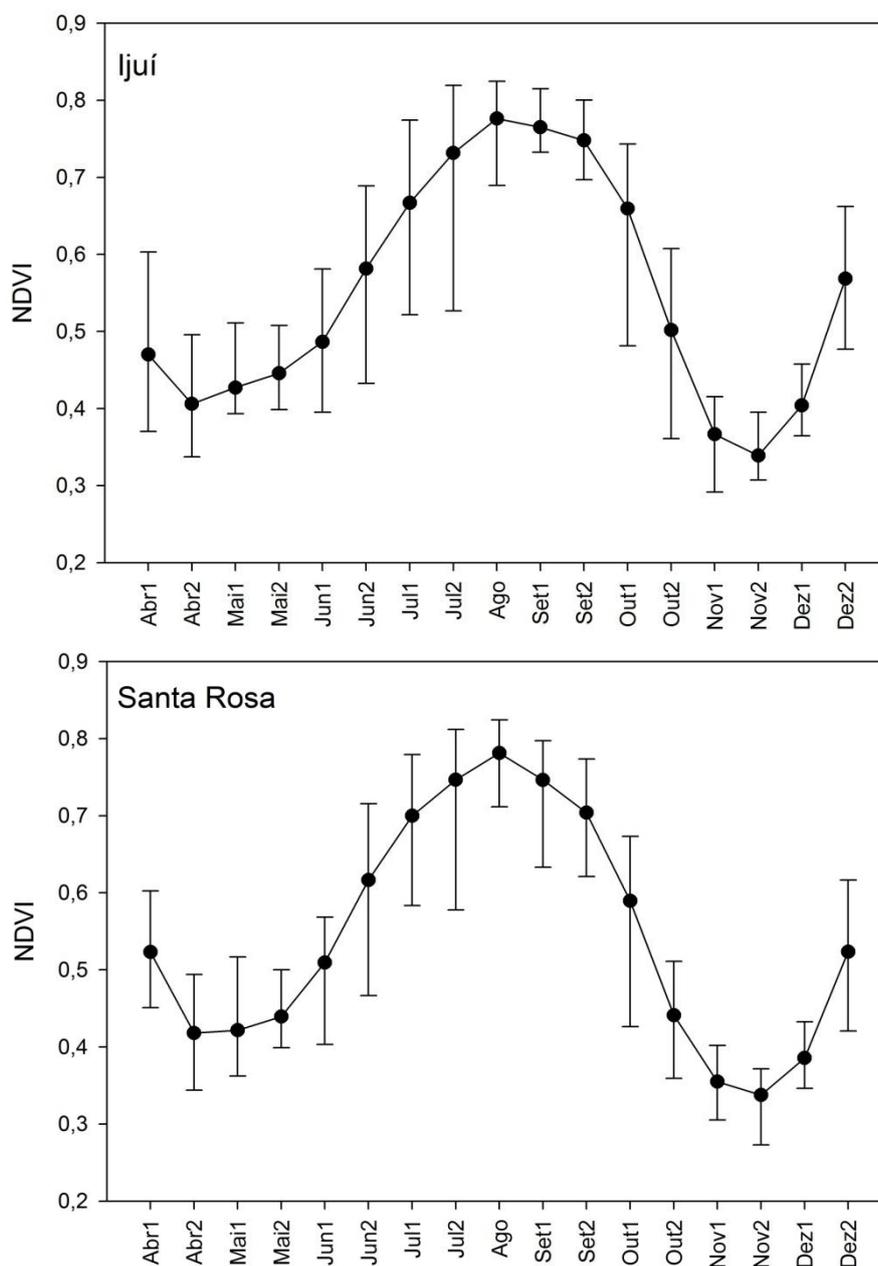


FIGURA 40. Perfis temporais de NDVI/MODIS (valores médios, máximos e mínimos) da classe cereais de estação fria nas regionais EMATER/RS Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008.

A maior variabilidade interanual dos valores de NDVI no início do ciclo, nas quinzenas de julho, agosto e setembro, dependendo da regional analisada, é consequência de as plantas não terem atingido o crescimento vegetativo máximo. Nesta condição, o índice de área foliar é baixo, o dossel não cobre totalmente o solo e pode haver influência do solo nos valores de NDVI. A influência depende do tipo de solo, do

teor de umidade e da presença de resíduos culturais. Sing *et al.* (2006) empregaram valores de NDVI referentes ao período de máximo índice de área foliar para realizar estimativas de rendimento de grãos de trigo, na Índia. Segundo os autores, valores de NDVI do início do ciclo não foram empregados em função da cobertura incompleta do solo pelo dossel.

Nos perfis temporais de NDVI/MODIS da classe cereais de estação fria, menores amplitudes dos valores de NDVI ocorreram nos períodos próximos (anteriores e posteriores) à quinzena na qual o índice atingiu o valor máximo: da segunda quinzena de setembro à segunda de outubro para regional Caxias do Sul, em setembro para as regionais Erechim e Passo Fundo e de agosto à primeira quinzena de setembro para as regionais Ijuí e Santa Rosa. Assim como verificado nos calendários agrícolas médios (Tabela 9), também houve semelhança entre as regionais Erechim e Passo Fundo, e entre Ijuí e Santa Rosa, quanto à quinzena em que o máximo NDVI foi atingido.

A menor variabilidade dos valores de NDVI nas quinzenas próximas às do máximo, pode indicar que o índice apresentou saturação. A saturação do NDVI ocorre em função da relação não linear da reflectância da vegetação com a biomassa (Ponzoni, 2001). Assim, mesmo que as culturas continuem apresentando incrementos de biomassa, os valores de NDVI não sofrem alterações proporcionais. No Rio Grande do Sul, saturação foi verificada em perfis temporais de NDVI de arroz irrigado (Klering, 2007), soja (Almeida, 2008) e *Paspalum notatum* (Fonseca *et al.*, 2006).

O NDVI é considerado um indicador do crescimento da vegetação. Este índice de vegetação pode ser empregado na determinação de variáveis biofísicas com as quais apresenta elevada correlação, tais como biomassa (Ponzoni, 2001). A biomassa acumulada pelas plantas pode ser relacionada ao rendimento de grãos, pois o enchimento dos grãos depende dos materiais fotossintetizados acumulados pelas

plantas. Os materiais translocados aos grãos provêm da fotossíntese e da remobilização de nutrientes previamente armazenados em folhas, colmos e raízes (Mundstock, 1999). Maiores acúmulos de biomassa significam uma maior quantidade de fotoassimilados disponível para a formação e o enchimento dos grãos e, na ausência de outros fatores, proporcionam maiores rendimentos. Assim, como indicador de biomassa, o NDVI pode ser associado indiretamente ao rendimento de grãos de trigo.

A variabilidade interanual dos perfis temporais de NDVI/MODIS pode ser associada à variabilidade dos rendimentos regionais de grãos de trigo. Os perfis temporais de NDVI/MODIS referentes aos anos de máximo e mínimo rendimento regional de grãos de trigo (Figura 41) mostraram-se distintos no que se refere à evolução temporal do NDVI. Nas regionais Caxias do Sul e Erechim, os perfis temporais dos anos de máximo rendimento de grãos (respectivamente 2.794 kg ha⁻¹ em 2008 e 2.471 kg ha⁻¹ em 2004) caracterizaram-se pelos maiores valores de NDVI e pela maior área abaixo da curva (Tabela 13), comparativamente aos perfis dos anos com menor rendimento de grãos (2.160 kg ha⁻¹ em Caxias do Sul e 1.590 kg ha⁻¹ em Erechim, ambos em 2000).

Na regional Passo Fundo não foi possível estabelecer uma distinção entre os perfis dos anos 2002 (mínimo rendimento de grãos, 1.586 kg ha⁻¹) e 2003 (máximo rendimento de grãos, 2.296 kg ha⁻¹).

Nas regionais Ijuí e Santa Rosa, perfis temporais de NDVI/MODIS dos anos de máximo rendimento regional de grãos de trigo caracterizaram-se não pelos maiores valores de NDVI, mas pelo “deslocamento” do perfil no tempo. Nos anos de máximo rendimento de grãos, a queda dos valores de NDVI (após o valor máximo) ocorreu entre quinze dias e um mês após a quinzena em que essa queda se deu nos anos de mínimo rendimento de grãos.

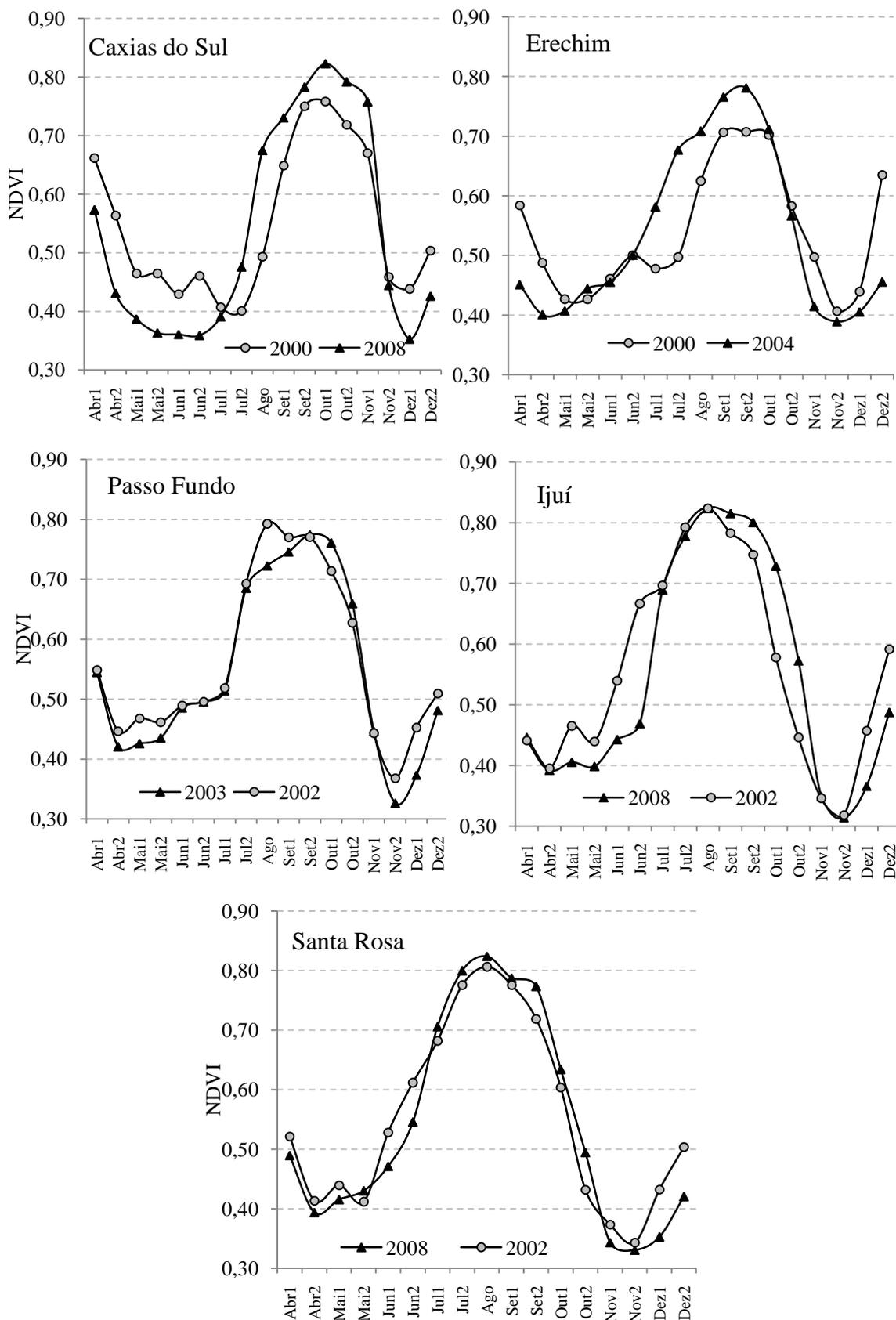


FIGURA 41. Perfis temporais de NDVI/MODIS dos anos de maior (▲) e menor (●) rendimento de grãos de trigo nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa.

Na comparação entre regionais, foi possível observar que diferenças entre perfis de anos de máximo e mínimo rendimento de grãos foram maiores em Caxias do Sul e Erechim. Nestas regionais, anos de máximo rendimento foram aqueles nos quais a área abaixo da curva descrita pelo perfil (NDVI área) também foi maior (Tabela 13).

TABELA 13. Rendimento de grãos de trigo (kg ha^{-1}), NDVI área e NDVI tempo nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008.

	Caxias			Erechim			Passo Fundo		
	Rendimento (kg ha^{-1})	NDVI		Rendimento (kg ha^{-1})	NDVI		Rendimento (kg ha^{-1})	NDVI	
		Área	Tempo		Área	Tempo		Área	Tempo
2000	2160	1,13	4	1590	1,12	7	1802	1,39	9
2001	2610	1,21	5	2010	1,46	8	2053	1,84	7
2002	2447	1,44	5	1928	1,04	7	1586	0,95	7
2003	2571	1,29	5	2334	1,44	8	2296	1,67	9
2004	2755	1,19	5	2471	1,90	9	1967	2,28	9
2005	2434	1,41	6	1713	1,39	9	1794	1,25	8
2006	2760	1,71	7	2248	1,22	6	1444	1,52	7
2007	2446	1,42	8	2049	0,95	7	1993	1,22	6
2008	2794	1,92	6	2253	1,31	8	2127	1,57	8
	Ijuí			Santa Rosa					
	Rendimento (kg ha^{-1})	NDVI		Rendimento (kg ha^{-1})	NDVI				
		Área	Tempo		Área	Tempo			
2000	1464	1,10	6	1486	1,02	6			
2001	1785	2,10	7	1306	1,32	5			
2002	1212	1,83	7	1131	1,43	5			
2003	2228	1,88	9	2110	1,70	6			
2004	1612	2,09	7	1501	1,98	7			
2005	1485	0,97	7	1339	0,82	7			
2006	899	2,01	7	565	1,44	5			
2007	2055	1,46	7	1963	1,41	7			
2008	2260	1,47	7	2419	1,63	7			

A elaboração de perfis temporais de NDVI/MODIS médios, considerando os perfis de anos com rendimento de grãos acima ou abaixo de um valor arbitrário fixo (Figuras 42 e 43) teve como objetivo verificar a possibilidade de obtenção de perfis característicos de anos de maior ou menor rendimento de grãos, em cada regional.

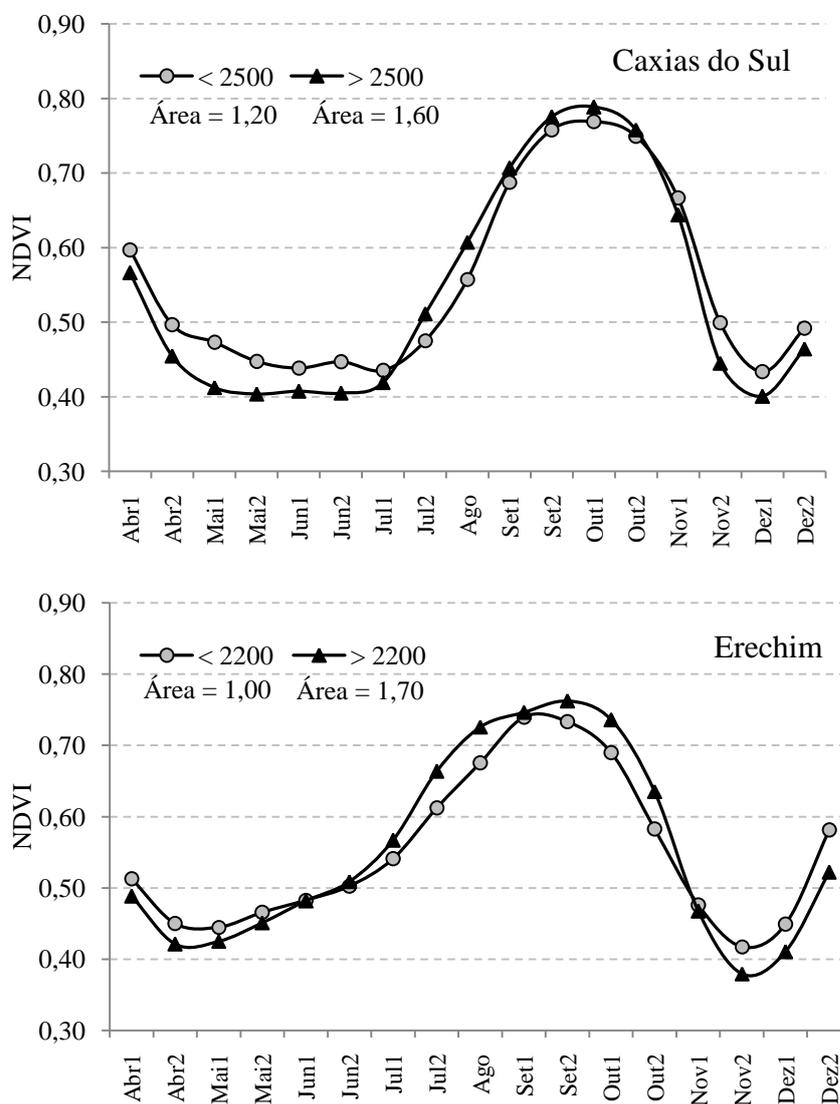


FIGURA 42. Perfis temporais de NDVI/MODIS na média dos anos com maiores (▲) e menores (●) rendimentos de grãos de trigo e áreas abaixo das curvas descritas pelos perfis (NDVI área) nas regionais EMATER/RS Caxias do Sul e Erechim.

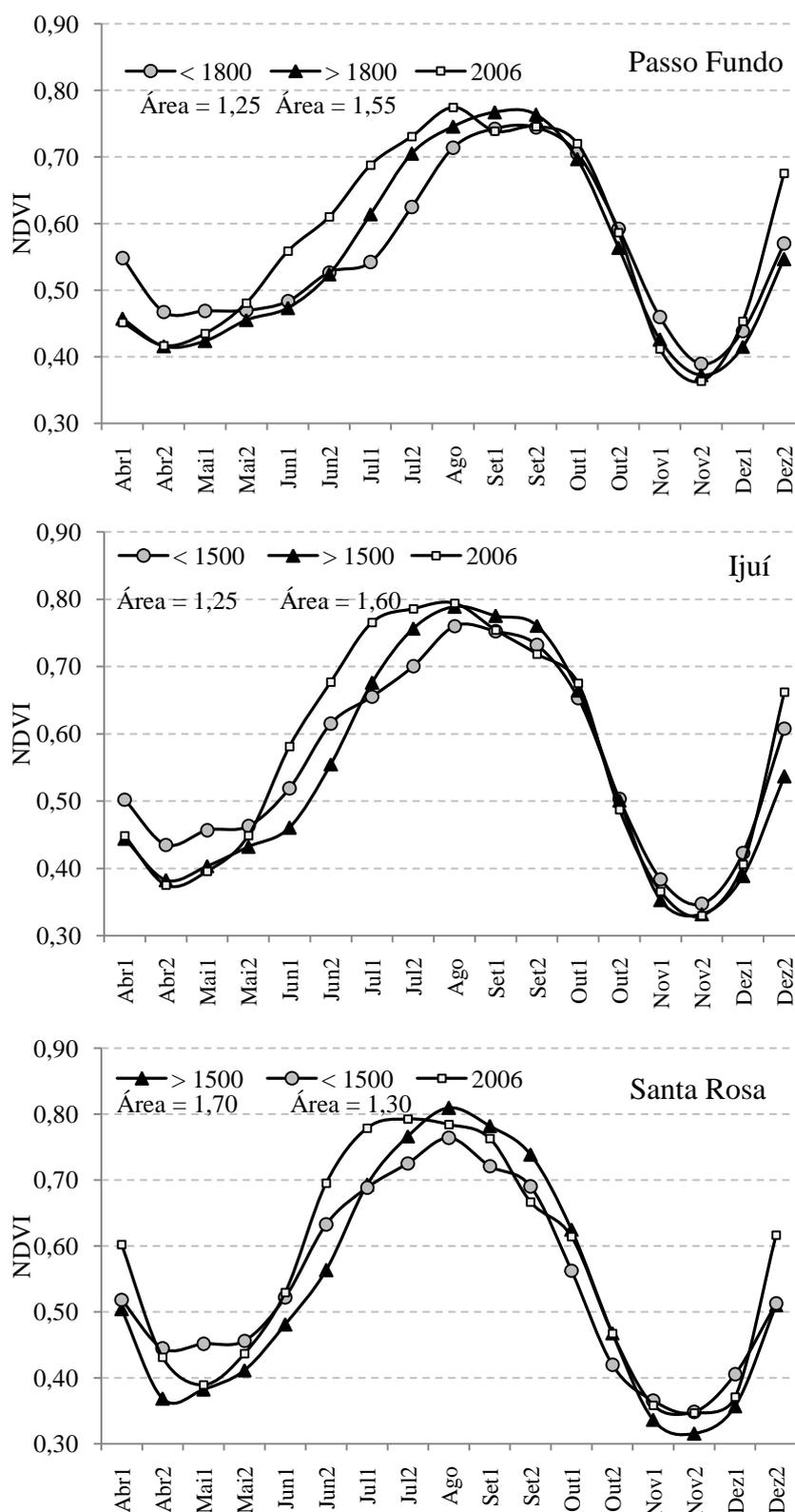


FIGURA 43. Perfis temporais de NDVI/MODIS na média dos anos com maiores (\blacktriangle) e menores (\bullet) rendimentos de grãos de trigo e áreas abaixo das curvas descritas pelos perfis nas regionais EMATER/RS Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa.

Perfis temporais médios dos anos de maiores rendimentos de grãos apresentaram maiores valores de NDVI nas quinzenas anteriores àquela de ocorrência do máximo NDVI. Em todas as regionais, maiores valores de área abaixo da curva (NDVI área) ocorreram em perfis temporais médios de anos de maiores rendimentos de grãos. De acordo com Variani *et al.* (2010), parcelas de trigo que receberam maiores doses de adubação nitrogenada em cobertura (20 a 60 kg ha⁻¹ de N) apresentaram os maiores valores de NDVI por ocasião do florescimento (0,60 a 0,77, para cultivo após milho e 0,7 a 0,78, para cultivo após soja), assim como os maiores rendimentos de grãos (2.287 a 3.527 kg ha⁻¹, após milho e 2.913 a 3.777 kg ha⁻¹, após soja) . O maior potencial produtivo foi proporcionado pela maior disponibilidade de nitrogênio, a qual acarretou maior sobrevivência dos afilhos e maior acúmulo de biomassa ao longo do crescimento vegetativo das plantas (Variani *et al.*, 2010).

Nas regionais Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, os menores rendimentos de grãos ocorreram em 2006 e não nos anos apresentados na Figura 43. Em 2006, a ocorrência de geadas quando as lavouras estavam em florescimento acarretou as perdas de safra que caracterizaram o ano (Junges *et al.*, 2008). Os perfis de NDVI/MODIS de 2006, no entanto, não foram característicos de anos de menores rendimentos de grãos, em termos de variação temporal do NDVI ou de área abaixo da curva (Tabela 13), motivo pelo qual foram apresentados separadamente.

Nos perfis temporais médios, a área abaixo da curva representou a biomassa verde acumulada em anos de maior rendimento de grãos. A associação entre NDVI área e rendimento de grãos de trigo foi maior nas regionais Caxias do Sul e Erechim (Figura 44). Nas demais regionais, maiores valores de NDVI área não indicaram, obrigatoriamente, maiores rendimentos de grãos de trigo. Nesta avaliação foi

considerada a atuação do acúmulo de biomassa pela cultura e não os efeitos dos eventos meteorológicos, para definição do rendimento final de grãos.

Os resultados apresentados permitiram verificar que perfis temporais de NDVI/MODIS podem ser empregados no monitoramento do ciclo de desenvolvimento das culturas produtoras de grãos estabelecidas no período de outono-inverno-primavera, na região de estudo. Considerando-se os perfis temporais médios, de anos de maior ou menor rendimento de grãos, a área abaixo da curva indicou a diferença em termos de acúmulo de biomassa verde. A associação entre os valores de NDVI área referentes aos perfis anuais e o rendimento de grãos, no entanto, só foi possível nas regionais Caxias do Sul e Erechim.

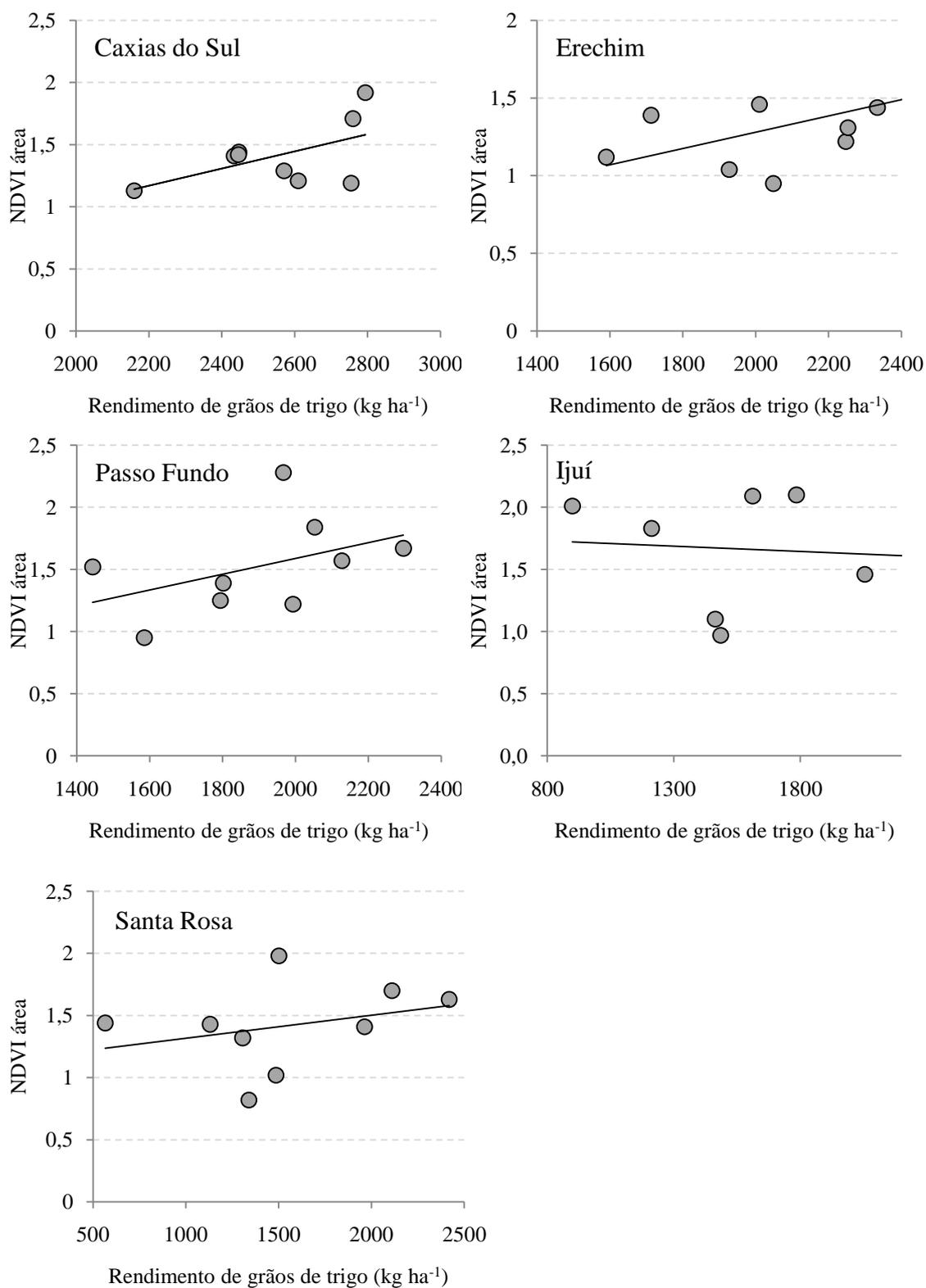


FIGURA 44. Dispersão dos valores de NDVI área e rendimentos de grãos de trigo das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008.

4.4 Correlações

4.4.1 Variáveis espectrais e rendimento regional de grãos de trigo

Para cada regional foram analisadas 24 correlações entre os dados de rendimento de grãos de trigo e de NDVI, considerando-se os valores quinzenais, mínimos, máximos, diferenças, NDVI área, NDVI tempo e soma do índice (Tabelas 14 e 15). Das correlações analisadas, cinco foram significativas nas regionais Santa Rosa, Passo Fundo e Erechim, seis em Ijuí e 14 em Caxias do Sul.

TABELA 14. Coeficiente de correlação (Pearson) entre variáveis espectrais e rendimentos de grãos de trigo, das primeiras (1) e segundas (2) quinzenas dos meses de abril a outubro, regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008.

	NDVI quinzenal													
	Abr		Mai		Jun		Jul		Ago	Set		Out		
	1	2	1	2	1	1	1	2	-	1	2	1	2	
Caxias	-0,6**	-0,8***	-0,8***	-0,8***	-0,6**	0,3	0,6**	0,6**	0,5	0,3	0,5	0,6**	0,6*	
Erechim	-0,5	-0,9***	-0,5*	-0,3	-0,1	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,6*	0,4	0,4	
Passo Fundo	-0,1	-0,3	-0,4	-0,3	-0,4	0,3	0,0	0,0	-0,1	0,3	0,2	0,0	0,0	
Ijuí	0,0	0,0	-0,3	-0,4	-0,7***	0,3	0,4	0,4	0,0	0,3	0,5*	0,4	0,4	
Santa Rosa	-0,4	-0,5*	-0,3	-0,4	-0,4	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3	0,7***	0,2	0,1	

* Significativa a 15% ** Significativa a 10% ***Significativa a 5%.

TABELA 15. Coeficiente de correlação (Pearson) entre variáveis espectrais - NDVI das primeiras (1) e segundas (2) quinzenas de novembro e dezembro, NDVI mínimo, máximo, diferença, área abaixo da curva, tempo e soma - e rendimentos de grãos de trigo das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, 2000 a 2008.

	NDVI										Soma	
	Quinzenal				Perfil							
	Nov		Dez		Mínimo	Máximo	Diferença	Área	Tempo	Valor	Etapa	
	1	2	1	2								
Caxias	-0,1	-0,3	-0,5	-0,3	-0,6**	0,7**	0,7***	0,5**	0,3	0,7**	Out	
Erechim	-0,3	-0,3	-0,4	-0,5*	-0,1	0,4	0,5*	0,5	0,1	0,5	Set a Out1	
Passo Fundo	0,0	-0,2	-0,7**	-0,4	-0,6**	0,2	0,6**	0,5*	0,5*	0,3	Set	
Ijuí	0,1	0,0	-0,6**	-0,6**	-0,3	0,0	0,1	0,0	0,6**	0,5	Ago a Out	
Santa Rosa	-0,4	-0,5	-0,5*	-0,5	-0,2	0,3	0,3	0,3	0,7***	0,5*	Ago a Set	

* Significativa a 15% ** Significativa a 10% ***Significativa a 5%.

As correlações significativas foram, de modo geral, negativas nos meses correspondentes ao início (abril a junho) e final (dezembro) do ciclo de desenvolvimento das lavouras de trigo. Correlações significativas positivas ocorreram nos meses de agosto e setembro (regionais Santa Rosa, Ijuí e Erechim) e setembro e outubro (regional Caxias do Sul). As correlações significativas positivas entre o rendimento regional de grãos de trigo e os valores de NDVI dos meses correspondentes ao florescimento, refletiram o acúmulo de biomassa verde pela cultura e a relação deste com o rendimento de grãos. Na regional Passo Fundo, foi significativa a correlação entre o rendimento de grãos e o NDVI diferença.

Klering (2007) também encontrou correlações, entre valores de NDVI/MODIS e o rendimento de grãos de arroz irrigado, negativas no período de implantação da cultura, positivas ao longo do ciclo (do desenvolvimento vegetativo à maturação fisiológica) e novamente negativas no final ciclo.

Chang *et al.* (2003) encontraram correlação positiva (0,84) entre o rendimento de grãos de milho e o NDVI, obtido através de sensor remoto ativo, nos estádios R2 (grão em bolha d'água) a R4,5 (grão pastoso a dentado). Na Índia, Singh *et al.* (2006) relacionaram o NDVI, obtido a partir de medições com espectrorradiômetro, em parcelas experimentais de trigo, com parâmetros biofísicos da cultura e com o rendimento de grãos. A maior correlação entre NDVI e rendimento de grãos (0,82) foi obtida no máximo índice de área foliar (IAF). No máximo IAF, além da correlação positiva com o rendimento de grãos, os autores também encontraram correlações significativas e positivas entre o NDVI e a matéria seca acumulada até a antese (0,87), matéria seca final (0,88) e índice de área foliar (0,83). Resultados semelhantes foram encontrados por Aparício *et al.* (2000), que correlacionaram o rendimento de grãos de trigo duro a valores de NDVI de vários estádios de desenvolvimento da cultura. Os autores

salientaram que, embora positivas em todos os estádios, as maiores correlações (0,60 e 0,50) ocorreram com os valores de NDVI medidos por ocasião da antese (em condições não irrigadas) e grão leitoso (com irrigação).

Em experimento realizado por Moreira *et al.* (2005), nos estádios de florescimento e início do enchimento de grãos de trigo ocorreram os maiores coeficientes de correlação entre o NDVI e a produção de fitomassa seca total da parte aérea, respectivamente 0,73 e 0,79. Os autores também consideraram que medidas realizadas por ocasião do florescimento e enchimento de grãos sofreram influência mínima do solo, tendo em vista o desenvolvimento do dossel. Para Rudorff e Batista (1990), a melhor correlação entre o rendimento de grãos de trigo e índice de vegetação foi de 0,93, obtida quando as plantas se encontravam no final do estágio de emborrachamento (aproximadamente 60 dias após a semeadura).

As correlações negativas no início e final do ciclo, embora significativas, devem ser analisadas com cautela, levando-se em consideração que menores valores de NDVI significam menor quantidade de biomassa. Menores valores de NDVI são esperados para as etapas de semeadura e início do desenvolvimento vegetativo. No entanto, esse menor acúmulo de biomassa não pode ser associado (linear e diretamente) a um maior rendimento de grãos. Medidas de reflectância obtidas nas etapas iniciais do ciclo de culturas agrícolas contêm informações acerca do tipo, conteúdo de água e matéria orgânica do solo (Chang *et al.*, 2003), não sendo, conseqüentemente, adequadas para caracterização da condição dos cultivos.

4.4.2 Variáveis meteorológicas e rendimento regional de grãos de trigo

Para cada regional, das 70 correlações estabelecidas entre os rendimentos regionais de grãos de trigo e as variáveis agrometeorológicas, seis foram significativas

na regional Santa Rosa (Tabela 16). Nas regionais Ijuí, Passo Fundo, Erechim e Caxias do Sul foram significativas sete, 10, 12 e 13 correlações, respectivamente.

TABELA 16. Coeficiente de correlação (Pearson) entre as variáveis agrometeorológicas e rendimentos de grãos de trigo das regionais EMATER/RS Erechim, Caxias do Sul, Santa Rosa, Ijuí e Passo Fundo, 2000 a 2008.

Erechim										
	Mensal								Períodos	
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Ago_Set	Set_Out
Temperatura máxima	-0,6**	-0,3	0,3	-0,2	0,6**	0,3	-0,5	0,0	0,5	0,5*
Temperatura mínima	-0,6**	-0,4	0,2	-0,5	0,3	-0,7***	-0,3	-0,3	-0,3	0,0
Temperatura média	-0,6**	-0,3	0,3	-0,5	0,5	-0,2	-0,5	0,1	0,2	0,4
Índice de geadas	0,2	0,2	-0,3	0,4	0,2	-	-0,5	-	0,3	0,0
					-0,5* (Set_1)					
Precipitação pluvial (mm)	-0,4	-0,7**	-0,3	-0,2	-0,6**	-0,1	0,4	0,0	-0,5*	-0,4
Precipitação pluvial (dias)	-0,3	-0,4	0,2	-0,3	-0,4	-0,3	0,4	-0,6**	-0,4	-0,4
									Jun_Ago	Jun_Set
Graus-dia	-0,6**	-0,3	0,3	-0,5	0,5	-0,2	-0,5	0,0	-0,3	-0,1

Caxias do Sul										
	Mensal								Períodos	
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Ago_Set	Set_Out
Temperatura máxima	-0,1	-0,3	0,7***	0,2	0,1	-0,1	-0,4	0,2	0,1	0,0
Temperatura mínima	-0,4	-0,7**	0,7***	0,0	-0,1	-0,6**	-0,2	-0,5	-0,4	-0,5
Temperatura média	-0,2	-0,5*	0,7***	0,1	0,0	-0,5	-0,3	-0,1	-0,2	-0,2
Índice de geadas	0,4	0,5	-0,6*	0,0	0,4	0,0	0,2	-	0,3	-
									Ago_Out	Set_Out
Precipitação pluvial (mm)	-0,1	-0,4	-0,1	-0,3	-0,5	-0,4	0,2	-0,3	-0,5*	-0,6**
Precipitação pluvial (dias)	-0,2	-0,5	0,3	-0,1	-0,2	-0,2	0,1	-0,6*	-0,3	-0,2
Graus-dia	-0,2	-0,5	0,7***	0,1	0,0	-0,5	-0,3	-0,1	-0,2	-0,2

continuação TABELA 16. Coeficiente de correlação (Pearson) entre as variáveis agrometeorológicas e rendimentos de grãos de trigo das regionais EMATER/RS Erechim, Caxias do Sul, Santa Rosa, Ijuí e Passo Fundo, 2000 a 2008.

Santa Rosa										
	Mensal								Períodos	
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Ago_Set	Ago_Out
Temperatura máxima	-0,1	-0,5	-0,1	-0,5	0,0	-0,5	0,1	-0,3	-0,5	-0,5*
Temperatura mínima	0,0	-0,2	0,0	-0,2	0,2	0,0	0,1	-0,4	-0,1	-0,1
Temperatura média	-0,1	-0,4	0,0	-0,4	0,1	-0,4	0,1	-0,4	-0,3	-0,4
Índice de geadas	0,6*	0,4	0,2	0,0	-0,5*	-	-	-	-0,2	-0,2
Precipitação pluvial (mm)	0,1	-0,2	-0,4	-0,4	-0,5	0,2	-0,3	-0,3	-0,5*	-0,2
Precipitação pluvial (dias)	0,0	-0,1	-0,6**	-0,1	-0,5*	0,0	0,0	-0,3	-0,4	-0,3
									Jun_Ago	Jun_Set
Graus-dia	-0,1	-0,4	0,0	-0,4	0,1	-0,4	0,1	-0,4	-0,4	-0,4
Ijuí										
	Mensal								Períodos	
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Ago_Set	Ago_Out
Temperatura máxima	-0,2	-0,3	-0,2	-0,4	0,2	0,4	0,2	-0,4	-0,2	0,0
Temperatura mínima	-0,3	-0,4	0,0	-0,3	0,2	-0,2	-0,4	0,6**	-0,1	-0,2
Temperatura média	-0,3	-0,4	0,0	-0,4	0,3	-0,1	0,0	0,6**	-0,1	-0,1
Índice de geadas	0,4	0,1	0,0	0,2	-0,2	-0,4	-	-	0,1	0,0
Precipitação pluvial (mm)	0,0	-0,1	0,0	-0,3	-0,4	0,0	-0,6**	0,1	-0,4	-0,4
Precipitação pluvial (dias)	0,0	-0,3	0,0	-0,1	-0,1	0,1	-0,6**	-0,2	-0,1	0,0
									Jun_Ago	Jun_Set
Graus-dia	-0,3	-0,4	-0,1	-0,4	0,2	-0,1	-0,1	0,6**	-0,6*	-0,5*
Passo Fundo										
	Mensal								Períodos	
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Ago_Set	Ago_Out
Temperatura máxima	-0,1	0,3	0,3	0,0	0,4	-0,4	0,1	-0,4	0,5	0,2
Temperatura mínima	-0,2	0,0	0,0	-0,1	0,4	-0,5	-0,2	-0,6**	0,2	0,0
Temperatura média	-0,2	0,1	0,2	-0,1	0,5	-0,6*	0,0	-0,6*	0,4	0,1
Índice de geadas	0,3	0,0	0,1	-0,4	-0,6**	-	-	-	-0,6*	-0,6**
Precipitação pluvial (mm)	0,1	-0,3	-0,4	-0,5*	-0,2	0,2	-0,5	-0,1	-0,5*	-0,2
Precipitação pluvial (dias)	-0,3	0,4	-0,4	-0,6*	0,0	-0,1	-0,3	-0,2	-0,4	-0,3
									Jun_Ago	Jun_Set
Graus-dia	-0,2	0,1	0,2	-0,1	0,5	-0,6*	0,0	-0,2	0,1	0,4

* Significativa a 15% ** Significativa a 10% ***Significativa a 5%.

A maior parte das correlações foi significativa a 10% e 15% de significância estatística. Correlações significativas a 5% ocorreram somente nas regionais Erechim

(temperatura mínima do ar de outubro) e Caxias do Sul (temperaturas do ar máxima, mínima e média, em julho).

A maior parte das correlações significativas foi negativa, indicando uma associação linear inversa do rendimento regional de grãos de trigo com as variáveis agrometeorológicas índice de geadas de setembro (regionais Santa Rosa, Passo Fundo e Erechim) e temperatura mínima do ar de outubro (regionais Erechim e Caxias do Sul); assim como com a precipitação pluvial acumulada nos meses de agosto e setembro (regional Santa Rosa, Passo Fundo e Erechim) e setembro e outubro (regional Caxias do Sul). Essas correlações refletiram adequadamente a penalização do rendimento de grãos decorrentes da ocorrência de geadas e excesso de precipitação pluvial nas etapas de florescimento e início do processo de enchimento dos grãos.

É importante salientar que a precipitação pluvial foi associada negativamente ao rendimento de grãos nas etapas de florescimento e início do enchimento de grãos e não nos meses correspondentes às etapas de maturação fisiológica e colheita, que constitui um dos critérios de riscos climáticos empregado na definição das épocas de semeadura para trigo no Rio Grande do Sul (Cunha *et al.*, 2001). Na regional Ijuí, a precipitação pluvial (total) e número de dias com precipitação pluvial do mês de novembro foram negativamente correlacionados ao rendimento regional de grãos de trigo. Esta correlação, apesar de significativa, deve ser analisada com cautela, tendo em vista que 73% da área cultivada na regional foram colhidos na primeira quinzena de novembro (Figura 20).

Neste trabalho, todas as variáveis foram analisadas de forma linear, não sendo consideradas eventuais correlações não-lineares.

A caracterização das condições meteorológicas nas regionais, considerando-se os dados médios de temperatura do ar e precipitação pluvial no período consta no Apêndice 2.

4.5 Ajuste de modelos agrometeorológicos-espectrais

As equações de regressão linear múltipla que melhor se ajustaram à estimativa de rendimento de grãos de trigo, em cada regional, constam na Tabela 17. As equações de regressão apresentaram coeficientes de determinação ajustados iguais ou superiores a 0,70. As variáveis agrometeorológicas e espectrais explicaram, no mínimo, 70% do rendimento regional de grãos de trigo, no período analisado.

O maior erro padrão ocorreu no modelo ajustado para a regional Santa Rosa (324 kg ha⁻¹). Este resultado pode ser atribuído à maior variabilidade entre safras registrada nesta regional. Em Santa Rosa, os rendimentos regionais de grãos de trigo variaram de 565 kg ha⁻¹ (2006) a 2.419 kg ha⁻¹ (2008). O modelo superestimou os rendimentos desta regional em dois anos (2004 e 2006), o que também pode ser visualizado na reta de dispersão dos valores estimados e observados (Figuras 45 e 46). Nos modelos das demais regionais o erro padrão foi inferior a 150 kg ha⁻¹.

TABELA 17. Modelos de regressão linear múltipla para estimativa de rendimento de grãos de trigo das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa a partir de variáveis agrometeorológicas e espectrais, e parâmetros derivados, 2000 a 2008.

Regional	Equação de regressão linear múltipla	Significância	Coeficientes de determinação		Variáveis agrometeorológicas e espectrais	Significância Coeficientes	Erro padrão (kg ha ⁻¹)	Erro absoluto (kg ha ⁻¹)	
			R ²	R ² ajustado				Maior	Menor
Caxias do Sul	1) Y = -2977,5 + 3835,5NDVI - 0,9PREC	0,001	0,92	0,90	NDVI_soma_out PREC_soma_set_out	0,001 0,001	66	158 (7%) 2001	6 (0,2%) 2003
Caxias do Sul	2) Y = -210 + 1197NDVI - 0,72PREC - 43TMIN	0,021	0,84	0,75	NDVI_soma_set_out PREC_soma_set_out Temp_minima_out	0,029 0,033 0,197	105	111 (5%) 2001	2 (0,1%) 2003
Erechim	1) 1461 + 4063NDVI - 2PREC - 233IG	0,022	0,83	0,73	NDVI_diferença PREC_set_out1 IG_set2	0,072 0,031 0,087	141	152 (9%) 2005	17 (0,7%) 2003
Passo Fundo	1) Y = 2044 + 1602NDVI - 31IG - 2PREC	0,013	0,87	0,79	NDVI_diferença PREC_soma_ago_set IG_soma_ago_set	0,150 0,009 0,004	124	168 (8%) 2004	16 (1%) 2006
Passo Fundo	2) Y = 2642 + 1435NDVI - 64IG - 2PREC	0,026	0,76	0,70	NDVI_diferença PREC_soma_set_out IG_soma_ago_set	0,250 0,018 0,019	141	211 (11%) 2004	53 (3%) 2001
Ijuí	1) Y = - 4972 + 1845NDVI + 458NDVIT - 18IG - 5PREC	0,006	0,96	0,91	NDVI_soma_ago_set NDVI_tempo PREC_soma_nov IG_soma_ago_set	0,030 0,005 0,003 0,086	138	175 (12%) 2005	33 (1,5%) 2008
Ijuí	2) Y = - 5966 + 1886,5 NDVI + 617NDVIT - 51IG - 3PREC	0,036	0,89	0,80	NDVI_soma_ago_set NDVI_tempo PREC_soma_ago_set IG_soma_ago_set	0,093 0,003 0,018 0,018	209	155 (17%) 2006	61 (4%) 2005
Santa Rosa	1) Y = - 4436 + 3159NDVI - 66IG - 3,6PREC	0,038	0,79	0,70	NDVI_soma_ago_set PREC_soma_ago_set IG_soma_ago_set	0,024 0,026 0,075	324	260 (46%) 2006	40 (2%) 2008

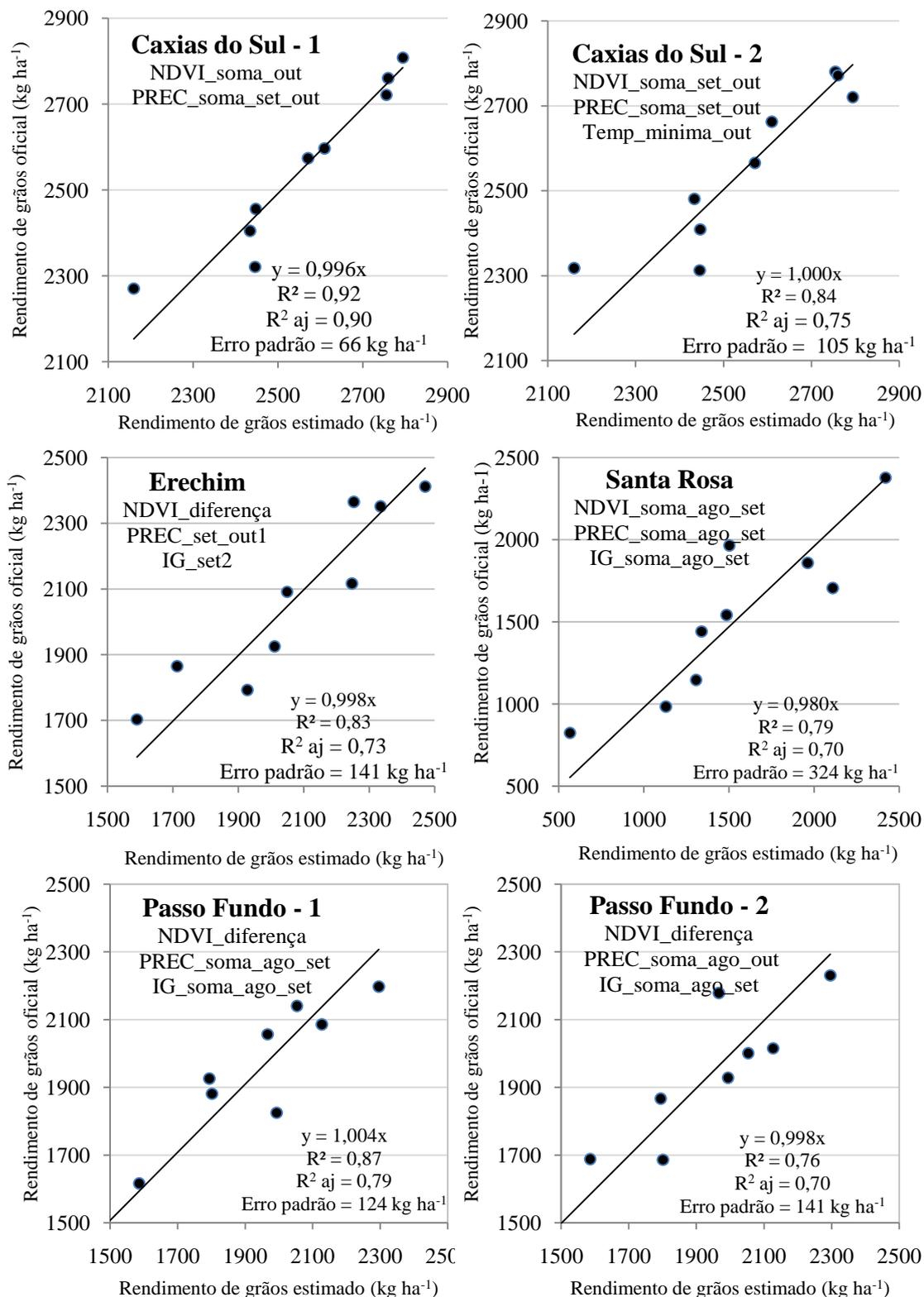


FIGURA 45. Dispersão de valores estimados e observados (oficiais) do rendimento de grãos de trigo das regionais EMATER/RS Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo e Santa Rosa, 2000 a 2008.

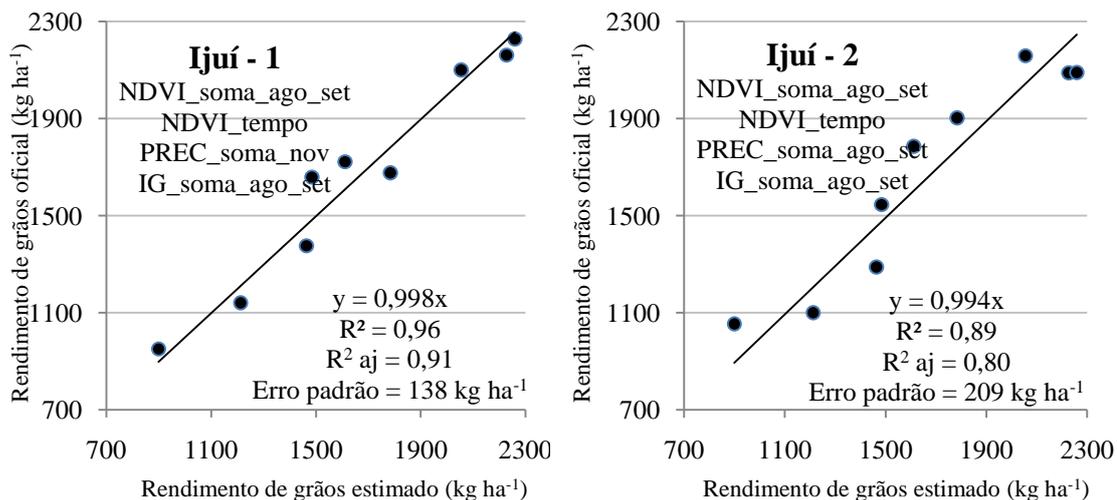


FIGURA 46. Dispersão de valores estimados e observados (oficiais) do rendimento de grãos de trigo da regional EMATER/RS Ijuí, 2000 a 2008.

Os modelos ajustados apresentaram erros absolutos inferiores a 15% do rendimento oficial de grãos de trigo (rendimento observado) (Tabela 17), com exceção do modelo de Ijuí (modelo 2) e do modelo de Santa Rosa. O maior erro absoluto do modelo 2 da regional Ijuí foi de 155 kg ha⁻¹, valor semelhante ou inferior a erros absolutos registrados em modelos de outras regionais, de maneira que o erro de estimativa de rendimento não foi considerado suficientemente elevado para desaconselhar o emprego do modelo. Já para a regional Santa Rosa, o erro absoluto de 260 kg ha⁻¹, embora contido no erro padrão (324 kg ha⁻¹), foi considerado elevado. Este resultado pode ser decorrente do fato de que, em função das geadas ocorridas nos meses de agosto e setembro, o rendimento de grãos de trigo foi de apenas 565 kg ha⁻¹ em 2006. As variáveis precipitação pluvial e NDVI de agosto e setembro não indicaram o ano de 2006 como sendo de baixo rendimento de grãos e, assim, o modelo estimou rendimento de 826 kg ha⁻¹ para regional Santa Rosa.

As equações que melhor se ajustaram à estimativa de rendimento de grãos de trigo empregaram as variáveis agrometeorológicas índice de geadas e precipitação pluvial e as variáveis espectrais NDVI diferença, NDVI soma (agosto e setembro) e

NDVI de outubro (regional Caxias do Sul). As variáveis índice de geadas e precipitação pluvial também foram empregadas no zoneamento e calendários de semeadura de trigo no Rio Grande do Sul (Cunha *et al.*, 2001), assim como no modelo de estimativa de rendimento de grãos de trigo proposto por Mota (1998).

As equações que definem os modelos de estimativa de rendimento de grãos de trigo consideraram as variações do ciclo da cultura, de acordo com os calendários médios das regionais. A maior porcentagem de área cultivada de trigo encontrou-se no estágio de florescimento no mês de setembro nas regionais Santa Rosa, Ijuí, Passo Fundo e Erechim (Tabela 9). Os modelos ajustados penalizaram o rendimento de grão com a inserção da variável índice de geadas referente aos meses de agosto e setembro. Considerando que as plantas de trigo são suscetíveis à ocorrência de baixas temperaturas do ar não somente no florescimento em si, mas também no período crítico de 30 dias, 20 dias antes da antese e 10 dias após (Cunha, 2006), a inserção dos dados de agosto se justifica.

A maior parte da área cultivada de trigo, na regional Caxias do Sul, por sua vez, encontrou-se em florescimento em outubro, na média dos anos analisados (Tabela 9). Neste mês, o índice de geadas na regional foi baixo ou nulo. O índice de geadas não foi inserido na equação (modelo 1) de estimativa de rendimento desta regional. A variável temperatura mínima de outubro, apesar de correlacionada ao rendimento de grãos da regional Caxias do Sul, não melhorou as estimativas (modelo 2).

O excesso de precipitação pluvial afeta negativamente o rendimento de grãos a partir do florescimento e, especialmente, durante o enchimento de grãos. No florescimento, dias chuvosos ou nublados não favorecem a abertura das flores, comprometendo a fertilização e o início da formação do grão (Mundstock, 1999). No enchimento de grãos, a menor disponibilidade de radiação solar, decorrente do excesso

de precipitação, faz com que a taxa fotossintética seja menor e diminuam os fotoassimilados destinados à formação e enchimento dos grãos (grãos com menor peso).

A precipitação pluvial dos meses correspondentes ao florescimento foi a variável agrometeorológica inserida nos modelos ajustados, refletindo a importância desta na definição do rendimento de grãos. Na regressão linear múltipla que definiu o modelo de estimativa de rendimento de grãos de trigo da regional Ijuí (modelo 1), foi inserida a variável precipitação pluvial do mês de novembro. Em novembro, a maior parte da área cultivada se encontrava em maturação fisiológica ou na colheita (Tabela 9). A partir da maturação fisiológica, o excesso de precipitação pluvial pode ocasionar redução do peso dos grãos em virtude do processo de germinação pré-colheita. No entanto, a inserção de variáveis referentes aos meses de colheita pode dificultar a utilização dos modelos em sistemas de previsão de safra, motivo pelo qual foi ajustada uma equação de regressão linear, para regional Ijuí, com a variável precipitação pluvial de agosto e setembro (modelo 2).

Os resultados deste trabalho indicaram que as variáveis índice de geadas e precipitação pluvial, além de corresponderem aos critérios de riscos climáticos considerados no zoneamento da cultura do trigo no Rio Grande do Sul (Cunha *et al.*, 2001), também podem ser empregadas na estimativa de rendimento de grãos. No zoneamento agrícola foi considerado risco climático a ocorrência de excesso de precipitação pluvial na maturação fisiológica e até 15 dias após. Nos modelos ajustados, o rendimento de grãos foi penalizado pela precipitação pluvial dos meses em que as lavouras se encontravam em pré-florescimento e florescimento (agosto e setembro). Este resultado indica a potencialidade de emprego dos modelos agrometeorológicos-espectrais como ferramenta de complementação e atualização das variáveis meteorológicas adotadas na definição do zoneamento da cultura.

No que diz respeito às variáveis espectrais, os modelos ajustados empregaram o NDVI dos meses de agosto e setembro (regionais Santa Rosa e Ijuí), setembro e outubro (regional Caxias do Sul), NDVI diferença (regionais Passo Fundo e Ijuí) e NDVI tempo (regional Ijuí). Os valores de NDVI dos meses de agosto, setembro e outubro corresponderam às etapas em que as lavouras se encontravam nas etapas de pré-florescimento e florescimento, nas distintas regionais. A inserção destes valores de NDVI, em modelos de estimativa de rendimento de grãos, indicou que a biomassa verde na etapa imediatamente anterior ao período reprodutivo foi uma variável importante na definição do rendimento final de grãos. De acordo com Labus *et al.* (2002), o emprego do NDVI referente aos períodos nos quais o índice atinge o valor máximo (final do crescimento vegetativo) é o mais adequado para estimativas de rendimento de grãos de trigo.

As informações espectrais, obtidas neste trabalho em escala regional, possibilitam o ajuste de modelos de estimativa de rendimento de grãos condizentes com a realidade temporal e espacial da produção de trigo na região de estudo. Assim, o emprego do índice de vegetação NDVI, obtido a partir de imagens MODIS, disponibilizadas gratuitamente aos usuários, permite que os modelos ajustados sejam inseridos em sistemas de previsão de safra, conferindo-lhes as características de baixo custo, facilidade de processamento e menor subjetividade das estimativas, quando comparadas a estimativas baseadas em questionários.

Os modelos ajustados, além de estimarem o rendimento de grãos, permitiram identificar as variáveis (agrometeorológicas e espectrais) mais importantes na definição do rendimento em cada uma das regionais. Da mesma maneira, foi possível verificar que a etapa final do crescimento vegetativo e o período de florescimento e início da

formação dos grãos são críticos para a cultura, seja em função da biomassa acumulada, seja em virtude da ocorrência de geadas ou precipitação pluvial.

Considerando-se, que para o ajuste dos modelos de estimativa de rendimento de grãos de trigo, foram empregados dados de apenas uma estação meteorológica por regional, os resultados podem ser considerados satisfatórios. O emprego de dados meteorológicos de apenas uma estação significou maior facilidade de inserção das variáveis nos modelos, diminuindo a quantidade de dados a serem processados ou a necessidade de interpolação. Apesar disso, a caracterização das condições atmosféricas com dados de um maior número de estações meteorológicas pode tornar as estimativas mais precisas, especialmente em sub-regiões ou grupos de municípios, para as quais o detalhamento da variabilidade climática em termos espaciais é necessário.

A verificação da capacidade preditiva dos modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento de grãos de trigo foi avaliada considerando-se como variáveis observadas os rendimentos regionais calculados a partir dos dados oficiais de área colhida e quantidade produzida. As estimativas oficiais divulgadas pelo IBGE correspondem às informações disponíveis para caracterização das safras agrícolas. É importante salientar que, tanto os valores oficiais quanto aqueles preditos por modelos correspondem a estimativas. Nesse sentido, possíveis discordâncias entre estimativas podem indicar a necessidade de detalhamento em ambas metodologias de obtenção da informação.

Os modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento de grãos de trigo ajustados são condizentes com a realidade espacial e temporal da principal região tritícola do Rio Grande do Sul. No entanto, dada sua natureza empírica, modelos de regressão linear múltipla não devem ser empregados em situações distintas daquelas para as quais foram desenvolvidos.

4.6 Considerações finais

Os modelos de estimativa de rendimento de grãos de trigo, ajustados a partir de variáveis agrometeorológicas e espectrais, apresentaram resultados satisfatórios, considerando-se estimativas em caráter regional. Algumas considerações, no entanto, são necessárias.

A divisão da região de estudo, em regionais da EMATER/RS, foi baseada na disponibilidade de informações acerca do calendário agrícola da cultura do trigo. Esses dados foram fundamentais para caracterização do ciclo e para inserção, nos modelos, de variáveis efetivamente relacionadas ao rendimento de grãos. O ajuste de modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento de grãos de trigo pode ser realizado, em trabalhos futuros, com adoção de outra divisão espacial da região de estudo. Nesse sentido, sugere-se testar o ajuste de modelos para os grupos de municípios gerados pela análise de agrupamentos, tendo em vista que esses municípios são semelhantes quanto ao rendimento médio de grãos de trigo.

A classificação não supervisionada de áreas agrícolas, identificadas por máscaras de cultivos, permitiu discriminar as áreas agrícolas estabelecidas, no período de outono-inverno-primavera, nas regionais analisadas. Nesse sentido, o estudo multitemporal foi adequado à distinção de áreas agrícolas cultivadas, com cereais de estação fria, para produção de grãos ou para cobertura do solo e pastagens. A coleta de pontos de controle, com uso de GPS (*Global Positioning System*), a campo, se faz necessária para verificação da acurácia da classificação realizada.

Neste trabalho, para o ajuste de modelos agrometeorológicos-espectrais, foram executadas as etapas de avaliação dos dados e determinação das equações. Salienta-se que a validação dos modelos de estimativa de rendimento grãos de trigo deve ser realizada em trabalhos futuros.

5 CONCLUSÕES

O trigo é o principal cereal de estação fria destinado à produção de grãos estabelecido no período de outono-inverno-primavera, nos municípios localizados na porção norte do Rio Grande do Sul. Nesta região, os rendimentos de grãos de trigo aumentam no sentido leste-oeste, concordando com o gradiente do quociente fototermal. As regionais localizadas a leste (Caxias do Sul e Erechim) apresentam maiores rendimentos de grãos de trigo e menor variabilidade entre safras, comparativamente às regionais localizadas na porção central e oeste da região (Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa). A variação interanual dos rendimentos regionais de grãos de trigo está associada, sobretudo, às variações das condições meteorológicas, dada ausência de tendência tecnológica.

Os calendários agrícolas indicam coerência entre a evolução temporal do ciclo das lavouras nas regionais e as datas recomendadas de semeadura de trigo no Estado.

É possível relacionar o calendário agrícola com a evolução temporal do índice de vegetação NDVI obtido de áreas agrícolas cultivadas com cereais de estação fria para produção de grãos. Os valores máximos de NDVI ocorrem em quinzenas anteriores àquela correspondente ao florescimento e há menor variabilidade interanual dos valores de NDVI em períodos próximos (anteriores e posteriores) à quinzena na qual o índice atinge o máximo. A área abaixo da curva descrita pelo perfil temporal de NDVI pode indicar o acúmulo de biomassa pelas plantas e os maiores valores ocorrem nos perfis temporais dos anos de maiores rendimentos regionais de grãos de trigo.

Em estudos multitemporais, áreas agrícolas cultivadas com cereais de estação fria para produção de grãos podem ser discriminadas das demais áreas agrícolas estabelecidas no período de outono-inverno-primavera, através da classificação não supervisionada das áreas identificadas por máscaras de cultivo. Há necessidade de verificação da acurácia da classificação para validação da metodologia.

As variáveis índice de geadas e precipitação pluvial, critérios de riscos climáticos considerados no zoneamento da cultura do trigo no Rio Grande do Sul, podem ser empregadas em modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa do rendimento de grãos de trigo. O final da etapa de crescimento vegetativo, o florescimento e o início da formação dos grãos são os principais períodos relacionados à definição do rendimento de grãos, tanto em função de geadas e da precipitação pluvial, quanto no acúmulo de biomassa estimado por NDVI.

Os modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento de grãos ajustados neste trabalho são condizentes com a distribuição espacial e temporal do cultivo de trigo na principal região tritícola do Rio Grande do Sul. Os resultados dos modelos são adequados às estimativas de rendimento de grãos em caráter regional. Os modelos agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento de grãos de trigo podem ser inseridos em sistemas de monitoramento e previsão de safra, conferindo-lhes características de baixo custo, facilidade de processamento e objetividade nas estimativas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABITRIGO. **História do trigo - Parte 2:** a triticultura brasileira (aspectos históricos). Disponível em: <http://www.abitrigo.com.br/historia_do_trigo2.asp>. Acesso em: 29 jun. 2011b.

ALMEIDA, T. S. **Respostas espectrais da soja sob diferentes condições hídricas e de preparo do solo.** 2008. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

ANTUNES, J.M. Área de cevada reduz no Brasil. **Portal do Agronegócio** [Viçosa], 22 abr 2009. Notícias. Disponível em: <<http://www.portaldoagronegocio.com.br/conteudo.php?id=29318>>. Acesso em: 15 jun. 2010.

APARICIO, N. *et al.* Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. **Agronomy Journal**, Madison, v.92, n.1, p.83-91, 2000.

ASSAD, E.D. *et al.* Sistema de previsão da safra de soja para o Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.5, p.615-625, 2007.

BAZGEER, S. *et al.* Pre-harvest wheat yield predictions using agromet-spectral-trend-yield models for Hoshiarpur and Rupnagar districts of Punjab. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, Ahmedabad, v.34, n.3, p.269-277, 2006.

BERGAMASCHI, H. **Fenologia.** Disponível em: <www.ufrgs.br/agropfagrom/disciplinas/502/fenolog.doc>. Acesso em: 10 jun. 2011.

BERGAMASCHI, H. *et al.* Maize yield and rainfall on different spatial and temporal scales in Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.2, p.603-613, 2007.

BRAGA, H.J. **Previsão agrícola:** uma nova abordagem-uso de scanner aerotransportável e redes neurais. 1995. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

BOUMAN, B.A.M. *et al.* The “School of de Wit” crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. **Agricultural Systems**, Netherlands, v.52, n.2/3, p.171-198, 1996.

CAIERÃO, E.; CUNHA, G.R.; PIRES, J.L.F. Cevada. In: MONTEIRO, J.E.B.A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, 2009. p.169-181.

CANZIANI, J.R.; GUIMARÃES, V.D.A. O trigo no Brasil e no mundo: cadeia de produção, transformação e industrialização. In: CUNHA, G.R. **Oficina sobre trigo no Brasil – bases para construção de uma nova triticultura brasileira**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. p.29-72.

CARESANI, J.R.F. **Discriminação de cereais de estação fria destinados à produção de grãos e à produção de pastagens em imagens de média resolução espacial**. 2010. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

CHANG, J. Corn (*Zea mays* L.) yield prediction using multispectral and multivariate reflectance. **Agronomy Journal**, Madison, v.95, p.1447-1453, 2003.

COLLE, C.A. **A cadeia produtiva do trigo no Brasil: contribuição para a geração de emprego e renda**. 1998. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Economia Rural, Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO. **Indicações técnicas da comissão sul-brasileira de pesquisa de trigo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2004. 152p.

COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE AVEIA. **Indicações técnicas para cultura da aveia**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2006. 82p.

CUNHA, G. R. *et al.* Enso influences on wheat crop in Brazil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p.127-138, 1999.

CUNHA, G. R. *et al.* Zoneamento agrícola e épocas de semeadura para trigo no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.3, p.400-414, 2001.

CUNHA, G.R. *et al.* Variabilidade temporal e espacial do quociente fototermal no Rio Grande do Sul e suas implicações para a expressão do potencial de rendimento de grãos de trigo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.13, n.1, p.91-101, 2005.

CUNHA, G.R. *et al.* **Regiões de adaptação para trigo no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006 (Circular técnica on line n.20). Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/publicacoes>>. Acesso em: 10 jul. 2010.

CUNHA, G.R. *et al.* Trigo. In: MONTEIRO, J.E.B.A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, 2009. p.281-293.

DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 306p, 1994 (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem n.33).

DOURADO-NETO, D.A. et al. Principles of crop modeling and simulation: Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.55, p.46-50, 1998.

EMBRAPA TRIGO. **Informações gerais sobre a cultura do centeio**. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/trigo/index.htm>>. Acesso em: 7 jul. 2010.

EMBRAPA TRIGO. **Informações gerais sobre a cultura do trigo**. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/trigo/index.htm>>. Acesso em: 7 jul. 2011.

FIGUEIREDO, D.C. Projeto Geosafra – aprimoramento metodológicos das estimativas de safras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p.191-195.

FLOSS, E.L. *et al.* Programa de pesquisa de aveia da UPF: 30 anos de atividades. **Revista Plantio Direto**, [Passo Fundo], maio 2007. Aveia. Disponível em: <http://www.plantiodireto.com.br/?body=cont_int&id=785>. Acesso em: 13 jun 2010.

FLOSS, E.L. O papel da aveia como componente de uma agricultura sustentável. In: REUNIÃO DA COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE PESQUISA DE AVEIA, 21., 2001, Lages. **Anais...** Lages: UDESC, 2001, p.11-22.

FONSECA, E.L.; FONTANA, D.C.; ROSA, L.M.G. Evolução temporal do NDVI e sua relação com variáveis biofísicas em *Paspalum notatum*. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 14, n. 3, p. 272-280, 2006.

FONSECA, E.L. *et al.* Caracterização espectral multitemporal dos cereais de estação fria em imagens de satélite com média resolução espacial. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.10, p.2053-2059, 2010.

FONTANA, D.C.; POTGIETER, A.B.; APAN, A. Assessing the relationship between shire winter crop yield and seasonal variability of the MODIS NDVI and EVI images. **Applied GIS**, Carlton, v.3, n.1, p.1-16, 2007.

FONTANELI, R.S., SANTOS, H.P., FONTANELI, R.S. Morfologia de gramíneas. In: FONTANELI, R.S., SANTOS, H.P., FONTANELI, R.S. **Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região sul-brasileira**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. p. 33-40.

FRANCESCHI, L. Fatores pré-colheita que afetam a qualidade tecnológica de trigo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.5, p.1624-1631, 2009.

GROHS, D.S. **Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada pelo índice de vegetação por diferença normalizada**. 2008. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

GUARIENTI, E.M. Qualidade tecnológica. In: CULTIVO DE TRIGO. Passo Fundo: EMBRAPA TRIGO, 2009 (Sistemas de produção n.4). Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Trigo/CultivodeTrigo/Qualidade.htm#sub3>>. Acesso em: 7 jul. 2011.

HAIR JR., F. *et al.* Análise de regressão múltipla. In: HAIR JR. *et al.* **Análise multivariada de dados**. 6.ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2009. p. 149-220.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its application. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v.103, p.137-157, 2000.

HUETE, A.R. *et al.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.83, p.195-213, 2002.

IBGE. **Pesquisas Agropecuárias**. 2.ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. 92p (Série relatórios metodológicos).

IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric>>. Acesso em: 10 jun. 2010.

IBGE. **Censo agropecuário 2006**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/default>. Acesso em: 25 jul. 2011.

JACOBSEN, L.A. Um pouco de história e de política do trigo. In: CUNHA, G.R. **Trigo, 500 anos no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1999. p.33-39.

JACÓBSEN, L.O.; FONTANA, D.C.; SHIMABUKURO, Y.E. Alterações na vegetação em macrozonas do Rio Grande do Sul associados a eventos El Niño e La Niña, usando imagens NOAA. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.11, n.2, p.361-374, 2003.

JANSSEN, L.L.F. Introduction to remote sensing. In: JANSSEN, L.L.F., HUURNEMANN (Eds). **Principles of remote sensing**. 2.ed. Enschede: ITC. 2001. p.41-53.

JANSSEN, L.L.F., BAKKER, W.H. Sensors and platforms. In: JANSSEN, L.L.F., HUURNEMANN (Eds). **Principles of remote sensing**. 2.ed. Enschede: ITC. 2001. p.19-26.

JUNGES, A.H. **Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul**. 2008. 137 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

JUNGES, A.H. *et al.* Avaliação das perdas de rendimento de trigo na safra 2006 por meio das análises de temperaturas mínimas do ar e de superfície na região norte do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.16, n.1, p.1-8, 2008.

JUNGES, A.H.; FONTANA, D.C. Avaliação do desenvolvimento das culturas de cereais de inverno no Rio Grande do Sul por meio de perfis temporais do índice de vegetação por diferença normalizada. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.5, p.1349-1355, 2009.

JUNGES, A.H.; FONTANA, D.C. Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul. **Ceres**, Viçosa, v.58, n.1, p.695-700, 2011.

KLERING, E.V. **Avaliação do uso de imagens MODIS na modelagem agrometeorológica-espectral de rendimento do arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. 2007. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

KNIPLING, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.1, p. 155-159, 1970.

KÖPPEN, W. **Climatologia**. Cidade do México: Fondo de Cultura Economica, 1948. 71p.

LABUS, M.P. *et al.* Wheat yield estimates using multi-temporal NDVI satellite imagery. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.23, n.20, p.4169-4180, 2002.

LIU, W.T.H. Previsão de safra agrícola. In: LIU, W.T.H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: UNIDERP, 2006a. p.561-649.

LIU, W.T.H. Índices de vegetação. In: LIU, W.T.H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: UNIDERP, 2006b. p. 217-250.

MALUF, J.R.T., CAIAFFO, M.R.R. Regiões ecoclimáticas do Estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12., 2001, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBA, 2001. v.1, p.151-152.

MELO, R.W. *et al.* An agrometeorological-spectral model to estimate soybean yield, applied to southern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.29, p.4013-4028, 2008.

MENESES, P.R. Fundamentos de radiometria óptica espectral. In: MENESES, P.R.; NETTO, J.S.M. **Sensoriamento remoto - reflectância dos alvos naturais**. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 2001. p.15-40.

MOREIRA, J.C.S.; SOUSA, C.N.A. **Resultados do 26º elite durum wheat yield trial**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1999 (Comunicado técnico on line n.6). Disponível: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_co06.htm>. Acesso em: 29 jun. 2011.

MOREIRA, M.A.; ANGULO FILHO, A.; RUDORFF, B.F.T. Eficiência do uso da radiação e índice de colheita em trigo submetido a estresse hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.56, n.3, p.597-603, 1999.

MOREIRA, M.A. *et al.* Variação espectral e eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa em ensaio com genótipo de trigo. **Bragantia**, Campinas, v.64, n.3, p.331-338, 2005.

MOTA, F. Influência do clima sobre o rendimento de trigo no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.1, p.121-124, 1998.

MOTA, J.L.G. **Subsídios à previsão de safra de soja no Rio Grande do Sul usando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto**. 2002. 74 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

MUNDSTOCK, C.M. **Planejamento e manejo integrado da lavoura de trigo**. Porto Alegre: EVANGRAF, 1999. 227p.

NASCIMENTO, A.J.R. Oferta de milho no mercado interno reduz safra de triticales. **Página Rural**, 22 out 2009. Artigos. Disponível em: <<http://www.paginarural.com.br/artigo/1969/oferta-de-milho-no-mercado-internoreduz-safra-de-triticales>>. Acesso em: 15 jun. 2010.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. Introdução à agrometeorologia. In: **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: AGROPECUÁRIA, 2002. p. 20-26.

PINO, F.A. **Tendências em informações agropecuárias**, 2001. Palestra apresentada no X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, 2001.

PINTO, D.G; FONTANA, D.C. Inferências sobre o calendário agrícola da soja a partir de perfis temporais de NDVI em imagens MODIS. In: **SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**, 22., 2010, Porto Alegre. **Livro de resumos**. Porto Alegre: UFRGS, 2010. 1 CD-ROM.

PONZONI, F.J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P.R; NETTO, J.S.M. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UNIVERSIDADE BRASÍLIA, 2001. p.157-199.

PRIA, M.D. Conhecendo os inimigos. **Cultivar Grandes Culturas**, Pelotas, v.7, n.73, p.4-15, 2005.

RAUN, W. In-season n prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. **Agronomy Journal**, Madison, v.93, p.131-138, 2001.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Agricultura e Abastecimento. Centro Nacional de Pesquisa do Trigo. **Macrozoneamento agroecológico e econômico do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura e Abastecimento. Centro Nacional de Pesquisa do Trigo, 1994. v.2.

RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T. Estimativa da área de soja no Rio Grande do Sul por meio de imagens Landsat. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v.3, n.57, p.226-234, 2005.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004. 212 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

RODRIGUES, O. *et al.* **Características fisiológicas associadas ao avanço no potencial de rendimento de grãos de trigo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2002 (Boletim de pesquisa e desenvolvimento on line n.6). Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/publicacoes/puboltri>>. Acesso em: 25 jul. 2010.

ROSA, V.G.C. **Modelo agrometeorológico-espectral para monitoramento e estimativa de rendimento do café na região sul/sudoeste do Estado de Minas Gerais**. 2007. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

ROUSE, J.W. *et al.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, 1973, p.309-317.

RUDORFF, B.F.T; BATISTA, G.T. Spectral response of wheat and its relationship with agronomic variables in the tropical region. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.31, n.1, p.53-63, 1990.

SCHEEREN, P.L. *et al.* **Efeito do frio em trigo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000 (Comunicado técnico on line n.57). Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/publicacoes/puboltri>>. Acesso em: 25 ago. 2010.

SCIEN, B.V. Environmental variables for modeling wheat yields in the southwest pampa region of Argentina. **International Journal of Biometeorology**, Heidelberg, v.48, n.4, p.206-212, 2004.

SEBEM, E. **Aportaciones de la teledetección en el desarrollo de un sistema metodológico para la evaluación de los efectos del cambio climático sobre la producción de las explotaciones agrarias**. 2005. 384 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrônômica) - Universidad Politécnica de Madri, Madri, 2005.

SILVA, P.R.F. *et al.* Estratégias de manejo de cobertura do solo para cultivo de milho em sucessão no sistema semeadura direta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, p.1011-1020, 2006.

SINGH, M. *et al.* Spectral models for estimation of chlorophyll content, growth and yield of wheat crop. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, Ahmedabad, v.34, n.1, 2006.

THORNLEY, J.H.M. Agricultural modelling: a possible road map. **Journal of Agricultural Science**, Toronto, v.144, p.450-456, 2006.

TIBOLA, C. S. *et al.* Semeadura e rotação de culturas. In: CULTIVO DE TRIGO. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009 (Sistemas de produção n.4). Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Trigo/CultivodeTrigo/sem_eadura.htm#sub3>. Acesso em: 7 jul. 2011.

VARIANI, C. *et al.* Variação do índice de vegetação por diferença normalizada em trigo ao longo do ciclo e sua relação com o rendimento de grãos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2010, Ribeirão Preto. **Anais...** Piracicaba: SBEA, 2010. 1 CD-ROM.

WAGNER, A.P. L. *et al.* Estimativa de área de soja no Rio Grande do Sul utilizando imagens NDVI/MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p.457-464.

WEBER, E. *et al.* Comparação entre resultados de classificação de imagens Landsat e CBERS para estimativa de área cultivada com soja no planalto do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005, p.321-328.

XAVIER, A.C. *et al.* Avaliação de dados de sensoriamento remoto de diferentes períodos na estimativa da produtividade e altura final do trigo (*Triticum aestivum*, L.). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005, p.329-336.

YI, Y. Evaluation of MODIS surface reflectance products for wheat leaf area index (LAI) retrieval. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Netherlands, v.63, n.6, p. 661-677, 2008.

7 APÊNDICES

7.1 Dados meteorológicos anuais

7.1.1 Santa Rosa

APÊNDICE 1. Temperaturas do ar (°C) máxima, mínima e média, média mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Santa Rosa, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.

Temperaturas do ar (°C) – média mensal										
Máxima										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Média períodos	
									Ago_Set	Ago_Out
2000	22,6	21,4	17,9	23,4	23,7	28,7	29,6	31,5	23,5	25,3
2001	20,8	21,3	21,3	26,0	23,9	28,2	30,6	31,2	25,0	26,0
2002	24,3	20,7	19,7	23,6	23,5	27,2	29,2	30,6	23,5	24,8
2003	23,1	23,4	20,7	21,0	25,1	29,3	29,2	28,5	23,1	25,1
2004	19,4	22,3	20,3	23,1	26,1	28,0	27,8	31,3	24,6	25,8
2005	23,9	21,7	20,5	24,6	21,0	26,8	32,1	32,6	22,8	24,1
2006	22,8	23,2	23,9	24,0	24,4	29,7	29,3	33,2	24,2	26,0
2007	19,5	20,5	15,3	18,6	24,4	24,0	27,9	32,1	21,5	22,3
2008	23,9	19,0	25,0	23,8	22,9	26,0	31,4	32,4	23,4	24,2
Mínima										
2000	12,6	15,4	7,4	10,7	12,7	16,4	16,8	19,2	11,7	13,3
2001	9,3	10,3	11,2	15,2	14,3	16,3	18,7	19,0	14,7	15,3
2002	16,1	11,9	10,3	14,2	12,1	17,4	18,0	20,1	13,1	14,5
2003	13,7	14,0	10,9	7,7	11,4	16,1	16,3	17,5	9,5	11,7
2004	11,3	12,0	9,1	9,7	15,3	14,1	14,5	17,4	12,5	13,0
2005	15,8	16,1	10,4	13,6	11,7	16,7	19,8	20,2	12,7	14,0
2006	10,8	12,8	12,0	9,5	10,0	15,4	14,8	19,3	9,8	11,6
2007	10,7	12,4	6,3	8,7	14,6	14,9	15,3	18,7	11,7	12,7
2008	11,8	9,7	13,9	12,5	11,4	16,5	18,3	19,1	12,0	13,5
Média										
2000	17,6	18,4	12,7	17,1	18,2	22,6	23,2	25,4	17,6	19,3
2001	15,1	15,8	16,2	20,6	19,1	22,3	24,6	25,1	19,8	20,7
2002	20,2	16,3	15,0	18,9	17,8	22,3	23,6	25,3	18,3	19,7
2003	18,4	18,7	15,8	14,4	18,2	22,7	22,8	23,0	16,3	18,4
2004	15,4	17,1	14,7	16,4	20,7	21,1	21,1	24,3	18,6	19,4
2005	19,9	18,9	15,5	19,1	16,4	21,7	26,0	26,4	17,7	19,1
2006	16,8	18,0	18,0	16,8	17,2	22,5	22,0	26,2	17,0	18,8
2007	15,1	16,5	10,8	13,7	19,5	19,4	21,6	25,4	16,6	17,5
2008	17,8	14,3	19,5	18,2	17,2	21,3	24,9	25,8	17,7	18,9

APÊNDICE 2. Índice de geadas, precipitação pluvial (mm) e dias com precipitação pluvial (n°), soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Santa Rosa, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.

Índice de geadas mensal										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma períodos	
									Ago_Set	Ago_Out
2000	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0
2001	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0
2002	0	1	0	0	2	0	0	0	2	2
2003	0	0	4	8	1	0	0	0	9	9
2004	0	4	4	3	0	0	0	0	3	3
2005	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
2006	0	0	2	7	4	0	0	0	11	11
2007	4	0	14	3	0	0	0	0	3	3
2008	2	6	0	0	1	0	0	0	1	1
Precipitação pluvial mensal										
2000	120	251	63	73	153	304	87	206	226	530
2001	133	95	104	47	174	116	141	51	222	338
2002	161	200	98	192	285	373	171	403	476	850
2003	10	125	119	54	67	155	148	310	121	276
2004	87	99	41	70	124	179	135	42	194	373
2005	160	265	28	67	134	200	88	131	201	400
2006	25	153	169	140	136	231	181	251	276	507
2007	279	16	122	51	190	263	182	166	241	504
2008	70	194	48	118	68	393	96	74	186	579
Número de dias com precipitação pluvial										
2000	9	13	6	6	9	16	7	11	15	31
2001	6	10	9	6	12	9	6	7	18	21
2002	9	7	9	11	10	16	10	9	21	26
2003	2	5	5	4	4	8	7	11	8	12
2004	10	4	5	5	8	7	9	4	13	15
2005	13	11	3	7	9	12	5	6	16	21
2006	2	8	8	6	7	8	8	10	13	15
2007	8	5	6	9	8	12	10	9	17	20
2008	6	10	4	7	5	12	7	3	12	17

APÊNDICE 3. Graus-dia calculados com temperatura basal de 0°C, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Santa Rosa, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.

Graus-dia mensal										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma períodos	
									Jun_Ago	Jun_Set
2000	545	553	392	529	545	700	696	786	1474	2019
2001	468	474	504	639	573	690	739	778	1616	2189
2002	627	489	465	585	534	691	708	785	1539	2073
2003	570	560	490	445	547	704	684	714	1496	2042
2004	477	514	456	509	621	653	634	754	1479	2100
2005	616	566	479	592	491	673	779	817	1637	2127
2006	521	540	557	520	517	698	661	813	1617	2134
2007	469	495	335	423	586	603	648	788	1252	1838
2008	553	430	603	563	515	660	746	799	1597	2112

7.1.2 Ijuí

APÊNDICE 4. Temperaturas do ar (°C) máxima, mínima e média, média mensal (maio a dezembro), e índice de geadas, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Ijuí, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.

Temperatura do ar (°C) - Média mensal										
Máxima										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DE Z	Média períodos	
									Ago_Set	Ago_Out
2000	22,2	21,7	18,2	22,4	24,1	27,2	30,0	30,4	23,3	24,6
2001	21,2	21,2	21,3	25,5	23,0	27,8	30,3	31,4	24,3	25,5
2002	24,2	20,5	22,2	22,5	22,6	25,6	28,2	29,8	22,5	23,5
2003	23,4	23,2	20,2	20,6	24,0	27,7	27,7	28,2	22,3	24,1
2004	19,6	22,4	18,9	21,5	24,4	27,1	27,5	30,5	23,0	24,3
2005	23,5	22,6	20,0	23,3	20,0	24,6	29,9	30,5	21,7	22,6
2006	22,0	21,5	22,3	22,7	23,5	25,3	28,0	32,0	23,1	23,9
2007	19,9	21,1	17,7	20,2	25,8	26,8	28,0	31,3	23,0	24,3
2008	22,5	15,3	23,1	21,9	21,9	25,0	30,3	30,9	21,9	22,9
Mínima										
2000	10,5	11,9	5,6	9,8	12,4	16,1	15,9	17,0	11,1	12,8
2001	10,7	10,3	9,9	12,8	12,6	15,1	16,5	15,8	12,7	13,5
2002	13,7	9,5	8,8	12,8	9,7	15,8	17,6	17,5	11,3	12,8
2003	8,6	11,0	7,1	4,8	9,1	11,9	13,4	15,3	6,9	8,6
2004	8,6	9,0	8,1	8,0	11,4	10,3	12,6	15,5	9,7	9,9
2005	12,1	13,8	7,9	10,8	9,6	13,8	15,7	16,6	10,2	11,4
2006	7,5	11,4	9,5	9,1	8,9	15,0	15,6	19,0	9,0	11,0
2007	8,8	9,4	5,7	10,6	14,1	15,7	13,3	17,2	12,3	13,4
2008	8,9	7,8	11,4	10,2	9,1	14,7	16,0	16,9	9,6	11,3
Média										
2000	22,3	18,7	9,6	15,9	14,6	25,3	20,0	25,1	15,3	18,6
2001	15,9	15,8	15,6	19,2	17,8	21,5	23,4	23,6	18,5	19,5
2002	18,9	15,0	15,5	17,6	16,2	20,7	22,4	23,6	16,9	18,2
2003	16,0	17,1	13,6	12,7	16,6	19,6	20,6	21,7	14,6	16,3
2004	14,1	15,7	13,5	14,7	17,9	18,7	20,0	23,0	16,3	17,1
2005	17,8	18,2	14,0	17,1	14,8	19,2	22,8	23,6	15,9	17,0
2006	14,8	16,4	15,9	15,9	16,2	20,2	21,5	25,5	16,1	17,4
2007	14,3	15,3	11,5	15,4	19,9	21,0	20,6	24,2	17,6	18,8
2008	15,7	11,5	17,3	16,0	15,5	19,9	23,1	23,9	15,8	17,1
Índice de geadas mensal										
2000	0	3	24	1	0	0	0	0	1	1
2001	0	5	6	0	2	0	0	0	2	2
2002	0	8	2	0	3	2	0	0	3	5
2003	3	0	10	23	4	0	0	0	27	27
2004	2	8	5	8	0	0	0	0	8	8
2005	3	0	8	2	1	0	0	0	3	3
2006	2	0	5	13	7	0	0	0	20	20
2007	7	6	15	6	0	0	0	0	6	6
2008	2	4	0	2	4	0	0	0	6	6

APÊNDICE 5. Precipitação pluvial (mm) e dias com precipitação pluvial (n°), soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Ijuí, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.

Precipitação pluvial mensal										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma períodos	
									Ago_Set	Ago_Out
2000	83	230	72	83	92	298	77	167	175	175
2001	152	82	87	64	155	192	139	125	219	219
2002	154	149	150	221	326	386	275	291	548	548
2003	27	90	175	59	72	190	131	432	131	131
2004	72	57	117	66	173	141	156	64	239	239
2005	272	257	84	153	128	330	112	118	280	280
2006	32	118	126	64	137	180	222	208	201	201
2007	230	33	133	65	223	230	138	247	288	288
2008	84	231	61	128	72	390	80	79	200	200
Número de dias com precipitação pluvial										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Ago_Set	Ago_Out
2000	5	10	6	4	9	12	8	8	13	25
2001	9	5	5	7	11	8	7	6	18	26
2002	7	9	12	12	8	14	11	13	20	34
2003	3	7	5	4	7	8	7	11	11	19
2004	8	5	8	7	7	6	10	2	14	20
2005	14	11	2	7	6	13	11	5	13	26
2006	3	10	5	6	9	7	8	8	15	22
2007	8	4	7	7	7	12	7	9	14	26
2008	6	11	8	10	9	14	7	4	19	33

APÊNDICE 6. Graus-dia calculados com temperatura basal de 0°C, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Ijuí, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.

Graus-dia mensal										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma períodos	
									Jun_Ago	Jun_Set
2000	507	505	369	499	547	671	680	735	1373	1920
2001	494	473	485	594	535	666	702	731	1551	2086
2002	587	451	481	547	485	641	673	733	1478	1964
2003	496	513	423	393	497	609	617	674	1329	1826
2004	438	471	419	457	537	580	601	714	1347	1884
2005	552	545	434	529	444	595	683	731	1508	1952
2006	458	493	493	494	486	626	645	790	1479	1965
2007	444	458	356	476	598	652	619	751	1290	1888
2008	487	346	535	497	465	616	694	742	1377	1843

7.1.3 Passo Fundo

APÊNDICE 7. Temperaturas do ar (°C) máxima, mínima e média, média mensal (maio a dezembro), e índice de geadas, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Passo Fundo, 2000 a 2008. Fonte dos dados: 8°DISME/INMET.

Temperatura do ar (°C) - Média mensal										
Máxima										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Média períodos	
									Ago_Set	Ago_Out
2000	19,3	19,5	16,0	20,4	20,8	24,5	26,7	-	20,6	21,9
2001	18,6	19,2	19,3	22,6	20,2	24,7	27,5	27,6	21,4	22,5
2002	22,5	18,3	17,9	20,3	20,1	24,0	26,4	27,1	20,2	21,4
2003	21,1	20,9	19,8	19,1	22,6	25,3	26,6	26,3	20,8	22,3
2004	18,2	20,3	17,2	21,0	23,1	24,3	25,9	27,5	22,1	22,8
2005	21,4	20,3	17,7	21,4	17,4	23,7	27,7	27,3	19,4	20,8
2006	19,4	20,0	19,9	20,1	21,3	26,8	26,4	29,8	20,7	22,7
2007	17,7	19,1	16,4	19,2	23,4	24,1	25,2	29,3	21,3	22,2
2008	20,8	19,0	22,6	20,8	22,1	22,9	27,7	29,0	21,4	21,9
Mínima										
2000	9,7	11,1	5,1	9,1	10,6	14,9	14,8		9,9	11,5
2001	10,2	9,7	9,0	12,4	12,0	13,9	15,8	15,9	12,2	12,8
2002	13,1	9,7	8,7	11,5	9,3	14,9	15,2	16,7	10,4	11,9
2003	10,1	11,8	8,8	7,5	10,7	13,2	13,7	15,8	9,1	10,5
2004	9,5	10,3	8,1	9,1	12,7	12,0	14,2	18,1	10,9	11,3
2005	12,5	12,7	8,0	10,7	8,9	14,0	15,2	16,6	9,8	11,2
2006	8,9	10,7	10,8	9,3	9,8	14,4	14,8	18,2	9,6	11,2
2007	9,5	10,7	6,9	9,4	13,6	14,9	13,7	16,8	11,5	12,6
2008	10,3	9,2	12,3	11,8	9,9	13,9	15,8	16,5	10,8	11,8
Média										
2000	14,5	15,3	10,5	14,8	15,7	19,7	20,7	-	15,2	16,7
2001	14,4	14,5	14,2	17,5	16,1	19,3	21,7	21,8	16,8	17,6
2002	17,8	14,0	13,3	15,9	14,7	19,4	20,8	21,9	15,3	16,7
2003	15,6	16,4	14,3	13,3	16,6	19,3	20,1	21,0	15,0	16,4
2004	13,8	15,3	12,6	15,1	17,9	18,2	20,0	22,8	16,5	17,1
2005	17,0	16,5	12,8	16,0	13,1	18,8	21,5	22,0	14,6	16,0
2006	14,1	15,4	15,3	14,7	15,5	20,6	20,6	24,0	15,1	17,0
2007	13,6	14,9	11,6	14,3	18,5	19,5	19,4	22,8	16,4	17,4
2008	15,6	14,1	17,4	16,3	16,0	18,4	21,7	22,8	16,1	16,9
Índice de geadas mensal										
2000	0	2	20	3	1	0	0	0	4	4
2001	0	4	5	0	2	0	0	0	2	2
2002	0	5	1	0	1	0	0	0	1	1
2003	0	0	9	2	1	0	0	0	3	3
2004	1	3	3	1	0	0	0	0	1	1
2005	1	0	4	0	0	0	0	0	0	0
2006	0	0	4	6	10	0	0	0	16	16
2007	4	1	7	0	0	0	0	0	0	0
2008	2	4	0	1	1	0	0	0	2	2

APÊNDICE 8. Precipitação pluvial (mm) e dias com precipitação pluvial (n°), soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Passo Fundo, 2000 a 2008. Fonte dos dados: 8°DISME/INMET.

Precipitação pluvial mensal										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma períodos	
									Ago_Set	Ago_Out
2000	77	206	148	84	169	339	164		253	592
2001	165	106	104	28	240	276	117	185	268	544
2002	140	219	146	234	254	372	205	375	487	860
2003	106	153	101	58	64	237	168	205	122	359
2004	222	134	89	53	234	193	122	14	287	480
2005	317	273	84	135	153	385	146	78	288	673
2006	37	168	148	132	113	95	312	85	245	340
2007	294	68	190	129	269	281	187	213	397	678
2008	76	220	58	166	70	391	240	73	236	627
Número de dias com precipitação pluvial										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Ago_Set	Ago_Out
2000	13	15	11	12	11	16	10		23	39
2001	12	12	11	6	18	12	10	12	24	36
2002	10	13	14	15	13	21	11	18	28	49
2003	3	16	7	6	10	11	12	11	16	27
2004	16	10	14	7	15	11	11	2	22	33
2005	14	13	6	10	16	17	11	6	26	43
2006	8	11	11	8	11	8	12	9	19	27
2007	11	12	12	10	11	16	11	9	21	37
2008	7	14	8	9	12	18	9	8	21	39

APÊNDICE 9. Graus-dia calculados com temperatura basal de 0°C, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Passo Fundo, 2000 a 2008. Fonte dos dados: 8°DISME/INMET.

Graus-dia mensal										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma períodos	
									Jun_Ago	Jun_Set
2000	450	459	327	457	471	610	622	-	1243	1714
2001	447	434	440	544	482	598	650	674	1417	1900
2002	551	420	412	492	441	603	624	680	1324	1765
2003	484	491	444	413	499	597	604	652	1347	1847
2004	429	458	392	467	538	563	601	411	1317	1855
2005	526	495	397	497	393	583	644	681	1389	1782
2006	438	461	476	456	466	639	618	745	1393	1859
2007	421	448	361	443	555	605	583	706	1252	1807
2008	483	423	540	506	479	570	652	706	1469	1947

7.1.4 Erechim

APÊNDICE 10. Temperaturas do ar (°C) máxima, mínima e média, média mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Erechim, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.

Temperaturas do ar (°C) – média mensal										
Máxima										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Média períodos	
									Ago_Set	Set_Out
2000	20,3	20,7	15,9	20,9	20,5	24,5	26,4	-	20,7	22,5
2001	18,3	18,6	19,3	22,9	20,4	23,9	27,4	27,1	21,6	22,1
2002	21,4	18,7	17,8	19,6	18,2	23,4	25,2	26,4	18,9	20,8
2003	19,5	19,6	19,4	19,8	22,7	25,4	26,0	26,1	21,2	24,0
2004	17,2	19,8	16,6	20,9	22,9	24,1	25,3	27,2	21,9	23,5
2005	20,6	19,7	17,2	21,2	16,8	22,9	27,2	27,6	19,0	19,8
2006	18,8	20,0	20,4	20,4	21,0	25,9	25,3	28,6	20,7	23,5
2007	18,2	19,4	16,9	20,6	24,3	24,5	25,3	28,9	22,5	24,4
2008	14,1	9,2	15,8	20,9	20,0	22,6	26,2	27,8	20,4	21,3
Mínima										
2000	11,7	13,3	7,7	10,5	11,3	15,2	16,0	18,0	10,9	13,2
2001	10,8	11,2	10,8	13,1	12,8	14,3	16,7	17,0	13,0	13,5
2002	14,0	12,2	10,2	13,1	8,8	15,7	15,8	17,2	10,9	12,3
2003	9,5	12,4	10,3	8,6	11,0	14,9	15,8	17,0	9,8	12,9
2004	10,4	11,3	9,3	10,2	14,1	12,6	15,0	16,7	12,2	13,4
2005	12,3	13,4	9,1	11,7	8,4	14,9	15,2	16,0	10,0	11,7
2006	8,7	11,0	11,5	10,0	10,4	14,2	14,2	17,4	10,2	12,3
2007	8,4	10,9	7,0	8,9	13,6	14,6	14,0	17,1	11,3	14,1
2008	5,2	1,8	6,6	8,4	8,6	13,5	14,5	16,0	8,5	11,1
Média										
2000	16,0	17,0	11,8	15,7	15,9	19,8	21,2	-	15,8	17,9
2001	14,5	14,9	15,1	18,0	16,6	19,1	22,1	22,0	17,3	17,8
2002	17,7	15,5	14,0	16,3	13,5	19,6	20,5	21,8	14,9	16,5
2003	14,5	16,0	14,8	14,2	16,8	20,1	20,9	21,5	15,5	18,5
2004	13,8	15,5	12,9	15,5	18,5	18,4	20,2	22,0	17,0	18,4
2005	16,4	16,5	13,2	16,5	12,6	18,9	21,2	21,8	14,5	15,7
2006	13,7	15,5	16,0	15,2	15,7	20,1	19,7	23,0	15,5	17,9
2007	13,3	15,1	12,0	14,8	19,0	19,5	19,6	23,0	16,9	19,2
2008	9,7	5,5	11,2	14,6	14,3	18,0	20,3	21,9	14,5	16,2

APÊNDICE 11. Índice de geadas, soma mensal (maio a novembro) e quinzenal (setembro), estação meteorológica de Erechim, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.

Índice de geadas mensal										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET1	SET2	OUT	NOV	Soma períodos	
									Ago_Set	Set
2000	0	0	9	2	0	1	0	0	3	1
2001	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0
2002	0	3	1	0	6	1	0	0	7	7
2003	1	0	8	4	2	0	0	0	6	2
2004	0	1	3	2	0	0	0	0	2	0
2005	2	1	6	1	0	0	0	3	1	0
2006	0	1	5	7	5	0	0	0	12	5
2007	7	0	9	2	0	1	0	0	3	1
2008	17	34	3	2	2	0	0	0	4	2

APÊNDICE 12. Precipitação pluvial (mm) e dias com precipitação pluvial (n°), soma mensal, maio a dezembro, estação meteorológica de Erechim, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.

Precipitação pluvial mensal										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma períodos	
									Ago_Set	Set_Out
2000	108	180	144	65	193	139	67	120	258	332
2001	136	102	111	54	210	162	83	112	264	373
2002	199	186	140	222	205	273	236	233	427	478
2003	32	137	93	74	32	170	166	287	106	202
2004	111	52	128	55	154	167	96	23	209	321
2005	217	246	90	144	160	290	75	93	304	449
2006	33	119	68	139	111	72	292	164	250	183
2007	312	43	230	109	87	179	206	118	196	266
2008	72	111	32	117	100	375	164	47	217	475
Número de dias com precipitação pluvial										
2000	10	12	9	12	13	14	10	17	25	27
2001	10	11	8	6	15	9	8	11	21	24
2002	8	14	10	12	9	18	11	13	21	27
2003	4	14	6	7	10	13	10	12	17	23
2004	12	9	12	5	11	9	10	6	16	20
2005	13	12	6	8	16	14	7	10	24	30
2006	6	10	8	8	8	6	12	9	16	14
2007	12	14	17	8	13	14	11	13	21	27
2008	11	5	12	16	16	20	12	13	32	36

APÊNDICE 13. Graus-dia calculados com temperatura basal de 0°C, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Erechim, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.

Graus-dia mensal										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma períodos	
									Jun_Ago	Jun_Set
2000	496	511	366	487	478	615	635	689	1363	1841
2001	451	446	467	559	498	591	662	683	1472	1970
2002	549	464	434	506	404	607	615	676	1404	1808
2003	449	480	460	441	505	624	628	667	1380	1886
2004	428	465	401	482	556	569	606	682	1348	1904
2005	510	496	408	510	377	586	636	675	1414	1791
2006	426	465	496	472	471	622	592	713	1432	1903
2007	413	454	371	458	569	605	589	713	1283	1851
2008	301	166	347	454	428	560	610	679	967	1395
2009	517	368	361	501	460	583	680	710	1230	1689

7.1.5 Caxias do Sul

APÊNDICE 14. Temperaturas do ar (°C) máxima, mínima e média, média mensal (maio a dezembro), e índice de geadas, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Caxias do Sul, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.

Temperaturas do ar (°C) – média mensal										
Máxima										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Média períodos	
									Ago_Out	Set_Out
2000	17,5	18,3	15,2	18,5	19,2	22,0	23,3	24,7	19,9	20,6
2001	16,8	17,9	17,8	21,9	18,8	22,4	23,9	24,4	21,0	20,6
2002	19,8	16,4	16,8	19,7	18,2	22,7	24,1	25,0	20,2	20,4
2003	18,6	18,7	17,8	17,5	20,0	22,7	23,7	23,7	20,1	21,4
2004	18,7	18,5	15,9	19,6	21,6	21,1	22,7	24,8	20,8	21,4
2005	20,4	18,9	16,9	19,4	15,9	20,8	24,8	25,2	18,7	18,4
2006	16,3	18,0	18,9	19,2	19,1	24,0	22,1	27,8	20,7	21,5
2007	15,8	17,7	15,6	18,5	22,2	22,5	22,6	26,3	21,1	22,4
2008	18,6	15,3	19,5	19,0	17,6	20,4	23,3	24,8	19,0	19,0
Mínima										
2000	9,7	10,9	5,8	8,4	9,7	13,3	13,4	15,7	10,4	11,5
2001	10,2	9,6	8,4	12,2	11,1	13,6	14,6	14,7	12,3	12,3
2002	12,5	9,3	8,5	10,7	9,0	14,9	14,6	16,0	11,5	11,9
2003	9,7	10,9	8,8	7,3	9,6	12,0	13,3	14,2	9,6	10,8
2004	9,6	9,9	7,3	8,6	12,1	10,0	12,5	14,3	10,2	11,0
2005	11,8	12,0	7,8	10,7	8,0	12,2	13,2	13,9	10,3	10,1
2006	7,7	8,9	9,9	8,4	8,4	11,4	11,5	15,0	9,4	9,9
2007	9,0	10,5	6,1	7,7	12,1	12,9	11,1	14,2	10,9	12,5
2008	9,7	7,2	10,2	9,0	7,5	11,7	12,9	13,7	9,4	9,6
Média										
2000	13,6	14,6	10,5	13,5	14,5	17,6	18,4	20,2	15,2	16,0
2001	13,5	13,8	13,1	17,0	14,9	18,0	19,3	19,6	16,6	16,4
2002	16,2	12,9	12,6	15,2	13,6	18,8	19,3	20,5	15,9	16,2
2003	14,1	14,8	13,3	12,4	14,8	17,3	18,5	18,9	14,8	16,1
2004	14,1	14,2	11,6	14,1	16,8	15,6	17,6	19,6	15,5	16,2
2005	16,1	15,5	12,3	15,0	12,0	16,5	19,0	19,6	14,5	14,2
2006	12,0	13,5	14,4	13,8	13,7	17,7	16,8	21,4	15,1	15,7
2007	12,4	14,1	10,9	13,1	17,2	17,7	16,8	20,2	16,0	17,4
2008	14,1	11,3	14,9	14,0	12,5	16,0	18,1	19,2	14,2	14,3
Índice de geadas mensal										
2000	0	4	11	4	4	0	3	0	8	4
2001	0	5	8	0	4	0	3	0	4	4
2002	0	6	2	1	5	0	0	0	6	5
2003	2	3	9	1	4	1	3	0	6	5
2004	0	6	6	2	3	0	3	0	5	3
2005	1	3	6	0	3	0	4	0	3	3
2006	3	6	6	9	12	0	3	0	21	12
2007	4	6	11	5	3	0	0	0	8	3
2008	4	7	0	1	6	0	3	0	7	6

APÊNDICE 15. Precipitação pluvial (mm) e dias com precipitação pluvial (n°), soma mensal, maio a dezembro, estação meteorológica de Caxias do Sul, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.

Precipitação pluvial mensal										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma períodos	
									Ago_Out	Set_Out
2000	76	206	116	112	238	238	132	151	588	476
2001	105	107	230	55	210	74	182	102	339	285
2002	166	250	156	144	182	302	183	263	628	484
2003	66	122	170	57	86	181	87	310	325	267
2004	109	76	150	23	138	178	187	84	339	316
2005	192	114	112	211	422	289	65	79	923	711
2006	89	166	107	102	99	47	160	97	248	146
2007	187	60	254	125	270	193	108	182	588	463
2008	132	128	104	153	165	267	104	102	585	433
Número de dias com precipitação pluvial										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Ago_Out	Set_Out
2000	9	13	9	6	13	12	11	16	31	25
2001	9	11	13	7	15	10	10	10	32	25
2002	9	15	9	13	11	18	11	15	42	29
2003	6	13	5	7	8	7	11	12	22	15
2004	8	9	11	3	13	9	10	7	25	22
2005	13	14	6	14	12	16	12	8	42	28
2006	13	10	9	12	9	9	10	10	30	18
2007	15	12	11	9	10	13	10	10	32	23
2008	7	14	12	8	11	17	14	12	36	28

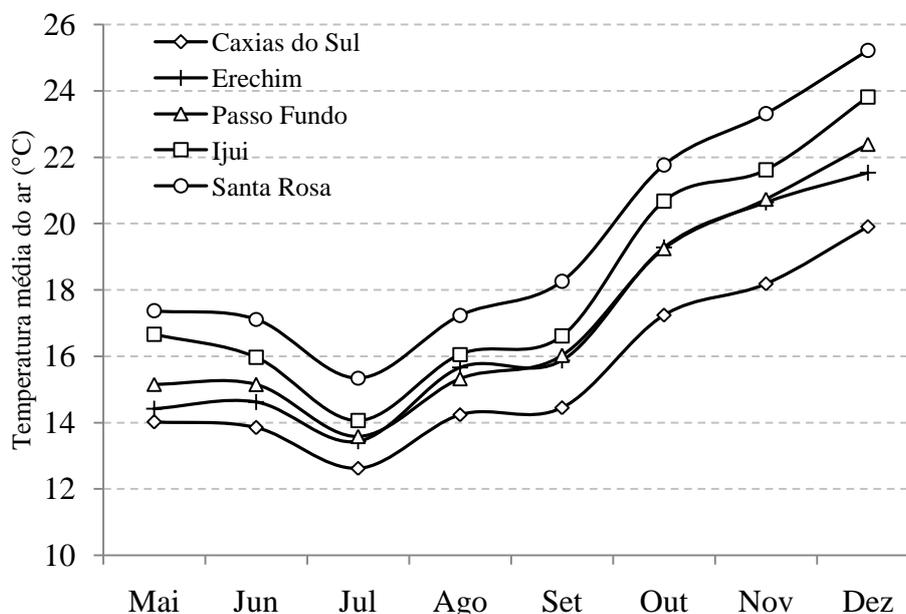
APÊNDICE 16. Graus-dia calculados com temperatura basal de 0°C, soma mensal (maio a dezembro), estação meteorológica de Caxias do Sul, 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.

Graus-dia mensal										
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma períodos	
									Ago_Out	Set_Out
2000	422	438	324	417	434	546	551	626	1397	980
2001	419	413	407	528	448	557	578	606	1532	1004
2002	501	386	391	472	408	582	579	635	1463	990
2003	439	445	412	384	445	537	555	587	1365	981
2004	439	426	358	438	505	482	527	607	1425	987
2005	499	464	383	466	359	512	569	606	1336	871
2006	372	405	448	427	412	549	503	663	1387	960
2007	383	424	337	406	515	549	505	628	1470	1064
2008	438	338	461	434	376	497	542	596	1307	873

7.2 Dados meteorológicos médios (2000 a 2008)

Os dados de 2000 a 2008 das estações localizadas nos municípios Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa foram empregados na caracterização das condições meteorológicas ocorridas, de maio a dezembro, nas regionais.

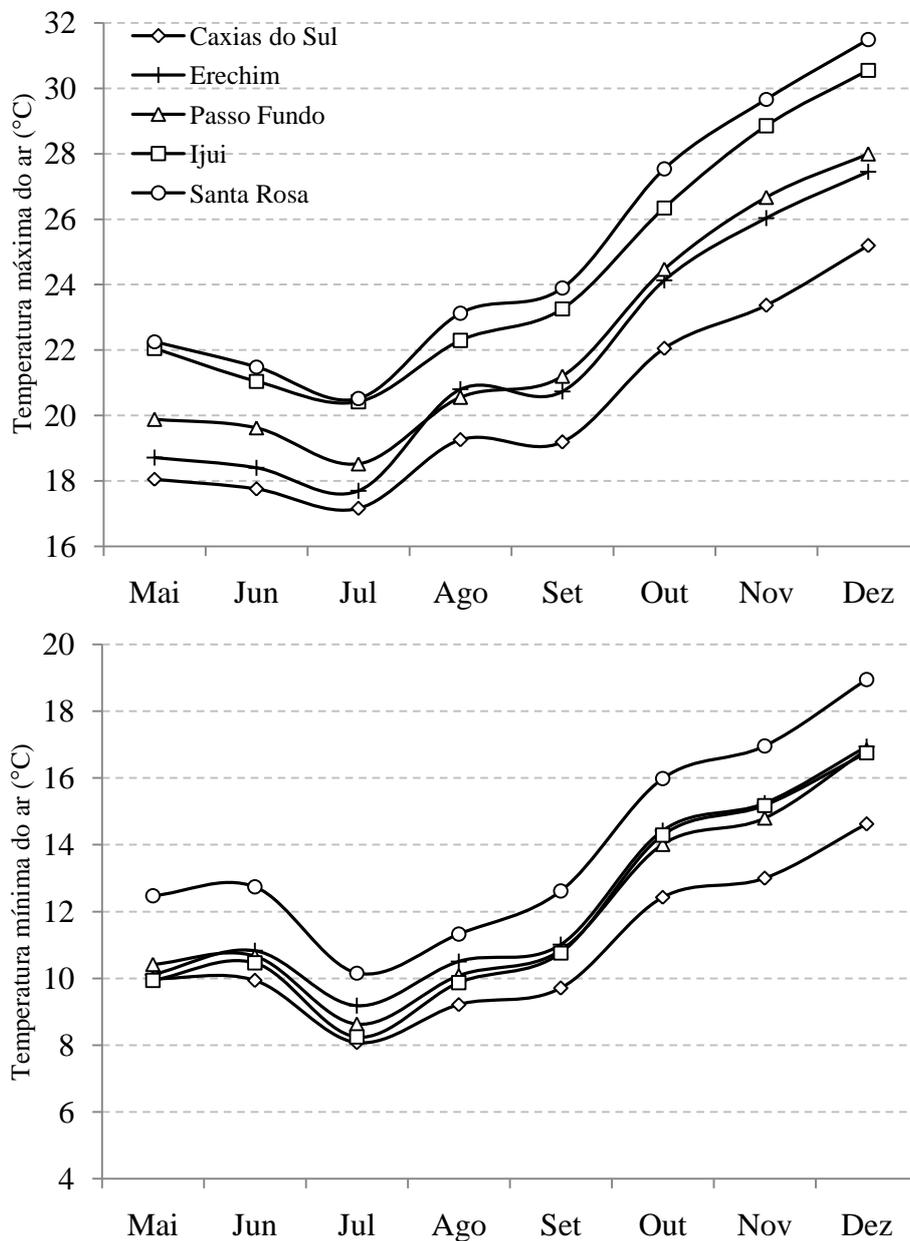
A temperatura média do ar, no período analisado, foi menor na regional Caxias do Sul (mínimo de 12,6°C em julho e 20°C em dezembro) e maior na regional Santa Rosa (mínimo de 15,3°C em julho e 25,2°C em dezembro) (Apêndice 17). As temperaturas mínimas e máximas do ar (Apêndice 18) apresentaram comportamento semelhante.



APÊNDICE 17. Temperatura média do ar, de maio a dezembro, nas estações meteorológicas de Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.

As regionais Erechim e Passo Fundo apresentaram valores médios semelhantes de temperatura do ar (máxima, mínima e média) em todos os meses (maio a dezembro). As temperaturas mínimas do ar foram, na regional Ijuí, semelhantes aos verificados em

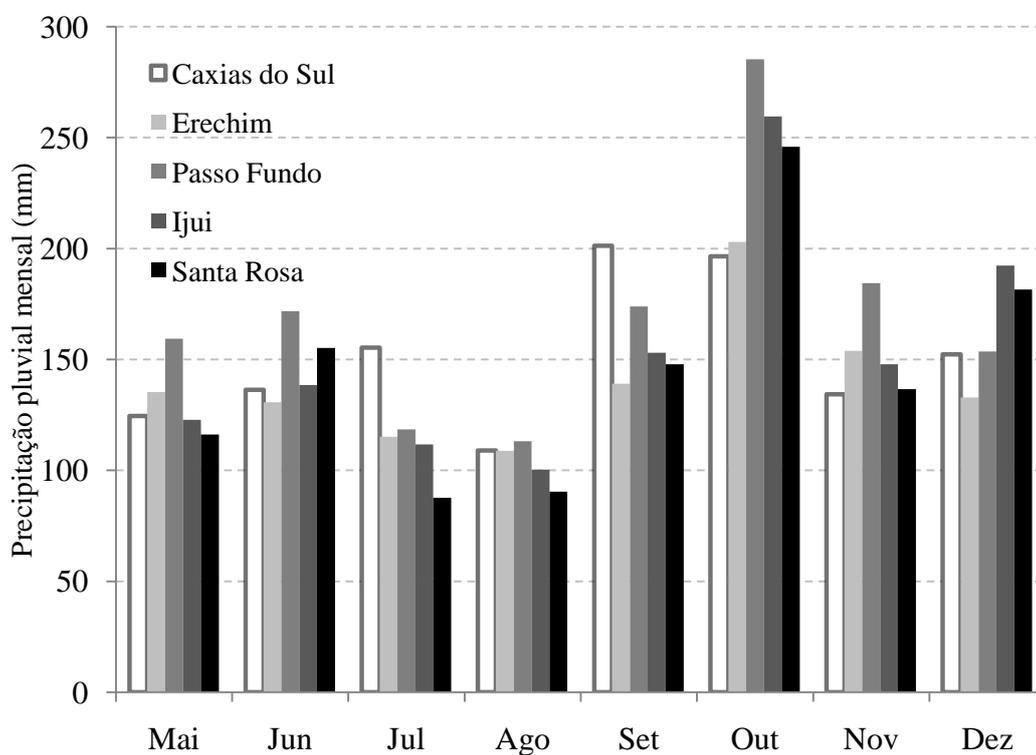
Erechim e Passo Fundo. No entanto, para as temperaturas máximas e médias, os valores foram mais próximos aos observados na estação meteorológica de Santa Rosa.



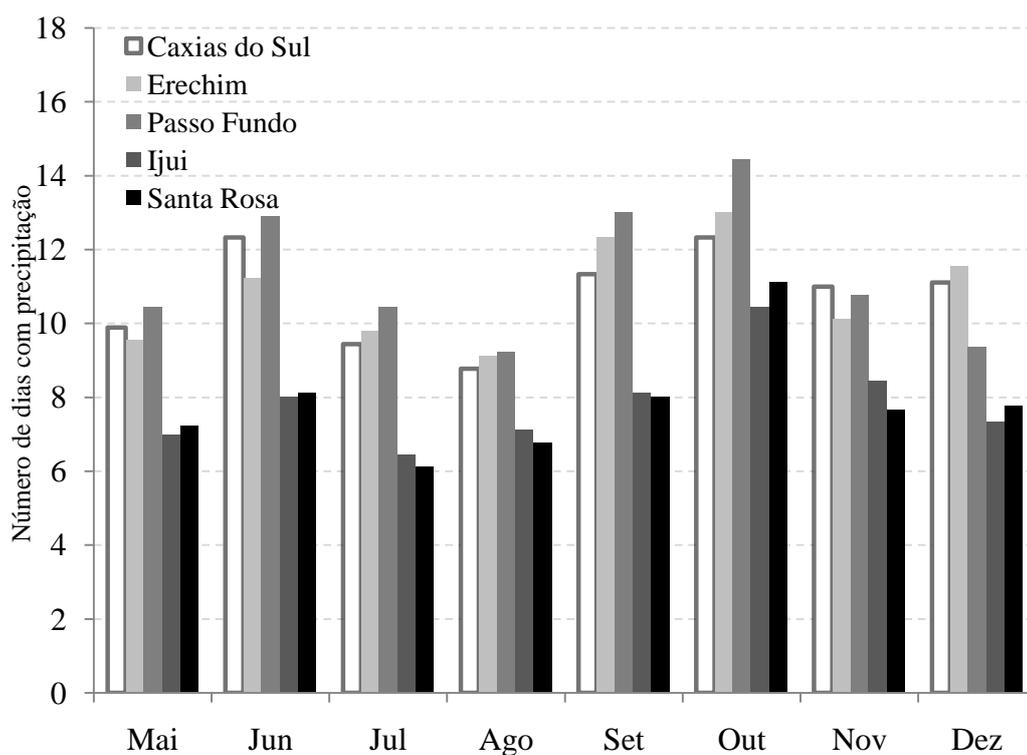
APÊNDICE 18. Temperatura mínima e máxima do ar, de maio a dezembro, nas estações meteorológicas de Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.

Na média dos anos, os menores valores de precipitação pluvial foram registrados, em todas regionais, no mês de julho - entre 90 (Santa Rosa) e 113 mm

(Passo Fundo) (Apêndice 19). Os maiores valores ocorreram em outubro e situaram-se entre 203 mm (Erechim) e 285 mm (Passo Fundo). Na regional Caxias do Sul, o maior valor de precipitação pluvial média foi de 201 mm, em setembro. É importante salientar que os maiores valores médios de precipitação pluvial em outubro foram influenciados pelas observações acima de 300 mm dos anos 2005 e 2008. O número médio de dias com precipitação pluvial nos meses de maio a dezembro oscilou entre seis (regional Santa Rosa, em julho) e 14 (regional Passo Fundo, em outubro) (Apêndice 20). De modo geral, esse número foi sempre menor nas regionais Santa Rosa e Ijuí, comparativamente aos observados nas demais.



APÊNDICE 19. Precipitação pluvial total, de maio a dezembro, nas estações meteorológicas de Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.



APÊNDICE 20. Número de dias com precipitação pluvial, de maio a dezembro, nas estações meteorológicas de Caxias do Sul, Erechim, Passo Fundo, Ijuí e Santa Rosa, média 2000 a 2008. Fonte dos dados: CEMETRS/FEPAGRO.