

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

MODELO AGROMETEOROLÓGICO-ESPECTRAL DE ESTIMATIVA DE  
RENDIMENTO DE GRÃOS DE TRIGO NO RIO GRANDE DO SUL

Amanda Heemann Junges  
Engenheira Agrônoma/UFRGS

Dissertação apresentada como um dos requisitos  
à obtenção do Grau de Mestre em Fitotecnia  
Área de Concentração Agrometeorologia

Porto Alegre (RS), Brasil.  
Março de 2008.



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Ruth e Erico, e à Amália, pelo apoio e eterno incentivo.

Ao Daniel, por estar sempre ao meu lado. E por responder a milhares de dúvidas sobre cereais de inverno.

À Prof. Denise Cybis Fontana, um exemplo profissional e pessoal. Muito obrigada pela amizade, pelos conselhos e pela excelente orientação, que foram, são, e continuarão sendo fundamentais para minha formação.

Aos colegas do Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia, em especial ao Ricardo Wanke de Melo e à Eliana Veleda Klering (sem a qual nenhuma imagem MODIS teria sido processada!).

Às minhas amigas Mariana e Maria Isabel, que, mesmo a distância, me fazem acreditar no valor de uma amizade sincera.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

# MODELO AGROMETEOROLÓGICO-ESPECTRAL DE ESTIMATIVA DE RENDIMENTO DE GRÃOS DE TRIGO NO RIO GRANDE DO SUL<sup>1</sup>

Autor: Amanda Heemann Junges  
Orientador: Denise Cybis Fontana

## RESUMO

Modelos agrometeorológicos são ferramentas importantes em vários setores da agricultura, por permitirem estimativas de rendimento antecedentes à data de colheita. Em modelos agrometeorológico-espectrais, o componente agrometeorológico expressa condições meteorológicas e o espectral expressa, além destas, diferenças de práticas de manejo, cultivares e demais estresses não incluídos no componente agrometeorológico. O objetivo deste trabalho foi elaborar um modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de trigo, para treze municípios localizados ao norte do Estado do Rio Grande do Sul, pertencentes à região de atuação da Cooperativa Triticola Mista Alto Jacui Ltda (Cotrijal). Para isso, foram utilizados dados meteorológicos e de rendimento médio anual de trigo (de 1990 a 2006); e espectrais (valor médio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI, obtido de imagens MODIS), de 2000 a 2006. A partir deste conjunto de dados, foi analisada a tendência tecnológica, escolhidos os indicadores agrometeorológicos e espectrais do rendimento e realizado o ajuste do modelo. Os resultados mostraram que, na região da Cotrijal, as tecnologias de cultivo estão consolidadas, não existindo tendência tecnológica significativa. São considerados indicadores agrometeorológicos do rendimento de trigo: soma térmica (acumulada de maio a outubro); precipitação pluvial (na etapa final de desenvolvimento dos grãos e na colheita); e ocorrência de eventos extremos de temperaturas mínimas do ar (geadas por ocasião do florescimento). A integração do NDVI, ocorrido ao longo do ciclo da cultura, é um importante indicador espectral do rendimento de trigo, pois caracteriza o processo dinâmico de desenvolvimento da cultura. Os modelos de estimativa de rendimento de trigo ajustados, construídos a partir de indicadores agrometeorológicos e espectrais, apresentam características de precisão, fácil execução e baixo custo.

---

<sup>1</sup> Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (123p.) Março, 2008.

# AGROMETEOROLÓGICAL-SPECTRAL MODEL TO ESTIMATE WHEAT YIELD IN RIO GRANDE DO SUL<sup>1</sup>

Autor: Amanda Heemann Junges  
Orientador: Denise Cybis Fontana

## ABSTRACT

Agrometeorological models are important tools in various sectors of the agriculture activity by allowing making estimates before the harvest. In the agrometeorological-spectral models, the agrometeorological component express weather conditions; and the spectral component express, besides these, differences in farming practices, cultivars and other constraints and stresses not included in the agrometeorological component. The objective of this research was to create an agrometeorological-spectral model to estimate wheat yield for thirteen shires located to the north of the state of Rio Grande do Sul, belonging to the Cooperativa Triticola Mista Alto Jacui Ltda (Cotrijal) area. Therefore, we used official data, the average annual wheat yield, and meteorological data for the period from 1990 to 2006, and spectral data (average value of the Normalized Difference of Vegetation Index - NDVI, obtained from MODIS images), from 2000 to 2006. From this data set, the technological trend was analyzed, the spectral and the agrometeorological indicators were chosen and the wheat yield model was adjusted. The results showed that in the Cotrijal region, the farming technologies are consolidated, with no significant technological trend. The heat units (accumulated from May to October), the rainfall (in the final grain stage of development and harvest), and the occurrence of extreme minimum air temperatures events (frosts at the flowering) are considered agrometeorological indicators of wheat yield. The NDVI, integrated during the crop season, is an important spectral indicator of the wheat yield because characterizes the dynamic process of the crop development. The adjusted wheat yield models, build from agrometeorological and spectral indicators, have characteristics of precision, easy use and low cost.

---

<sup>1</sup> Master of Science dissertation in Agronomy, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (123p.) March, 2008.

## SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	05
2.1 Estimativas agrícolas brasileiras.....	07
2.2 Aspectos gerais da cultura do trigo.....	07
2.3. Produção de trigo.....	08
2.3.1. Produção de trigo no mundo.....	08
2.3.2. Produção de trigo no Brasil.....	09
2.3.3. Produção de trigo na Região Sul.....	12
2.3.4. Produção de trigo no Rio Grande do Sul .....	14
2.4. Desenvolvimento da planta de trigo.....	15
2.5. Exigências bioclimáticas da cultura do trigo.....	18
2.5.1. Temperatura do ar.....	18
2.5.2. Radiação solar e Fotoperíodo.....	20
2.5.3. Precipitação pluvial.....	22
2.5.4. Umidade do ar.....	23
2.6. Rendimento de grãos da cultura de trigo.....	24
2.6.1. Definição de rendimento.de grãos .....	24
2.6.2. Modelagem Agrometeorológica.....	26
2.6.3. Modelagem Agrometeorológica-Espectral.....	29
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1. Área de estudo.....	36
3.1.1. Localização.....	36
3.1.2. Clima.....	36
3.1.3. Produção de trigo.....	42
3.2. Dados.....	44
3.2.1. Dados de rendimento.....	44
3.2.2. Dados meteorológicos.....	45
3.2.3. Dados espectrais.....	45
3.2.4. Dados de campo.....	45
3.3. Análises.....	46
3.3.1. Dados de rendimento.....	46
3.3.2. Dados meteorológicos .....	46
3.3.3. Dados espectrais.....	48
3.3.4. Dados de campo.....	51
3.4. Escolha dos indicadores e ajuste do modelo.....	51

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4.1. Tendência temporal dos rendimentos de grãos .....	53
4.1.1. Rio Grande do Sul.....	53
4.1.2. Regional EMATER Passo Fundo.....	54
4.1.3. Cotrijal.....	55
4.2. Perfis temporais de NDVI: lavouras de cereais de inverno.....	57
4.3. Máscara de cultivo.....	59
4.4. Perfis temporais de NDVI: regional e máscara de cultivo.....	72
4.5. Indicadores agrometeorológicos do rendimento de grãos de trigo	77
4.5.1. Correlações significativas.....	80
4.5.2. Correlações não significativas.....	82
4.5.3. Escolha dos indicadores agrometeorológicos.....	84
4.6. Indicador espectral do rendimento de grãos de trigo.....	84
4.6.1. NDVI regional.....	84
4.6.2. NDVI máscara de cultivo.....	86
4.7. Indicadores agrometeorológicos e espectrais.....	89
4.8. Modelo agrometeorológico-espectral.....	90
4.8.1. Modelo 1 (M1).....	93
4.8.2. Modelo 2 (M2).....	95
4.8.3. Modelo 3 (M3).....	96
4.8.4. Modelo 4 (M4).....	98
4.8.5. Considerações finais.....	101
5. CONCLUSÕES.....	103
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
7. APÊNDICES.....	

## RELAÇÃO DE TABELAS

Página

1. Graus-dia e temperaturas basais calculadas para as cultivares de trigo BR 23 e BR 35, nas safras agrícolas de 1992 e 1993, em diferentes sub-períodos, sendo: semeadura (Sm), emergência (Em), duplo anel (Da), espiguetas terminal (Et), antese (Ant) e maturação fisiológica (Mf). Fonte: Rodrigues <i>et al</i> (2001a).....	19
2. Equações para estimativa de rendimento grãos de trigo em diferentes estádios fenológicos, onde y é o rendimento de grãos (kg.ha <sup>-1</sup> ); x é o índice de vegetação NDVI; e “a” e “b” são coeficientes. Fonte: Xavier (2005).....	33
3. Ajuste (R <sup>2</sup> ) entre rendimentos de grãos de trigo e NDVI para um estudo regional na Andalucia (Espanha). Fonte: Sebem (2005).....	33
4. Área ocupada com cereais de inverno. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	51
5. Área estimada pelos limiares (máscara de cultivos) e área oficial (IBGE) ocupada com cereais de inverno. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	62
6. Correlações entre elementos agrometeorológicos e rendimentos de grãos de trigo. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	78
7. Correlações entre rendimento de grãos de trigo e NDVI mensal, NDVI soma e NDVI integração obtidos sem e com a aplicação da máscara de cultivo, respectivamente, NDVI regional e NDVI máscara. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	85
8. Indicadores agrometeorológicos e espectral empregados na elaboração dos modelos de estimativa de rendimento de grãos de trigo, expressos em valores reais. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	87
9. Indicadores agrometeorológicos e espectral empregados na elaboração dos modelos de estimativa de rendimento de grãos de trigo, expressos em forma de função exponencial. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	88

10. Resultados do ajuste dos modelos de estimativa de rendimento de grãos de trigo. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	89
11. Análise de trilha do modelo M1, com as variáveis NDVI integrado (junho a outubro), índice de geada (setembro) e precipitação pluvial (outubro) expressas em valores reais. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	93
12. Análise de trilha do modelo M2, com as variáveis NDVI integrado (junho a outubro), índice de geada (setembro), precipitação pluvial (outubro) e graus-dia (maio a outubro) expressas em valores reais. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	94
13. Análise de trilha do modelo M3, com as variáveis NDVI integrado (junho a outubro), índice de geada (setembro) e precipitação pluvial (outubro) expressa em termos de função exponencial. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	96
14. Análise de trilha do modelo M4, com as variáveis NDVI integrado (junho a outubro), índice de geada (setembro), precipitação pluvial (outubro) e graus-dia (maio a outubro), sendo as duas últimas expressas em termos de função exponencial. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	98

## RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Produção total, área cultivada, rendimento de grãos e principais países exportadores e importadores de trigo no mundo. Fonte: adaptado de Rabelo (2007).....	9
2. Escala fenológica do trigo e componentes do rendimento de grãos definidos em cada estágio. Fonte: adaptado de: Shroyer (1995).....	16
3. Curva de reflectância da vegetação. Fonte: Sugawara (2001).....	31
4. Localização no Estado do Rio Grande do Sul e municípios pertencentes à região de estudo.....	37
5. Normais Climatológicas (1961-1990) de temperatura do ar, radiação solar global e insolação. Passo Fundo, RS. Fonte dos dados: Embrapa Trigo (2007).....	39
6. Normais Climatológicas (1961-1990) de precipitação pluvial, evaporação total, umidade relativa do ar, e velocidade do vento. Passo Fundo, RS. Fonte dos dados: Embrapa Trigo (2007).....	40
7. Balanço Hídrico Climatológico (CAD 50mm). Passo Fundo, RS. Fonte dos dados: Embrapa Trigo (2007).....	41
8. Porcentagem da área cultivada nos municípios pertencentes à área de abrangência da Cotrijal ocupada com cereais de inverno. Fonte: LSPA-IBGE (2007).....	43
9. Porcentagem da área cultivada encontrada nos diferentes estágios de desenvolvimento, de acordo com o Calendário de Acompanhamento de Lavouras de Trigo da EMATER. Passo Fundo, RS. Fonte dos dados: EMATER (2007).....	44
10. Rendimento de grãos de trigo ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) do Rio Grande do Sul. Fonte dos dados: Embrapa Trigo (2007).....	54
11. Rendimento ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) de grãos de trigo da Regional EMATER Passo Fundo. Fonte dos dados: LSPA-IBGE (2007).....	55

12. Rendimento ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) de grãos de trigo da região de abrangência da Cotrijal. Fonte dos dados: LSPA-IBGE (2007).....	57
13. Perfis temporais de NDVI de lavouras de cereais de inverno. Região de abrangência da Cotrijal, 2006.....	58
14. Imagens de mínimo NDVI (abril e maio) para os anos de 2000 a 2006. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	60
15. Imagens de máximo NDVI (junho a setembro) para os anos de 2000 a 2006. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	61
16. Imagem NDVI de diferença sem e com aplicação do limiar, para o ano 2000. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	65
17. Imagem NDVI de diferença sem e com aplicação do limiar, para o ano 2001. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	66
18. Imagem NDVI de diferença sem e com aplicação do limiar, para o ano 2002. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	67
19. Imagem NDVI de diferença sem e com aplicação do limiar, para o ano 2003. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	68
20. Imagem NDVI de diferença sem e com aplicação do limiar, para o ano 2004. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	69
21. Imagem NDVI de diferença sem e com aplicação do limiar, para o ano 2005. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	70
22. Imagem NDVI de diferença sem e com aplicação do limiar, para o ano 2006. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	71
23. Perfis temporais de NDVI regional e máscara de cultivo para os anos 2000 a 2002. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	73
24. Perfis temporais de NDVI regional e máscara de cultivo para os anos 2003 a 2005. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	74
25. Perfil temporal de NDVI regional e máscara de cultivo para o ano 2006. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	75
26. Perfil temporal de NDVI máscara de cultivo e rendimentos anuais de grãos de trigo inferiores a $1.800 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	76
27. Perfil temporal de NDVI máscara de cultivo e rendimentos anuais de grãos de trigo superiores a $1.800 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	76

28. Balanço Hídrico Meteorológico (CAD 50mm). Passo Fundo, 2001. Fonte dos dados: 8°DISME/INMET (2007).....	91
29. Relação entre rendimento de grãos de trigo ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) oficial e estimado pelos modelos M1, M2, M3 e M4 no período de estudo (2000 a 2006). Região de abrangência da Cotrijal, 2007.....	100

## 1 INTRODUÇÃO

As estimativas de safras agrícolas são fundamentais para segurança alimentar de um país ou região, sendo empregadas tanto na definição de preços, quanto nas políticas públicas de estoque, em função de fornecerem informações acerca da oferta de produtos. Entretanto, seja pela grande extensão territorial das áreas cultivadas, seja em função da dinâmica espaço-temporal da atividade agrícola, torna-se difícil a obtenção de informações atualizadas e confiáveis.

Tradicionalmente, a metodologia oficial de previsão de safras no Brasil é baseada em questionários aplicados diretamente aos produtores ou às entidades relacionadas à atividade agrícola. As estimativas de área cultivada, produção total e rendimento de grãos são obtidas após a realização de reuniões nas diversas regiões, o que envolve tempo e custos elevados, além de apresentarem alto grau de subjetividade.

Com o advento de informações, geradas por técnicas de sensoriamento remoto, várias possibilidades, tais como o emprego de imagens de satélite aliadas aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Sistemas de Posicionamento Global (GPS), têm sido apontadas como possíveis de serem empregadas na previsão de safras, na estimativa de área cultivada e nos modelos de estimativa de rendimento de grãos.

Nas últimas décadas, a aplicação de dados orbitais na avaliação do desenvolvimento de culturas agrícolas tem sido o objeto de estudo de diversas pesquisas científicas. A Faculdade de Agronomia/UFRGS, como parceira da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) no projeto Geosafras, vem desenvolvendo e testando metodologias que possam ser introduzidas na composição de um sistema brasileiro de previsão de safras. Busca-se, a partir da integração de informações provenientes de diferentes fontes, qualificar as estimativas oficiais, introduzindo maior objetividade e agilidade. No que se refere ao rendimento de grãos, muitos trabalhos têm comprovado a viabilidade de uso da modelagem agrometeorológica-espectral.

Considera-se, nesta modelagem, que a definição do rendimento de grãos da cultura é influenciada, principalmente, pelas condições meteorológicas. Entretanto, o rendimento de grãos é definido também, por outros fatores, como a ocorrência de pragas e doenças, fertilidade dos solos e manejo da lavoura. Estes fatores podem ser, em parte, avaliados indiretamente através de índices de vegetação obtidos a partir de imagens de satélite.

Os índices de vegetação fornecem informações a respeito de variáveis como biomassa, índice de área foliar e radiação fotossinteticamente ativa absorvida. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, conhecido como NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), é usualmente empregado em estudos da dinâmica da cobertura vegetal e, também, integrando modelos de estimativa de rendimento de grãos. Tal índice pode ser obtido através de imagens do sensor MODIS

(*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), o qual possui diversos produtos empregados no monitoramento da atmosfera, dos oceanos e da superfície terrestre.

Atualmente, para cultura do trigo, é empregado o modelo tradicional de previsão de área e de rendimento de grãos através de questionários respondidos pelos produtores, cooperativas e órgãos de assistência técnica. A elaboração de um modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de grãos de trigo visa melhorar a eficiência e a dinâmica das estimativas da produção agrícola em âmbito regional. Para tanto, pressupõe-se que: as condições meteorológicas ocorridas durante o ciclo da cultura de trigo são responsáveis pela definição do rendimento final de grãos e a inserção do NDVI, ao proporcionar uma visão geral do desenvolvimento da cultura, contribui para a elaboração de modelos de estimativa de rendimento de grãos mais adequados à realidade regional e, conseqüentemente, com melhores resultados finais.

Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo geral elaborar um modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de grãos de trigo, para treze municípios, localizados no norte do Estado do Rio Grande do Sul e pertencentes à região de abrangência da Cooperativa Tritícola Mista Alto Jacui Ltda – COTRIJAL.

Como objetivos específicos, tem-se:

1. Verificação da existência de tendência tecnológica nos rendimentos de grãos de trigo em diferentes escalas de abrangência (Estado, macro e microregião);

2. Definição de indicadores agrometeorológicos do rendimento grãos de trigo;
3. Verificação de metodologias para extração do componente espectral, obtido a partir de imagens NDVI/MODIS;
4. Definição de indicadores espectrais do rendimento de grãos de trigo;
5. Elaboração de modelo agrometeorológico-espectral adaptado às condições encontradas na área de estudo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Estimativas agrícolas brasileiras**

Levantamentos de safras são realizados com objetivo de acompanhar a evolução dos produtos agrícolas de maior importância econômica e social, e, dessa maneira, fornecer informações para elaboração de políticas agrícolas e de abastecimento (Conab, 2008).

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (órgão do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão) tem a competência, por delegação, de obter as estimativas oficiais referentes às safras agrícolas brasileiras. No entanto, outras instituições também disponibilizam estatísticas agrícolas, como é o caso, por exemplo, da Companhia Nacional de Abastecimento - Conab (empresa pública vinculada ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), que tem por competência gerir políticas agrícolas e de abastecimento.

Criado em 1973, o sistema Grupo de Coordenação de Estatísticas Agropecuárias – GCEA é um colegiado técnico (formado por representantes de órgãos produtores e usuários de estatísticas agropecuárias, públicos ou privados, com atuação em nível federal, estadual ou municipal), ao qual compete examinar os dados estatísticos registrados por diferentes fontes. Nos Estados, as reuniões mensais do GCEA são presididas por chefes das

representações do IBGE (IBGE, 2002) e contam, também, com a presença de técnicos da Conab

Através do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, o IBGE disponibiliza informações mensais a respeito de estimativas de produção, rendimento médio e áreas plantadas e colhidas. O mecanismo de coleta de dados fundamenta-se no acompanhamento permanente da evolução da produção, não somente através de levantamentos diretos, mas também, a partir de informações complementares (meteorologia, incidência de pragas e doenças, financiamentos concedidos, comercialização, industrialização, demanda de insumos e outras informações correlatas) (IBGE, 2002).

Os dados coletados são armazenados e computados, sendo que, em uma primeira fase é realizada uma crítica visual dos dados, para que possam ser detectados erros de preenchimento. Em uma segunda fase, executam-se programas de análise quantitativa e qualitativa, os quais verificam os dados digitados para que possam ser identificados erros de cálculos. Por fim, as informações são disponibilizadas sob a forma de publicação mensal contendo os dados de área, produção e rendimento médio, em nível de produto e Unidades da Federação.

A coleta de informações para a geração das estimativas agrícolas utiliza conceitos, definições e classificações adotadas internacionalmente (IBGE, 2002), porém, esta é uma tarefa trabalhosa, na qual os dados coletados são passíveis de erro, pois são obtidos de avaliações individuais, as quais são, de certo modo, subjetivas (Liu, 2007).

Os técnicos da Conab, além da participação nas reuniões mensais do GCEA, também realizam, periodicamente, roteiros de visitas a municípios

selecionados, de maneira a entrevistar produtores rurais, engenheiros agrônomos e técnicos que atuam em cooperativas, secretarias da agricultura, órgãos de assistência técnica e extensão rural (oficiais e privados) e agentes financeiros. Este trabalho é realizado em estreita colaboração com o IBGE, no sentido de promover a harmonização das estimativas oficiais de safras das principais culturas agrícolas brasileiras. Os dados da Conab, entretanto, têm caráter distinto dos do IBGE, pois são empregados no gerenciamento de estoques e estabelecimento de políticas de preços, requerendo maior agilidade de obtenção e divulgação.

## **2.2 Aspectos gerais da cultura do trigo**

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma planta de ciclo anual, pertencente à família *Poaceae* e ao gênero *Triticum*, cultivada durante os períodos de outono, inverno e primavera na Região Sul do Brasil. O grão de trigo é consumido na forma de pão, massa alimentícia, bolo e biscoito, ou, também, como ração animal, quando não atinge a qualidade exigida para consumo humano.

A cultura do trigo, que atualmente ocupa cerca de 20% da área cultivada no mundo, é originária do Oriente Médio (Ásia). O cultivo iniciou no Crescente Fértil, uma hipotética região em formato de meia-lua que se estende do norte do Vale do Rio Nilo até a Mesopotâmia (atuais Iraque, Kuwait, Líbano, Israel, Síria e Jordânia) (Lebre, 2003).

O gênero *Triticum* contém em torno de 30 espécies, sendo que metade é cultivada comercialmente e as restantes crescem de forma silvestre. O *Triticum aestivum* L., conhecido como trigo comum, é a espécie de maior interesse comercial. Grãos da espécie *Triticum durum* não

possuem as proteínas gliadina e glutenina, logo não são adequados à panificação, sendo destinados especialmente ao preparo de massas alimentícias do tipo semolina (massas “grano duro”) (Abitrigo, 2006).

## **2.3 Produção de trigo**

### **2.3.1 Produção de trigo no mundo**

A produção de trigo, no mundo, pode ser avaliada com base nos valores de área cultivada, rendimento médio e produção final de grãos (Figura 1). A área cultivada evoluiu positivamente até o início dos anos 80, porém, a partir de 1981, é verificado um declínio de cerca de 31 milhões de hectares, valor equivalente a uma redução próxima a 1,3 milhão de hectares anuais. A necessidade de produção de culturas agrícolas fornecedoras de proteínas ajuda a explicar esse fenômeno (Rabelo, 2007).

O rendimento médio de grãos de trigo aumentou cerca de 1.100 kg.ha<sup>-1</sup>, passando de 1.500 kg.ha<sup>-1</sup> na safra de 1975/76 para 2.600 kg.ha<sup>-1</sup> em 2003-2004, com tendência de estabilização a partir do final de 1990 (Rabelo, 2007).

Atualmente, os principais países produtores e exportadores mundiais são Argentina, Austrália, Canadá e Estados Unidos e, entre os importadores, destacam-se o Brasil, a China, Índia, Rússia, União Européia e Turquia. O Brasil é um país importador, visto que a produção interna atende somente 20% do consumo nacional, que é de cerca de 10 milhões de toneladas (Rabelo, 2007).

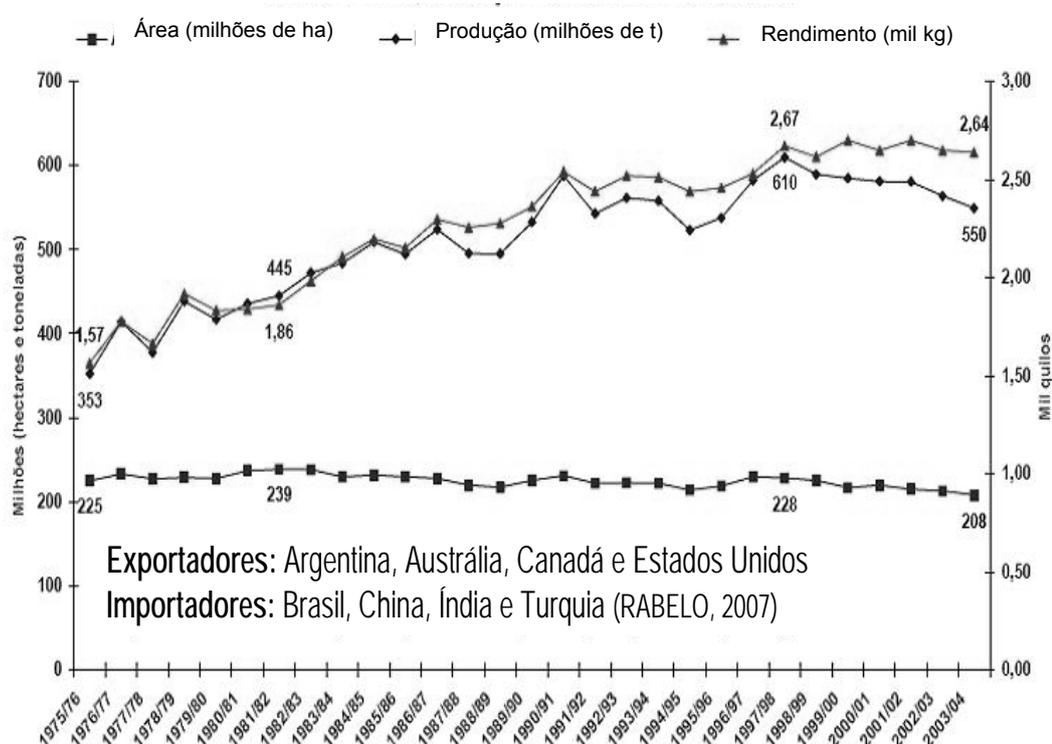


FIGURA 1. Produção total, área cultivada, rendimento de grãos e principais países exportadores e importadores de trigo no mundo. Fonte: adaptado de Rabelo (2007).

### 2.3.2 Produção de trigo no Brasil

O breve histórico da produção de trigo no Brasil, descrito a seguir foi, em sua maioria, baseado no trabalho de Lebre *et al.* (2003). Eventuais outras citações estão contidas no próprio texto.

O cultivo de trigo foi uma das primeiras atividades agrícolas introduzidas pelos colonizadores europeus no Brasil, sendo as primeiras sementes trazidas para a capitania de São Vicente por Martin Afonso de Souza em 1534. Os cultivos brasileiros, estabelecidos no Rio Grande do Sul e em São Paulo, foram anteriores aos norte-americanos, argentinos e uruguaios, e, também, os primeiros das Américas a exportar trigo.

Os imigrantes europeus muito contribuíram para difusão da cultura no país. Não houve, porém, preocupação com a aclimatação ou desenvolvimento de cultivares resistentes às doenças, especialmente fúngicas. Dessa maneira, com o surgimento da ferrugem (*Puccinia recondita* f. sp. *tritici*), a triticultura brasileira enfrentou a primeira fase de sua decadência (Colle, 1998).

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. Em 1930, no governo Getúlio Vargas, com o desenvolvimento industrial e o crescimento dos centros urbanos, o consumo de trigo cresceu, 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.

A partir da década de 1970, são identificados três períodos distintos da produção de trigo no Brasil. Na primeira fase (1970 a 1984), a produção de trigo atingiu cerca de dois milhões de toneladas. A segunda fase (1985 a 1989) se caracterizou pelo aumento de área cultivada e de produção, que chegou aos seis milhões de toneladas. Esses dois primeiros períodos foram caracterizados pela intervenção estatal com política de preço mínimo, garantia de compra de toda produção e da distribuição em cotas, aos moinhos. O governo proporcionou ao triticultor brasileiro uma melhor remuneração para a atividade e estimulou o uso de tecnologias modernas, de maneira que os maiores incrementos de área colhida ocorreram

justamente nos períodos de 1975 a 1980 e de 1986 a 1990, quando foram implementadas políticas de sustentação da produção nacional (Colle, 1998).

Já no terceiro e atual período, iniciado na década de 1990, o controle estatal e as barreiras tarifárias chegaram ao fim, provocando diminuição de produção e reestruturação da indústria. Com o fim da intervenção estatal na produção, distribuição e comercialização do trigo no Brasil, os setores envolvidos na cadeia foram expostos à competição internacional, porém, como nem todos estavam preparados para enfrentar o mercado, houve drástica redução da produção interna.

Atualmente, o trigo é o segundo item de maior participação na pauta de importações brasileiras, especialmente vindo da Argentina, país que exporta 30% de sua produção para o mercado brasileiro e, em função do acordo de livre comércio do Mercado Comum do Sul (Mercosul), está livre da incidência da Tarifa Externa Comum (TEC), de 11,5%, e do Adicional de Frete para Renovação da Marinha Mercante (AFRMM), de 25% sobre o frete, o que o torna, conseqüentemente, mais barato. Esse fato ajuda a explicar o porquê de cerca de 90% das importações brasileiras de trigo provirem deste país.

A grande dependência deste cereal importado ocorre devido à concorrência no mercado internacional, mas, também, ao elevado custo de produção interno e a menor qualidade da matéria-prima, conforme alegam as indústrias moageiras. Soma-se a isso, ainda, o elevado custo de transporte e de logística, em função das distâncias entre os centros produtores e consumidores.

A ampliação da produção de trigo no Brasil apresenta vantagens que vão desde o abastecimento e segurança alimentar da população até as alternativas na geração de emprego, visto que o setor tritícola tem participação significativa no PIB do País e é um importante gerador de postos de trabalho. Atualmente, cerca de dois milhões de brasileiros trabalham na indústria de moagem e beneficiamento, envolvendo a produção de farinhas (domésticas e industriais), pães, massas e biscoitos, produtos que fazem parte do dia-a-dia de toda a população. A esse universo, devem ser acrescidos os que trabalham no plantio, colheita e movimentação do cereal. Essa quantidade de pessoas envolvidas no setor, da atividade agrícola até o consumidor, mostra a importância econômica e social da cadeia do trigo, da qual poucos têm consciência.

De acordo com Bacaltchuk (1999), os seguintes aspectos podem levar ao crescimento da cadeia produtiva do trigo: suprimento da demanda nacional e internacional de trigo "soft" para biscoitos e bolos, ampliação da produção em novas regiões (cerrados brasileiros) e definição de linhas de crédito de custeio e de comercialização.

### **2.3.3 Produção de trigo na Região Sul**

No Brasil, o cultivo de trigo se dá nas regiões Sul (RS, SC e PR), Sudeste (MG e SP) e Centro-oeste (MS, GO e DF), sendo a Região Sul responsável por cerca de 90% da produção brasileira. O Paraná é o maior Estado produtor (53% do total nacional), seguido do Rio Grande do Sul (36%), Santa Catarina (3%) e Mato Grosso do Sul (4%). O cultivo de trigo tem crescido nos últimos anos em estados onde, historicamente, a produção

deste cereal era praticamente inexistente, tais como Bahia, Goiás e demais estados do Cerrado (Embrapa Trigo, 2006).

As melhores condições edafoclimáticas para produção brasileira de trigo das classes pão e melhorador, destinados à fabricação de pão francês, outros pães e de massas alimentícias, encontram-se no norte do Paraná, sul de São Paulo, Mato Grosso do Sul e no Cerrado. Na parte sul do Paraná e em todo o Rio Grande do Sul, a maior parte da produção é classificada como brando, utilizada na fabricação de biscoitos, pizzas e bolos. O trigo *durum*, utilizado no preparo de massas especiais, não é produzido no Brasil, em virtude da exigência de condições edafoclimáticas específicas. A classificação “outros usos”, resultante da mistura de vários tipos de trigo, é utilizada na fabricação de massas que utilizam ovos ou outras substâncias para a formação de liga (Ignaczak, 2006).

O trigo é um importante cereal, tanto para o Rio Grande do Sul quanto para o Paraná, pela necessidade de ocupação das áreas durante o período de inverno e pela falta de outras culturas como opções para o referido período. No entanto, são observadas diferenças entre os dois maiores estados produtores: no Rio Grande do Sul, em função das condições climáticas adversas, especialmente geadas tardias, a colheita do trigo é retardada, comparativamente ao Paraná, em até dois meses. Com esta antecipação, o produto paranaense pode ser comercializado no centro do país antes da entrada do produto importado oriundo, principalmente, da Argentina. Outro aspecto positivo em favor do Paraná é a proximidade com a Região Sudeste, maior centro consumidor e de processamento do país, o que possibilita o escoamento da safra com custos de transporte menores.

Apesar das desvantagens, a produção de trigo no Rio Grande do Sul ocorre em unidades agrícolas maiores, tornando possível aumentar a competitividade devido à economia de escala. O tricultor gaúcho aposta na cultura, pois o trigo é a principal opção de inverno nos sistemas de produção de grãos no Sul do Brasil, a única com capacidade de ser estabelecida em grande escala e agregar renda (e não meramente gastos com cobertura de solo) (Cunha, 2005), beneficiando assim, a sustentabilidade do processo produtivo nas regiões onde está inserido (Ignaczak, 2006).

#### **2.3.4 Produção de trigo no Rio Grande do Sul**

No Estado do Rio Grande do Sul, o cultivo de trigo iniciou em 1737 com a introdução de sementes vindas de São Paulo. Alguns historiadores, no entanto, acreditam que o trigo já era cultivado nas reduções jesuíticas, antes dos açorianos estabelecerem-se na Capitania de São Pedro do Rio Grande do Sul. Com o objetivo de povoar as Missões, chegaram ao Estado, a partir de 1752, um grande número de imigrantes açorianos, os quais desenvolveram uma economia de subsistência (na qual inseria-se o trigo), destinada também ao abastecimento das tropas sediadas nessa zona (Jacobsen, 1999).

Ainda de acordo com Jacobsen (1999), o interesse pela produção do charque, os conflitos armados e o surgimento da moléstia conhecida como ferrugem entre 1811 e 1814, foram as responsáveis pelo desaparecimento da cultura a partir de 1823. O ressurgimento da tricultura aconteceu por volta de 1875 com a chegada dos primeiros imigrantes italianos que se

estabeleceram nas terras situadas na encosta superior do Planalto Riograndense.

A partir deste período, a história da produção de trigo no Rio Grande do Sul foi semelhante a da produção no Brasil, ou seja, havendo inicialmente medidas governamentais de apoio à triticultura, até a abertura do mercado na década de 1990, conforme já descrito anteriormente.

No Rio Grande do Sul, a produção de trigo teve seu auge na década de 1970 (Mundstock, 1999). A área cultivada e a quantidade de grãos produzida decresceram significativamente nos últimos anos e, atualmente, o Estado é o segundo maior produtor nacional, respondendo por 36,42% (1.532.659 toneladas) do total produzido no país, considerando-se dados de 2001 a 2003 (Rio Grande do Sul, 2006).

As principais regiões produtoras de trigo, em número de quatro, concentram-se principalmente no norte do Estado e são responsáveis por 56,3% da produção estadual: Região da Produção (16,3%), do Noroeste Colonial (15,5%), do Alto Jacuí (13,1%) e Missões (11,3%) (Rio Grande do Sul, 2006).

#### **2.4 Desenvolvimento da planta de trigo**

É importante salientar que as informações contidas nos itens 2.3 e 2.4 da presente revisão bibliográfica são citações de Mundstock (1999), de maneira que serão mencionadas, no texto que segue, apenas eventuais citações de outros pesquisadores.

A compreensão dos aspectos, relacionados ao desenvolvimento da planta de trigo, é fundamental para o entendimento da formação do

rendimento de grãos de grãos e das possíveis limitações causadas pelo ambiente. Sendo assim, são apresentadas as principais etapas do desenvolvimento das plantas de trigo (Figura 2) e a atuação dos elementos meteorológicos em cada uma delas, quando os mesmos forem relevantes.

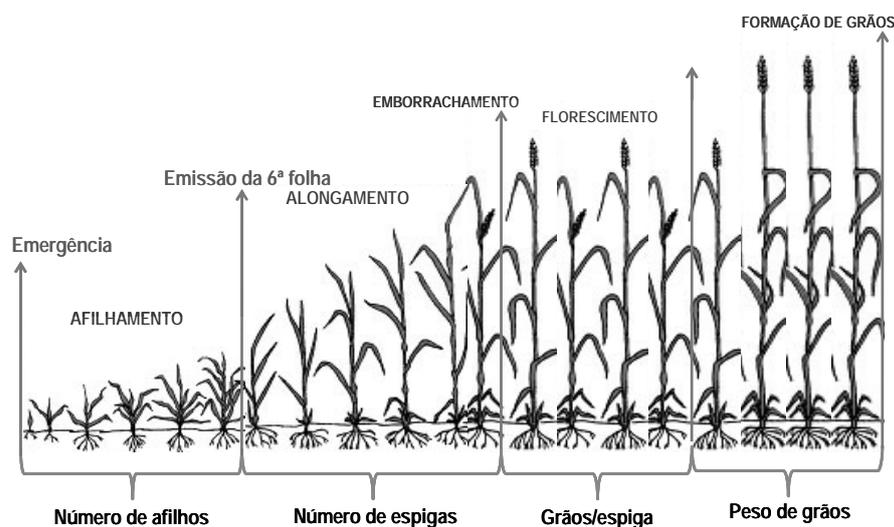


FIGURA 2. Escala fenológica do trigo e componentes do rendimento de grãos definidos em cada estágio. Adaptado de: Shroyer (1995).

1. Afilhamento: neste período, temperaturas entre 15 e 20°C são as que favorecem a formação de maior número de afilhos (Scheren *et al.*, 2000). De modo geral, todos fatores que permitem um bom crescimento e desenvolvimento da planta (disponibilidade hídrica, estruturação do solo e adubação adequada) acabam por favorecer, também, a emissão de afilhos.

2. Alongamento do colmo: crescimento dos entre-nós da planta com aumento da sua estatura. Paralelamente, há o desenvolvimento dos afilhos e da espiga do colmo principal. Neste período, pouco antes de haver a emergência da espiga, a inflorescência encontra-se envolta na bainha da folha bandeira, caracterizando o estágio de emborrachamento.

3. Emergência das inflorescências: em trigo, o surgimento das inflorescências não coincide com o florescimento, pois a abertura das anteras se dá alguns dias (5 a 7) após a plena emergência das inflorescências.

4. Florescimento: o florescimento ocorre, primeiramente, no colmo principal e, em seguida, nos afilhos, obedecendo a mesma ordem do surgimento.

5. Fertilização: o pólen de cada flor é responsável pela fecundação de seu próprio óvulo, embora, pela ação do vento, possa ocorrer também fecundação cruzada (estimada em 1 a 4%). De 80 a 90% das flores são fecundadas durante o dia e a abertura das flores é favorecida por temperatura do ar entre 13 e 25°C, enquanto que dias nublados e frios ou com precipitação pluvial são desfavoráveis.

O processo de fertilização é o mais crítico no desenvolvimento da planta e as condições ambientais podem prejudicar o sucesso da formação de grãos. Temperaturas muito baixas, por ocasião do florescimento, causam esterilidade, situação esta que ocorre na Região Sul do País, com grandes prejuízos aos cereais de estação fria em função do congelamento das estruturas de reprodução, principalmente óvulos (dado o elevado teor de água que possuem).

6. Formação de grãos: período que se estende da fertilização do óvulo até o máximo acúmulo de massa seca no grão e que é caracterizado pela formação do embrião e pela deposição de reservas. O material translocado aos grãos provém da fotossíntese e da remobilização do que foi previamente acumulado no colmo, folhas e raízes.

A formação do grão dura de 30 a 50 dias, sendo reduzida em condições de elevada temperatura do ar, pouca precipitação pluvial com conseqüente baixa umidade do solo, e dias longos e ensolarados.

## **2.5 Exigências bioclimáticas da cultura do trigo**

### **2.5.1 Temperatura do ar**

Os efeitos da temperatura do ar manifestam-se, principalmente, na duração do período que se estende da emergência ao florescimento. Eventualmente, a temperatura do ar afeta o período de enchimento de grãos.

Em regiões subtropicais o trigo é semeado no outono e inverno, sendo recomendado o período de final de maio a início de julho. Nessas condições, a cultura apresenta crescimento e desenvolvimento adequados, quando são atendidas as características de duração do ciclo (100 a 115 dias) e de acúmulo de graus dia. Hamada (2001), em experimento realizado em Paranapanema (SP), considerando a temperatura base (temperatura mínima para o desenvolvimento) de 5°C, verificou a necessidade de 1.857,5 graus-dia para que o ciclo da cultura se completasse, ou seja, da semeadura à maturação de colheita. De acordo com Rodrigues *et al.* (2001a), em experimento realizado em Passo Fundo (RS), empregando temperaturas basais específicas para cada estágio de desenvolvimento, foram necessários 1.117 graus-dia, acumulados até a maturação fisiológica (Tabela 1).

Para que o rendimento de grãos seja satisfatório, a planta necessita acumular uma determinada quantidade de graus-dia, e, tão importante

quanto a garantia de que essa quantidade seja atendida é o tempo na qual ela ocorrerá. As menores temperaturas prolongam o ciclo, garantindo um acúmulo gradual de graus-dia e um melhor desenvolvimento dos órgãos reprodutivos das plantas. No Rio Grande do Sul, a temperatura do ar garante um período ideal de crescimento e desenvolvimento das plantas de junho a outubro.

Tabela 1. Graus-dia e temperaturas basais calculadas para as cultivares de trigo BR 23 e BR 35, nas safras agrícolas de 1992 e 1993, em diferentes sub-períodos, sendo: semeadura (Sm), emergência (Em), duplo anel (Da), espiguetas terminal (Et), antese (Ant) e maturação fisiológica (Mf). Fonte: Rodrigues *et al.* (2001a)

<b>Sub-período</b>	<b>Graus-dia</b>	<b>Temperatura basal (°C)</b>
Sm-Em	110	2
Em-Da	192	5
Da-Et	227	1
Et-Ant	247	8
Ant-Mf	342	8
<b>Total</b>	<b>1.117</b>	<b>-</b>

O efeito de baixas temperaturas do ar na cultura de trigo produz resultados diferenciados, dependendo do estágio de desenvolvimento em que ocorrem. A partir do florescimento, 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. Baixas temperaturas e geadas também prejudicam o processo de formação do grão, em função da paralisação do seu enchimento, sendo que, na colheita, grãos que passam por esse estresse apresentam-se enrugados e com baixo peso.

As altas temperaturas são prejudiciais em qualquer etapa do desenvolvimento das plantas em função de:

- Inibição da germinação em temperaturas superiores a 32°C (a temperatura ideal é de 20°C ou inferior);
- Aceleração do ciclo, de maneira que as plantas apresentam folhas pequenas e flores e espiguetas em número reduzido;
- Diminuição do potencial das espiguetas e esterilidade das estruturas reprodutivas, tanto femininas quanto masculinas;
- “Golpe de calor”, ou seja, temperatura do ar superior a 32°C por dois ou mais dias, prejudicando o enchimento de grãos, em função da paralisação da síntese de proteínas, resultando em grão chocho;
- Diminuição da fotossíntese. A fotossíntese é um dos principais processos afetados por altas temperaturas. A taxa fotossintética decai quando a temperatura do ar atinge 28-29°C, o que prejudica o desenvolvimento da planta, pois as perdas via respiração celular continuam ocorrendo, não sendo supridas pela incorporação de CO<sub>2</sub>.

### **2.5.2 Radiação Solar e Fotoperíodo**

A radiação solar global associa-se direta e positivamente com o rendimento de grão e a qualidade dos mesmos, ou, mais especificamente, com o peso do hectolitro, peso de mil grãos, força de glúten e número de queda, que correspondem a índices de análise da qualidade de farinhas) (Guarienti *et al.*, 2003).

Menores densidades de radiação solar, durante o período de enchimento do grão, causam um decréscimo na taxa de enchimento, como consequência da redução na fotossíntese. Assim, a ocorrência de períodos de nebulosidade pode causar considerável redução no peso e número de

grãos, pois a menor quantidade de radiação implica em menor taxa fotossintética, com conseqüente diminuição da formação de moléculas de ATP.

Em termos de qualidade da radiação, a relação entre luz vermelha (V) e luz vermelha extrema (Ve) é o sinal ambiental mais importante para o afilhamento. Porém, esta relação não possui ação independente, mas sim integrando-se a um programa de desenvolvimento espacial e temporal da ação gênica, do desenvolvimento de organelas e da diferenciação celular.

O trigo é uma planta de dia longo. Algumas variedades respondem ao fotoperíodo, embora outras não o façam. É importante salientar que, nas condições de cultivo do Sul do Brasil, o comprimento do dia, ao longo dos estádios de desenvolvimento do trigo, não varia, de modo geral, em mais de duas horas. Essa variação mínima tem sido interpretada como insuficiente para provocar alterações significativas na planta, ou seja, as cultivares de trigo semeadas no Rio Grande do Sul apresentam pouca ou nenhuma resposta ao fotoperíodo e à vernalização. Dessa maneira pode-se afirmar que os processos de desenvolvimento da planta de trigo são controlados principalmente pela temperatura do ar (Rodrigues *et al.*, 2001b).

### **2.5.3 Precipitação pluvial**

O trigo não é uma cultura exigente em água, e de modo geral, é o excesso de precipitação pluvial que causa mais danos às plantas.

No Rio Grande do Sul os valores de precipitação pluvial estão no limite máximo de tolerância da cultura, tanto que, em anos nos quais a precipitação pluvial é acima da média no Estado (anos de El Niño), o

rendimento de grãos da cultura é afetado negativamente. Em 57% dos anos de ocorrência de El Niño, os desvios da média de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul foram negativos, enquanto que, dos eventos de La Niña, 67% apresentaram desvios positivos, evidenciando uma forte tendência dos anos de La Niña favorecerem a cultura do trigo e anos de El Niño serem desfavoráveis a mesma (Cunha, 1999).

Guarienti *et al.* (2003), 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, mostrou que o somatório da precipitação pluvial associou-se negativamente com rendimento de grãos em 50% dos anos analisados.

Os principais efeitos do excesso de precipitação pluvial na cultura do trigo são:

- Desenvolvimento de condições anaeróbicas no solo que impedem a germinação e prejudicam a respiração pelas raízes. Além disso, a adequada absorção de nutrientes pode ser prejudicada, especialmente no caso do nitrogênio, que se encontra na forma de nitrato, em condições anaeróbicas. Nesta forma, o nitrogênio não é disponível às plantas e sim utilizado pelos microorganismos desnitrificantes, que o reduzem a óxido nitroso (volátil). Para Guarienti *et al.* (2003), o excesso hídrico do solo associou-se negativamente com rendimento de grãos em 37,5% dos períodos analisados.

- Precipitações pluviais intensas e freqüentes no final da primavera, tais como as que caracterizam anos de El Niño, e que são coincidentes com a maturação e a colheita do trigo prejudicam o rendimento de grãos e a

qualidade em função das menores densidades de radiação solar da germinação pré-colheita. 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).

- Favorecimento de moléstias, visto que o excesso de precipitação pluvial e a elevada umidade do ar, principalmente na primavera (setembro, outubro e novembro), criam uma condição ambiental favorável ao desenvolvimento de doenças foliares e de espiga (Felício, 2004), as quais afetam de maneira negativa o rendimento de grãos e a qualidade dos grãos.

#### **2.5.4 Umidade do ar**

A umidade do ar tem sido considerada o fator mais importante para o sucesso da cultura do trigo no sul do País (Mundstock, 1999), ou seja, as doenças estão entre os fatores que mais têm contribuído para as limitações de rendimento de grãos da triticultura sul-brasileira (Pria, 2005).

Embora haja unanimidade de que baixos valores de umidade do ar são favoráveis à cultura, o valor do limite máximo não pode ser facilmente estabelecido, embora saiba-se que valores inferiores a 70% estão associados a boa produtividade em trigo, enquanto que, acima de 90%, favorece a ocorrência de moléstias foliares, tais como: ferrugem, giberela e helmintosporiose. Para Guarienti *et al.* (2003), a média da umidade relativa do ar associou-se negativamente com rendimento de grãos em 25% dos anos analisados (1990 a 1998).

Os meses críticos para a ocorrência de alta umidade são setembro, outubro e novembro, período no qual a alta umidade, associada à alta temperatura, favorece a incidência de moléstias.

## **2.6 Rendimento de grãos da cultura do trigo**

### **2.6.1 Definição de rendimento de grãos**

O rendimento de grãos pode ser considerado como o produto entre dois componentes principais: número de grãos por unidade de superfície (área) e peso de cada grão. Os componentes do rendimento de grãos são definidos em etapas distintas do ciclo de desenvolvimento da cultura, o que permite um melhor estudo dos efeitos ambientais em cada um deles, separada e independentemente. Sendo assim, as três etapas principais que definem os componentes do rendimento de grãos são (Cunha, 2006b):

1. Primeira etapa: da emergência até a metade do alongamento dos entre-nós (2 a 3 nós visíveis), quando a cultura expande a área foliar.

2. Segunda etapa: crescimento das espigas sem o grão. Nessa etapa é definido o número potencial de grãos, componente que está condicionado à sobrevivência das flores geradas.

3. Terceira etapa: enchimento de grãos, o qual inicia poucos dias após a floração e encerra na maturação fisiológica. Este é o período em que se determina o peso final de cada grão e, conseqüentemente, o rendimento de grãos. Em trigo, há uma relação negativa entre o peso médio do grão e o número destes por área (m<sup>2</sup>).

Ainda de acordo com Cunha (2006a), o ambiente influencia o desenvolvimento da cultura e a formação dos componentes de rendimento

de grãos. Sendo assim, há um período crítico, de aproximadamente 30 dias, concentrados entre 20 dias anteriores e 10 dias posteriores à antese, no qual as condições ambientais (especialmente radiação solar e temperatura) são essenciais para determinação do número de afilhos férteis, do número de espigas formadas por área e do número de flores que efetivamente poderão produzir grãos ( $n^{\circ}$  de grãos espiga<sup>-1</sup>). 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.

De modo geral, as limitações durante o período crítico tem maior efeito sobre a redução do número de grãos  $m^{-2}$ , pois, dentre os componentes do rendimento de grãos, este é o que possui maior associação com o rendimento de grãos (Rodrigues *et al.*, 2002).

As bases fisiológicas para o aumento do número de grãos por espiga em cultivares modernas de trigo, evidenciam que as mudanças no rendimento de grãos e no índice de colheita estão relacionadas à partição de biomassa em pré-antese. Nesse sentido, o número de grãos  $m^{-2}$  está relacionado à massa seca da espiga na antese, ou seja, com a capacidade da planta em acumular massa seca e particioná-la às estruturas reprodutivas em pré-antese. A correlação entre rendimento de grãos de grãos e massa seca de espigas, na antese, é de 0,67, resultado semelhante ao observado na Argentina (Rodrigues *et al.*, 2002).

É importante salientar, no entanto, que o limite máximo de partição de fotoassimilados a órgãos reprodutivos (índice de colheita) está em torno de 62%, permanecendo praticamente inalterado nas cultivares modernas de

trigo. Assim, estratégias de aumento de rendimento de grãos deveriam dirigir esforços para aumentar o número de grãos, pois, ao contrário do índice de colheita, pode haver um incremento desta variável (Rodrigues *et al.*, 2002).

### **2.6.2 Modelagem Agrometeorológica**

Para as espécies de interesse agrícola, a interação com o clima e o solo são fundamentais na determinação da capacidade de adaptação a um determinado local ou ecossistema, bem como a manifestação de fases fenológicas, produção e rendimento de grãos finais. Mesmo em ambientes onde determinada cultura agrícola tem plena adaptação, a variabilidade de crescimento e desenvolvimento está, basicamente, relacionada à variação do tempo meteorológico e, nesse sentido, pesquisas e trabalhos científicos buscam analisar os efeitos da variabilidade climática sobre a produção vegetal, através da elaboração de modelos (Braga, 1995). Ainda de acordo com Braga (1995), os modelos diferem entre si em função da formação básica do pesquisador envolvido (agrometeorologia, fisiologia vegetal, estatística, economia, engenharia operacional). Porém, todos procuram abordar os aspectos mais relevantes da interação solo-planta-atmosfera, de forma qualitativa e quantitativa, de acordo com o resultado final procurado.

Os modelos agrometeorológicos, também denominados modelos empírico-estatísticos, utilizam dados meteorológicos e de rendimento de grãos com o objetivo de estimar os coeficientes do modelo, mediante técnicas de regressão, visto que o primeiro passo, para a elaboração destes modelos, é o estabelecimento de funções que relacionem as variáveis meteorológicas e o rendimento de grãos (Braga, 1995; Liu, 2007). As

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 a equação linear múltipla:

$$Y = a + b x_1 + c x_2 + d x_3 + \dots + n x_n \quad (1)$$

Onde: Y é o rendimento de grãos estimado; a, b, c, d, ..., n são os coeficientes da equação e  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  são as variáveis independentes utilizadas para calcular Y.

Modelos de regressão múltipla utilizam dados mensais meteorológicos históricos para correlacioná-los com dados de rendimento de grãos. Os parâmetros de maior correlação são selecionados primeiramente e o modelo pode ser construído, por exemplo, com apoio de programas estatísticos computacionais, através de processos de *stepwise* ou *multivariant*, que selecionam os melhores coeficientes para o modelo (Braga, 1995).

Em 1975 foi introduzido o termo tendência tecnológica, o qual se refere às novas tecnologias, tais como novas variedades e/ou novos 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 constante de rendimento de grãos, decorrente de novas tecnologias e não de variações interanuais de dados meteorológicos (Braga, 1995).

Mota (1998), utilizando dados da Estação Climatológica de São Luiz Gonzaga, determinou os seguintes indicadores agrometeorológicos (e coeficientes de correlação) do rendimento de grãos de trigo no Estado do Rio Grande do Sul, no período de 1986 a 1995:

- x1: Duração do período de molhamento foliar em outubro ( $r = - 0,92$ )
- x2: Insolação total no mês de setembro ( $r = 0,93$ )
- x3: Índice de dano por geadas no mês de setembro ( $r = - 0,89$ )
- x4: Número de dias com precipitação pluvial em novembro ( $r = 0,86$ )

Dessa maneira, o rendimento de grãos do trigo foi estimado através da equação:

$$Y = 630,93 - 3,73x_1 + 6,57x_2 - 162,63x_3 + 56,04x_4 \quad (2)$$

O maior erro das estimativas deste modelo foi de 11%, o que, em estimativas de safras agrícolas, pode ser considerado um bom resultado. Porém, o modelo foi elaborado com dados de uma única estação meteorológica (visando estimar o rendimento médio de grãos de trigo do Estado) e, além disso, apresentou coeficiente de correlação positivo entre rendimento de grãos e número de dias com precipitação pluvial em novembro, quando seria esperado uma correlação negativa (item 2.4.3 da presente revisão bibliográfica).

De acordo com Braga (1995), o uso de funções polinomiais tornou-se, praticamente, um padrão para descrição da resposta das culturas a variáveis agrometeorológicas, à irrigação ou à adubação. Porém, o autor salienta que, embora esta técnica garanta bons resultados (boas estimativas), graças aos elevados coeficientes de determinação ( $R^2$ ), é importante lembrar que,

muitas vezes, os parâmetros das estimativas polinomiais não possuem significado biológico.

Os modelos agrometeorológicos de estimativa de rendimento de grãos são simples, precisos, econômicos e empregados com sucesso na previsão de safras em vários países. A incorporação de um termo espectral, ao modelo agrometeorológico (representado, por exemplo, por um índice de vegetação), pode torná-lo mais eficiente e condizente com o ambiente no qual se dá o desenvolvimento das culturas agrícolas e que se mostra dinâmico e variável em termos espaciais e temporais (Rizzi, 2004).

### **2.6.3 Modelagem Agrometeorológica-Espectral**

Modelos que utilizam elementos meteorológicos são denominados modelos agrometeorológicos, enquanto que aqueles que utilizam dados obtidos por satélites são comumente denominados modelos espectrais. O uso integrado destes dois componentes gera os modelos agrometeorológico-espectrais, nos quais o componente agrometeorológico expressa as condições meteorológicas (radiação solar, temperatura e umidade do ar, disponibilidade hídrica), enquanto que o componente espectral (índice de vegetação) expressa, além das condições meteorológicas, também as diferenças de práticas de manejo, cultivares, profundidade do sistema radicular e estresses não incluídos no modelo agrometeorológico (Melo, 2003).

Índices de vegetação podem ser obtidos através de diferentes fórmulas baseadas na diferença de resposta espectral apresentada pela vegetação nas bandas do vermelho (V) e infravermelho próximo (IVP). Tal

como pode ser observado na Figura 3, na porção do espectro solar correspondente ao vermelho, a radiação incidente é absorvida pela clorofila, fazendo com que os valores de reflectância sejam baixos. Por sua vez, nas porções do infravermelho próximo, os valores de reflectância são maiores, pois a radiação é refletida em função do espalhamento que ocorre no interior da folha (Sugawara, 2001).

Assim, um índice de vegetação resulta da combinação dos valores de reflectância em dois ou mais intervalos de comprimento de onda, possuindo uma 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 a informação referente à vegetação fica resumida a somente um valor numérico. Ou seja, a informação registrada em algumas bandas (geralmente duas) passa a ser contida em apenas um índice de vegetação, facilitando a inserção dessa informação nos modelos agrometeorológicos-espectrais (Rizzi, 2004).

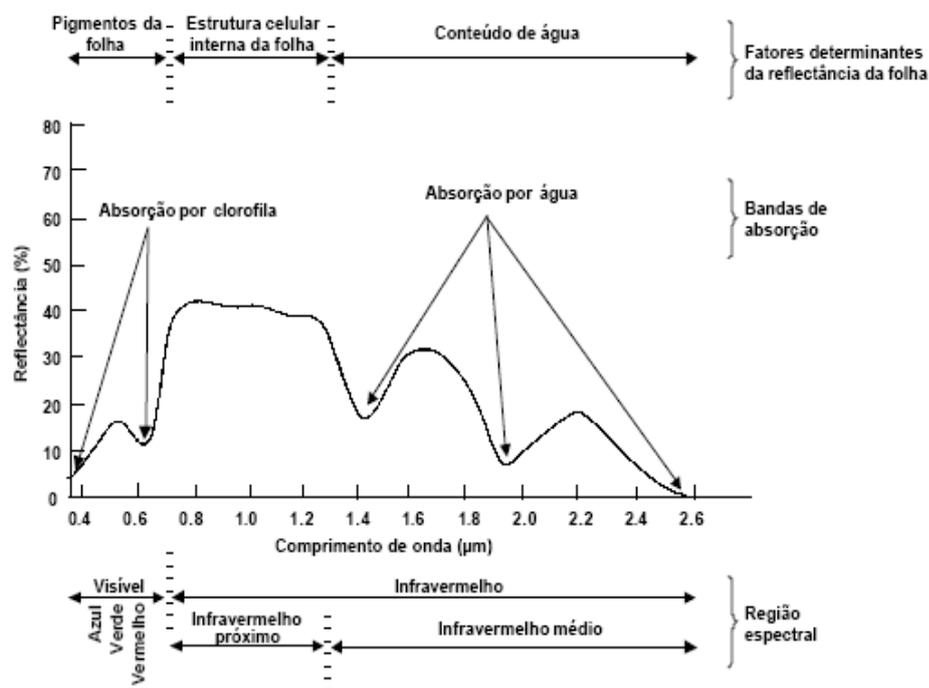


FIGURA 3. Curva de reflectância da vegetação. Fonte: Sugawara (2001).

O índice de vegetação mais utilizado em pesquisas relacionadas à dinâmica da cobertura vegetal é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*), dado pela equação:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{V}}}{\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{V}}} \quad (3)$$

Onde:  $\rho_{\text{IVP}}$  é a reflectância no infravermelho próximo e  $\rho_{\text{V}}$  é a reflectância no vermelho.

Embora numericamente os valores do NDVI possam variar entre -1 e 1, a vegetação está associada aos valores positivos. Materiais que refletem mais intensamente na porção do vermelho, em comparação com o infravermelho próximo (nuvens, água e neve), apresentam valores negativos. Solos descobertos e rochas refletem o vermelho e o infravermelho próximo quase na mesma intensidade, por conseguinte, o

NDVI aproxima-se de zero (Rizzi, 2004). Estudos (Hamada, 2001; Epiphanyo, 1996) que relacionam o comportamento do NDVI, ao longo do desenvolvimento da planta de trigo, mostraram que os valores são próximos de 0,5 no início do ciclo e crescentes até atingirem um máximo e se estabilizarem em torno de 0,8 a 0,9. 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.

O NDVI reflete o efeito de fatores ambientais no desenvolvimento da vegetação e, por apresentar boas correlações com o índice de área foliar (IAF) e a radiação fotossinteticamente ativa (RFA), é utilizado em estimativas de biomassa (Liu, 2007). Também pode ser empregado na estimativa de rendimento de grãos e da altura das plantas de trigo. Xavier (2005) elaborou modelos de regressão para estimativa destes parâmetros através de diferentes índices de vegetação, dentre os quais o NDVI (Tabela 2). O valor do índice de vegetação referente ao florescimento foi o de maior relação com o rendimento final de grãos.

Tabela 2. Equações para estimativa de rendimento de grãos de trigo em diferentes estádios fenológicos, onde y é o rendimento de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ); x é o índice de vegetação NDVI; e “a” e “b” são coeficientes. Fonte: Xavier (2005).

Estádio	Variável X	Modelo	a	b	R <sup>2</sup>
Afilhamento	NDVI	Linear ( $y = a + bx$ )	-2529,2	6612,1	0,24
Alongamento do Colmo	NDVI	Exponencial ( $y = a \exp^{bx}$ )	205,3	31,681	0,50
Espigamento (início)	NDVI	Exponencial ( $y = a \exp^{bx}$ )	429,7	23,907	0,47
Florescimento (final)	NDVI	Linear ( $y = a + bx$ )	882,2	4225,7	0,54
Mat.Fisiológica	NDVI	Linear ( $y = a + bx$ )	1235,3	6766,5	0,13

De acordo com Sebem (2005), em estudos realizados na Andalucia (Espanha), correlacionando o rendimento de grãos de trigo (de outono, inverno e primavera) e dados multitemporais de NDVI, foram encontrados maiores coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) com valores de NDVI integrado ou NDVI soma e não com valores mensais de NDVI, tal como pode ser visualizado na Tabela 3.

Tabela 3. Ajuste (R<sup>2</sup>) entre rendimento de grãos de trigo e NDVI para um estudo regional na Andalucia (Espanha). Fonte: Sebem (2005).

Parâmetro NDVI	R <sup>2</sup>
Integração de 12 períodos (meses)	0,75
Integração da estação de crescimento aparente	0,74
Soma de 12 períodos (meses)	0,74
Soma de abril	0,44
Soma de maio	0,45
Soma de junho	0,45
Soma de julho	0,46
Soma de agosto	0,75

Sebem (2005) utilizou o CGMS (*Crop Growth Monitoring System*), modelo de crescimento de cultivos composto de três módulos (interpolação de dados meteorológicos diários, simulação de crescimento de cultivos agrícolas e avaliação estatística de resultados) e estabeleceu a correlação entre as variáveis estimadas pelo CGMS e os reais rendimentos de grãos de trigo da zona de estudo. Os resultados indicaram correlações bastante baixas (inferiores a 40%) e, na maioria dos casos, negativas.

O NDVI é um dos produtos do sensor MODIS13. O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um dos principais instrumentos a bordo do satélite (plataforma) Terra, lançada em dezembro de 1999 pelo programa EOS (*Earth Observing System*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*).

O satélite encontra-se, atualmente, em uma órbita circular, quase polar, hélio-sincrônica, a 705 km de altura e com inclinação de 98,2°. O período médio é de 99 minutos e a passagem no Equador ocorre as 10 horas e 30 minutos.

O sensor MODIS realiza observações de toda a superfície a cada um ou dois dias, contribuindo para uma melhor compreensão da dinâmica global e dos processos que ocorrem na superfície terrestre, nos oceanos e na baixa atmosfera. As características gerais das imagens MODIS são: resolução temporal de 8 ou 16 dias, resoluções espaciais de 1 km, 500 m ou 250 m e resolução radiométrica de 12 bits (4.096 níveis de cinza). No que se refere, especificamente, ao produto NDVI, cada imagem possui resolução espacial de 250m e é disponibilizada como uma composição de imagens de 16 dias, sendo que, para cada ponto da imagem, o algoritmo seleciona o

pixel de melhor qualidade, em relação à geometria de visada e interferência atmosférica, dentre todas as passagens do período, que é, então, utilizado na geração das imagens compostas (NASA, 2007). Além disso, as imagens MODIS são disponibilizadas gratuitamente aos usuários.

## **3 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 Área de estudo**

#### **3.1.1 Localização**

A área de estudo compreendeu 13 municípios localizados ao norte do Estado do Rio Grande do Sul, principal região produtora de trigo no Estado, pertencentes à área de atuação da Cooperativa Tritícola Mista Alto Jacuí Ltda – COTRIJAL: Almirante Tamandaré do Sul, Carazinho, Colorado, Coqueiros do Sul, Ernestina, Lagoa dos Três Cantos, Não-Me-Toque, Nicolau Vergueiro, Passo Fundo, Santo Antônio do Planalto, Saldanha Marinho, Tio Hugo e Victor Graeff (Figura 4).

#### **3.1.2 Clima**

A região de estudo está localizada, de acordo com a classificação climática de Köppen, na Zona Climática Fundamental Temperada (C), clima fundamental úmido (f), variedade específica subtropical (Cfa), com precipitação pluvial bem distribuída durante o ano e temperatura média do mês mais quente superior a 22°C. Nas Figuras 5 e 6 constam as normais climatológicas (1961-1990) dos principais elementos meteorológicos, para o município de Passo Fundo, disponibilizadas pela Embrapa Trigo (Embrapa Trigo, 2007) e, na Figura 7, o Balanço Hídrico Climatológico.

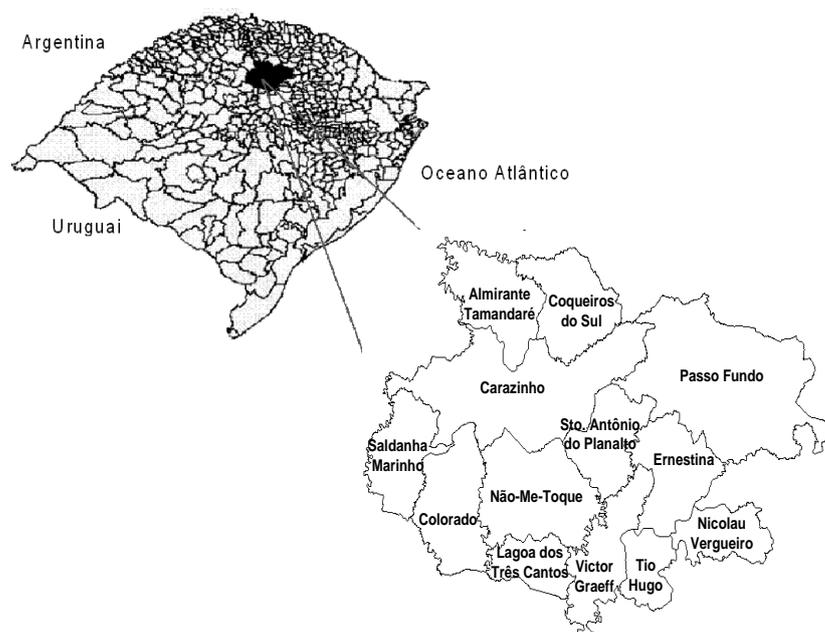


Figura 4. Localização no Estado do Rio Grande do Sul e municípios pertencentes à região de estudo.

Os transcurso anuais da insolação e da radiação solar global seguem o mesmo padrão da temperatura média do ar: menores valores no inverno e maiores no verão, sendo que, para ambos os elementos meteorológicos, valores mínimos ocorrem no mês de junho: 154 horas de insolação (5 horas de sol diárias) e  $223 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (41% menos do que em dezembro) (Figura 6).

A temperatura média do ar, normal anual, é de  $17,5^{\circ}\text{C}$  e os menores valores ocorrem nos meses de junho e julho (Figura 5). Porém, temperaturas mínimas absolutas inferiores a  $0^{\circ}\text{C}$  (possíveis geadas) podem ocorrer de maio a setembro, período em que as lavouras de cereais de inverno da região encontram-se em estádios vegetativo ou florescimento (setembro). Em maio, junho e julho, quando são registradas menores temperaturas, menor disponibilidade de radiação solar global e menor número de horas de

sol, é que ocorrem os maiores valores de umidade relativa do ar (76%) (Figura 6), os quais podem favorecer a ocorrência de doenças fúngicas em cereais de inverno. Embora a temperatura do ar média máxima, no período de maio a outubro, encontre-se entre 20 e 25°C, ocorrem temperaturas máximas absolutas superiores a 25°C, em junho e julho, que podem ocasionar “golpes de calor”.

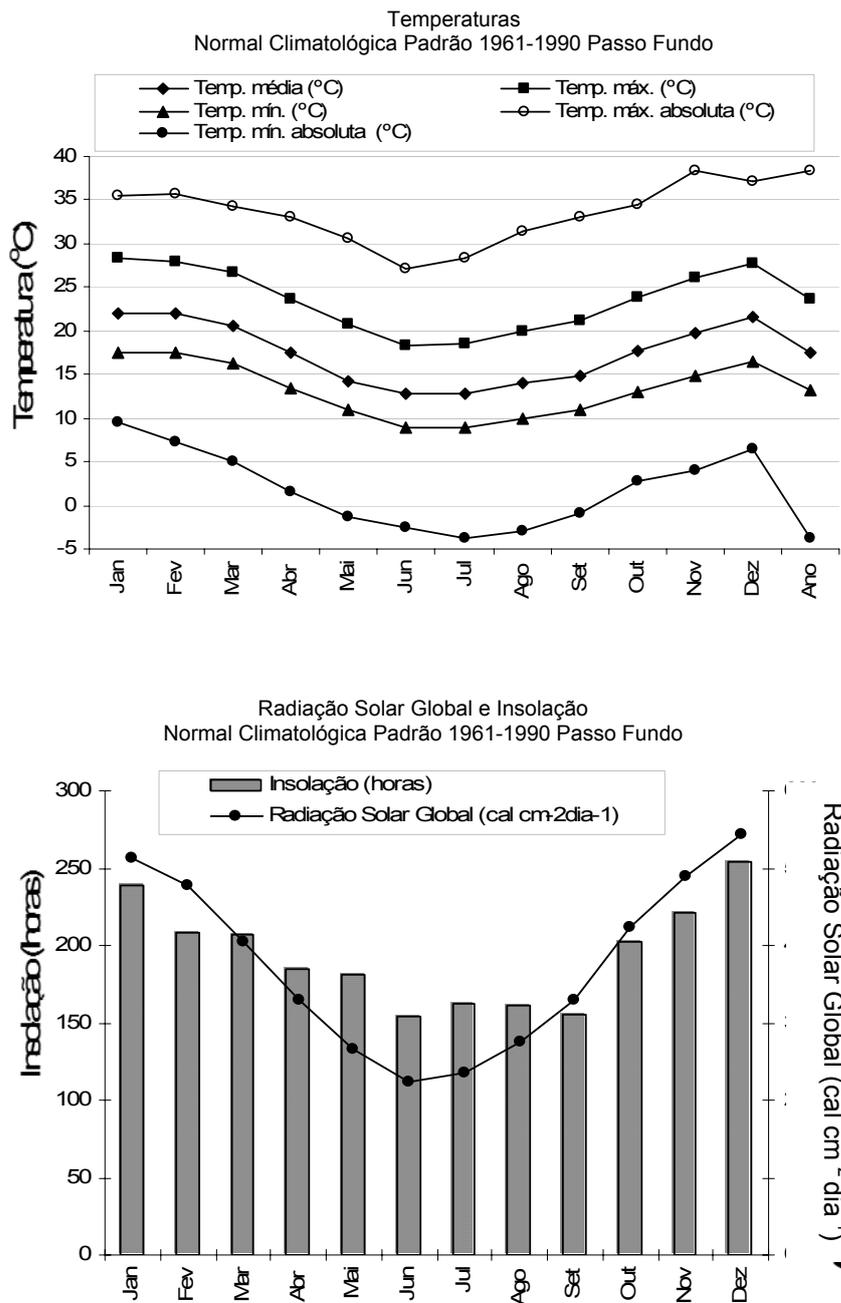


Figura 5. Normais Climatológicas (1961-1990) de temperatura do ar, radiação solar global e insolação. Passo Fundo, RS. Fonte dos dados: Embrapa Trigo, 2007.

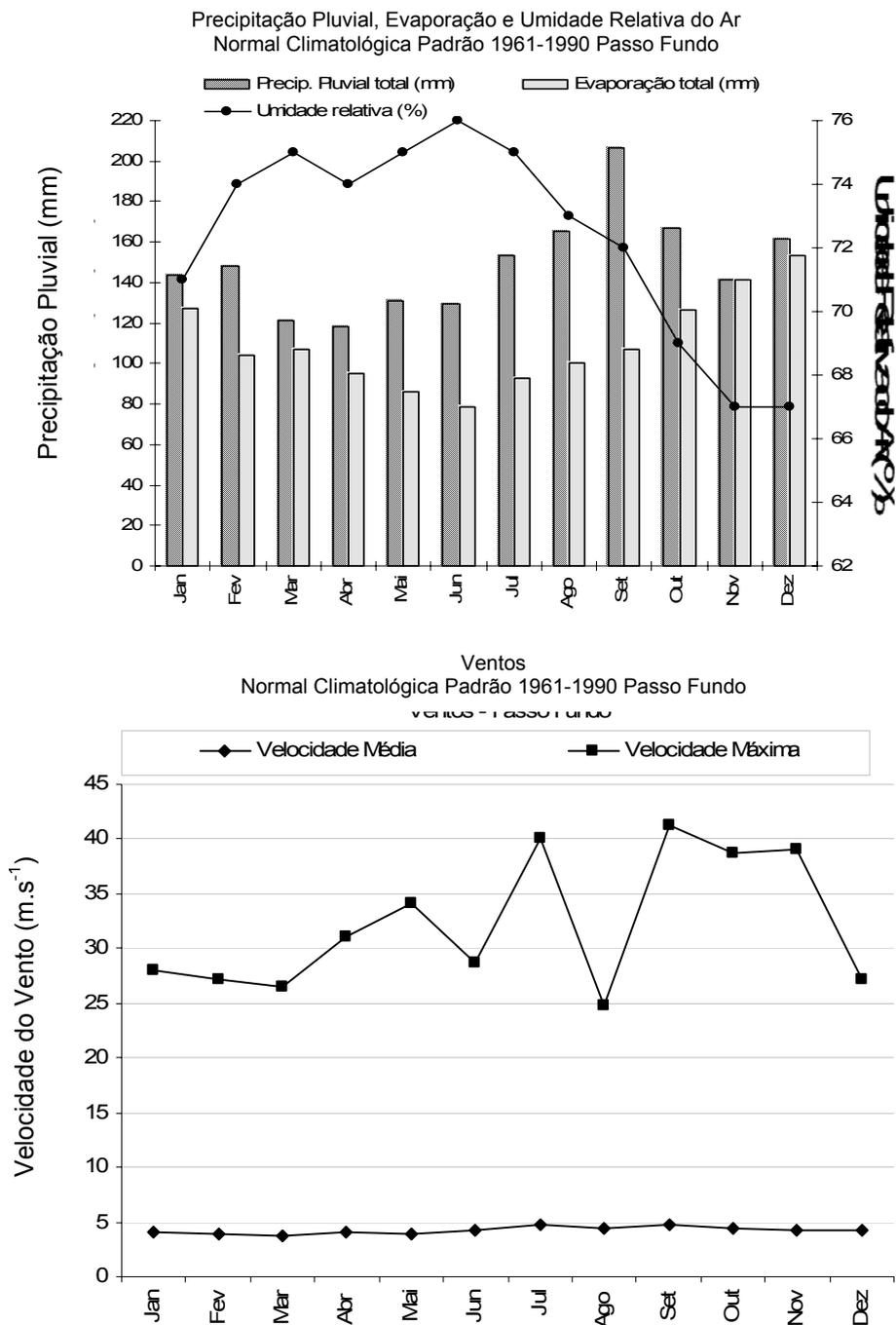


Figura 6. Normais Climatológicas (1961-1990) de precipitação pluvial, evaporação total, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Passo Fundo, RS. Fonte dos dados: Embrapa Trigo, 2007.

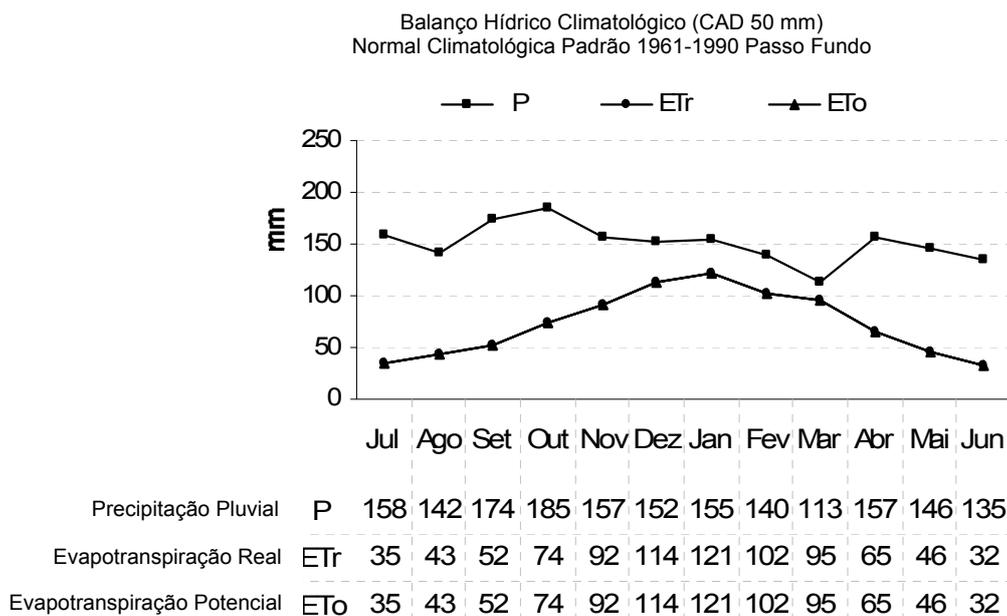


Figura 7. Balanço Hídrico Climatológico (CAD 50mm). Passo Fundo, RS.

Fonte dos dados: Embrapa Trigo, 2007.

A velocidade média do vento é de cerca de  $4 \text{ m.s}^{-1}$  e praticamente não sofre variações ao longo do ano (Figura 6). Rajadas de vento podem ser superiores a  $35 \text{ m.s}^{-1}$  em julho e nos meses de primavera. No Rio Grande do Sul, os fortes ventos da primavera podem causar acamamento, pois são coincidentes com o período de maior susceptibilidade da cultura (entre a emissão das inflorescências e estágio de grão em massa mole) (Mundstock, 1999).

A precipitação pluvial anual é de cerca de  $1787 \text{ mm}$  (Figura 6). O mês de setembro é o mais chuvoso. De acordo com o Balanço Hídrico Climatológico, assim como na maioria dos municípios da metade norte do Estado, não ocorre déficit hídrico na região de Passo Fundo (Figura 7). É importante salientar que o Balanço Hídrico Climatológico é calculado com

dados do período da Normal Climatológica, ou seja, representa a média do que ocorre na região.

### **3.1.3 Produção de trigo**

De acordo com dados do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA), disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2007), na média dos últimos sete anos (2000 a 2006), 64% da área cultivada da região de estudo foi ocupada por lavouras de trigo, ou seja, o trigo é a principal cultura estabelecida no período de inverno. A área ocupada com trigo cresceu até o ano de 2003, quando atingiu 80% da área cultivada total em detrimento, basicamente, de áreas cultivadas com cevada (Figura 8). A partir de 2003, o que se observa é uma diminuição da área de trigo, com ligeiro incremento de áreas de cevada e, especialmente na safra 2006, de áreas cultivadas com demais cereais de inverno (aveia, centeio e triticale).

O período indicado, para semeadura de trigo, é de 21 de maio a 30 de junho para a maioria dos treze municípios pertencentes à região de estudo. Para Ernestina, Nicolau Vergueiro, Passo Fundo, Tio Hugo e Victor Graeff é recomendada a semeadura de 1º de junho a 10 de julho (Reunião, 2006).

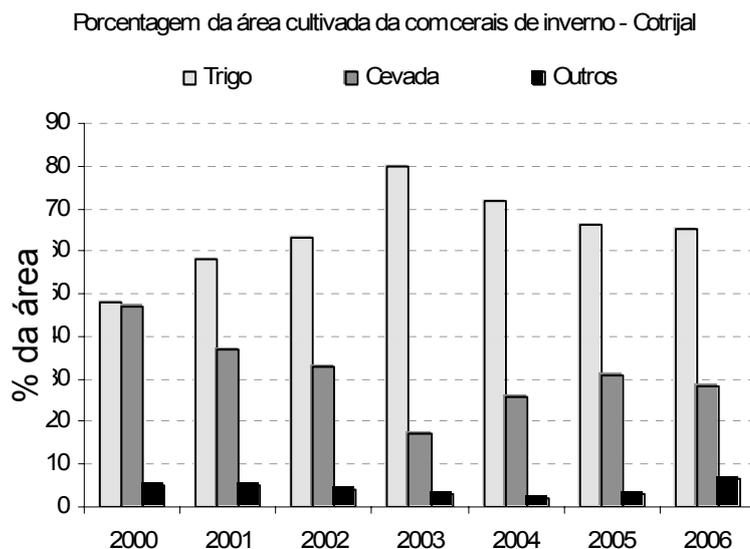


Figura 8. Porcentagem da área cultivada nos municípios pertencentes à área de abrangência da Cotrijal ocupada com cereais de inverno. Fonte: LSPA-IBGE, 2007.

De acordo com o Calendário de Acompanhamento de Lavouras de Trigo, elaborado pela EMATER (Associação Riograndense de Empreendimentos de Assistência Técnica e Extensão Rural) para Região de Passo Fundo (EMATER, 2006), na média das safras 2003 a 2006 (Figura 9), observa-se que o desenvolvimento vegetativo ocorre até setembro, mesmo período no qual se inicia o florescimento em cerca de 40% da área plantada. O florescimento ocorre basicamente, em setembro, o enchimento de grãos em outubro e a maturação fisiológica em novembro. Algumas lavouras (cerca de 47% da área) são colhidas já na primeira quinzena de novembro e o restante no final do referido mês. Este é um calendário médio, elaborado apenas com os dados referentes as três últimas safras agrícolas, porém, serve como indicativo de como se dá o desenvolvimento da planta de trigo na região de estudo, informação esta que auxilia na melhor compreensão

dos efeitos das variáveis meteorológicas ao longo do ciclo e, conseqüentemente, na definição do rendimento final de grãos.

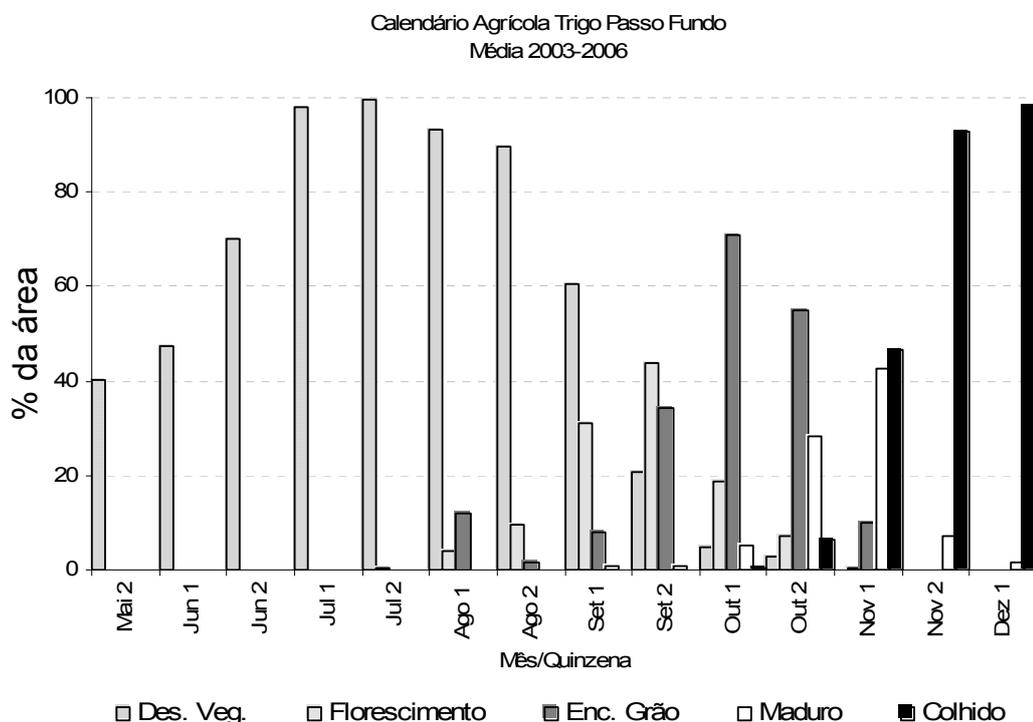


Figura 9. Porcentagem da área cultivada encontrada nos diferentes estádios de desenvolvimento, de acordo com o Calendário de Acompanhamento de Lavouras de Trigo da EMATER. Passo Fundo, RS. Fonte dos dados: EMATER (2007).

## 3.2 Dados

### 3.2.1 Dados de rendimento

Os dados de rendimento médio de trigo, para as safras agrícolas de 2000 a 2005, foram provenientes do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (IBGE, 2007). Os valores referentes à safra 2006 foram obtidos junto aos técnicos da COTRIJAL, visto que, no momento da realização das análises, o dado do IBGE ainda não estava disponibilizado.

### **3.2.2 Dados meteorológicos**

Os dados meteorológicos diários, para os anos de 1991 a 2006, foram obtidos da estação meteorológica localizada no município de Passo Fundo e pertencente à rede de estações do 8º Distrito do Instituto Nacional de Meteorologia - 8ºDISME/INMET.

### **3.2.3 Dados espectrais**

As imagens do sensor MODIS13, produto NDVI foram obtidas do banco de imagens do Projeto Geosafra, junto ao Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM-UFRGS). As imagens (combinações de 16 dias) utilizadas são referentes ao período que abrange o ciclo da cultura de trigo na área de estudo, ou seja, de maio a novembro, para os anos de 2000 a 2006.

### **3.2.4 Dados de campo**

O levantamento de dados a campo foi realizado pelos técnicos da COTRIJAL de abril a setembro de 2006 e visou, basicamente, a localização geográfica de lavouras de cereais de inverno. Foram coletados pontos de controle com uso de GPS (*Global Positioning System*) em lavouras de aveia, trigo e cevada.

## **3.3 Análises**

### **3.3.1 Dados de rendimento**

Para os dados de rendimento foi feito ajuste da função que descreve a tendência tecnológica de rendimentos de trigo para o Rio Grande do Sul,

para os 69 municípios pertencentes à Regional EMATER Passo Fundo (macroregião) e para os municípios da área da Cotrijal (microregião). A equação ajustada foi uma regressão linear simples:

$$Y_i = a + bx_i \quad (4)$$

Quando verificado incremento de rendimento, significativo ao nível de 5%, procedeu-se a retirada da tendência tecnológica, de acordo com regressão linear simples:

$$Y_{ci} = Y_i - bx_i \quad (5)$$

Onde:  $Y_{ci}$  é o rendimento médio de grãos corrigido do ano  $i$ ;  $Y_i$  é o rendimento médio de grãos original do ano  $i$ ; “ $b$ ” é o coeficiente de regressão linear e “ $i$ ” é o número do ano na série.

### 3.3.2 Dados meteorológicos

Foi estabelecida a correlação entre dados de rendimento e dados meteorológicos mensais. Os elementos meteorológicos originais (disponibilizados prontamente na estação meteorológica) e derivados (dados manipulados) avaliados foram:

a) Elementos meteorológicos originais: insolação (horas), precipitação pluvial (mm), número de dias com precipitação pluvial, umidade relativa do ar (%) e temperaturas do ar (°C): máxima, média e mínima (médias mensais), e temperatura do ar mínima absoluta mensal.

b) Elementos meteorológicos derivados:

-Número de dias com temperatura do ar mínima média inferior a 0°C.

-Graus-dia acumulados entre os seguintes sub-períodos: maio e novembro, maio e outubro e junho a outubro. Os graus-dia foram calculados com as temperaturas basais de 0°C e 4,5°C, de acordo com a equação:

$$GD = \sum_{i=1}^n (T_{med} - T_b) \quad (6)$$

Onde: GD é graus-dia, T<sub>med</sub> é a temperatura do ar média diária e T<sub>b</sub> é a temperatura basal e “n” é o número de dias do sub-período.

-Índice de dano por geada (IG): índice calculado com base na freqüência de ocorrência de faixas de temperaturas mínimas absolutas - T<sub>mín(abs)</sub>, ponderadas da seguinte maneira: T<sub>mín (abs)</sub> entre 2°C e 0 °C, peso 1; T<sub>mín (abs)</sub> entre 0 °C e -2 °C, peso 2; T<sub>mín (abs)</sub> abaixo de -2 °C, peso 3 (Cunha *et al*, 2005), de acordo com:

$$IG = 1(f_1) + 2(f_2) + 3(f_3) \quad (7)$$

Onde: f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub>, f<sub>3</sub> são as freqüências (%) de ocorrência de T<sub>mín (abs)</sub> nas faixas acima estabelecidas, respectivamente.

-Índice de dano por Precipitação Pluvial na colheita (IC): de acordo com Cunha *et al* (2005), este índice é calculado com base na freqüência de ocorrência das seguintes condições, nos meses de outubro e novembro: precipitação pluvial acumulada entre 75 e 150 mm e mais de dez dias com precipitação pluvial e/ou precipitação pluvial acumulada acima de 150 mm e mais de cinco dias com precipitação pluvial.

-Quociente Fototermal (Q): índice que relaciona a radiação solar global com a temperatura média do ar, de acordo com a equação:

$$Q = R_g / (T_{med} - 4,5) \quad (8)$$

Onde: Q é quociente fototermal diário ( $\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}\text{°C}^{-1}$ ),  $R_g$  é a radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ) e  $T_{\text{med}}$  é a temperatura média do ar diária ( $^{\circ}\text{C}$ ).

As correlações foram calculadas com uso do *software* computacional SPSS - *Statistical Package for the Sciences Socials*.

### 3.3.3 Dados espectrais

Foi estabelecida a correlação entre os dados de rendimento e os seguintes dados espectrais, obtidos através do processamento das imagens MODIS no *software* computacional Envi 4.2:

- NDVI médio mensal (maio a novembro);
- Soma do NDVI (maio a novembro);
- NDVI integrado (determinação da área sob a curva do NDVI entre os meses de maio a novembro e entre os meses de junho a outubro).

As análises foram feitas utilizando duas abordagens, regional e máscara de cultivo.

Na análise regional, a média do NDVI, ao longo do ciclo da cultura de trigo, foi utilizada para o traçado dos perfis temporais de NDVI e para o estabelecimento das correlações entre os dados de rendimento e os dados espectrais. É importante salientar que, em se tendo considerado, nessa primeira etapa, as imagens de toda a área de estudo, os perfis temporais resultantes contém informações do índice de vegetação NDVI, referentes a diferentes alvos imageados, tais como: corpos d'água, centros urbanos, matas, lavouras de cereais de inverno e campos.

Posteriormente, na análise com máscara de cultivo, o objetivo foi refinar as informações obtidas na primeira etapa do processamento, ou seja, de estabelecerem-se correlações entre o rendimento de trigo e o NDVI proveniente de áreas de lavouras. Para tanto, foi utilizada uma metodologia proposta por Fontana *et al* (2007), na qual foram elaboradas, para cada ano de estudo, imagens de máximo e mínimo NDVI, além de imagens diferença.

As composições de máximo NDVI foram elaboradas com as imagens dos meses de junho a setembro, período no qual ocorre, nos diferentes anos, o máximo acúmulo de biomassa pelas plantas e, conseqüentemente, são verificados os maiores valores de NDVI. As composições de mínimo foram elaboradas com as imagens de abril e maio, quando as lavouras estão em implantação ou no início do desenvolvimento vegetativo.

Para cada composição de máximo ou de mínimo, o software computacional analisa, *pixel a pixel*, as imagens NDVI dos meses indicados, no sentido de escolher, dentre elas, o maior (imagens de máximo) ou o menor (imagens de mínimo) valor, o qual é utilizado na construção de uma outra imagem, denominada assim, imagem de máximo ou imagem de mínimo.

A imagem diferença corresponde à subtração das duas imagens (mínimo e máximo). *Píxeis* que apresentam, nas imagens de máximo e de mínimo, valores muito semelhantes possuem, na imagem diferença, baixos valores. Por sua vez, *píxeis* com valores mais altos na imagem diferença correspondem àqueles nos quais houve maior modificação no valor do NDVI.

A elaboração da imagem diferença visa identificar as áreas nas quais ocorreram as maiores variações temporais do NDVI, pois estas áreas correspondem, possivelmente, a lavouras de cereais de inverno. Por sua vez, os demais alvos, tais como corpos d'água, áreas urbanas e matas, não sofrem grandes alterações do valor do NDVI ao longo do período (no caso, de maio a setembro).

Nas imagens diferença foram testados limiares para elaboração da máscara de cultivo. Os limiares correspondem a valores de corte para inclusão ou exclusão de um determinado *pixel* na máscara de cultivo. Os *pixels* com valores de NDVI maiores que o limiar, são considerados pertencentes à máscara de cultivo (porque correspondem as maiores diferenças). O critério, para definição do limiar adequado, foi a geração de uma máscara de cultivo com área igual ou superior à área com cereais de inverno, na região de estudo, de acordo com dados oficiais (Tabela 4).

Tabela 4. Área ocupada com cereais de inverno. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

Ano	Área cultivada (ha)					Total
	Aveia	Centeio	Cevada	Trigo	Triticale	
2000	2.980	40	30.900	31.700	0	65.620
2001	3.200	165	25.280	39.134	0	67.779
2002	2.550	0	24.110	46.750	0	73.410
2003	2.500	0	14.150	67.350	0	84.000
2004	2.100	100	22.062	62.250	0	86.512
2005	2.200	130	22.500	47.480	0	72.310
2006	2.480	150	12.260	28.005	80	42.975

### 3.3.4 Dados de campo

Os pontos de controle, coletados a campo, foram utilizados para localização dos *pixels* correspondentes as lavouras de aveia, trigo e cevada, e posterior extração dos valores para a confecção de perfis temporais de NDVI. O objetivo foi, através de uma análise localizada, definir o comportamento típico do índice espectral ao longo do ano de 2006 (abril a setembro) e verificar as semelhanças e diferenças espectrais das lavouras de cereais de inverno.

### 3.4 Escolha dos indicadores e ajuste do modelo

A escolha dos indicadores teve como base os resultados da análise de correlação, entre elementos agrometeorológicos e NDVI, com o rendimento de trigo dos municípios pertencentes à Cotrijal. Entretanto, somente foram empregados aqueles elementos agrometeorológicos que,

sabidamente, influenciam o desenvolvimento das plantas e a definição do rendimento final, de acordo com a revisão bibliográfica.

A partir da definição dos indicadores foi ajustada uma equação linear para estimativa do rendimento, sendo o rendimento de trigo a variável dependente ( $y$ ) e os indicadores agrometeorológicos e espectral as variáveis independentes do modelo.

Para definição do modelo adequado foram testados os indicadores agrometeorológicos expressos em valores reais e, também, expressos na forma de funções exponenciais. Para o ajuste das funções foi utilizada uma série de dados de dezesseis anos (1991 a 2006). O objetivo deste ajuste foi evitar que resultados aleatórios fossem obtidos, fruto da pequena extensão da série de dados espectrais (imagens MODIS) disponível, que foi de somente sete anos.

A escolha de funções exponenciais baseia-se no fato de que, de modo geral, o incremento ou decréscimo dos indicadores reflete, respectivamente, em aumento ou diminuição do rendimento, porém, de maneira não linear: é atingido um patamar, a partir do qual alterações do indicador não se traduzem em equivalentes alterações no rendimento.

Os modelos foram avaliados de acordo com: estimativas do modelo e diferenças entre as estimativas e os rendimentos oficiais; resultados estatísticos ( $R^2$ ,  $R^2$  ajustado e erro padrão) e análise de trilha.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Tendência temporal dos rendimentos de grãos

#### 4.1.1 Rio Grande do Sul

O rendimento médio de grãos de trigo, no Estado, para o período de 1990 a 2005, foi  $1.570 \text{ kg.ha}^{-1}$ , valor inferior ao rendimento médio de grãos do Brasil ( $1667 \text{ kg.ha}^{-1}$ ), da Região Sul ( $1664 \text{ kg.ha}^{-1}$ ) e do Paraná ( $1765 \text{ kg.ha}^{-1}$ ), no mesmo período.

Foi verificada a existência de tendência tecnológica na série analisada, com um incremento de  $35 \text{ kg.ha}^{-1}$  a cada ano. A evolução temporal do rendimento de grãos, Rio Grande do Sul, de 1990 a 2006 (sendo o dado de 2006 não oficial), com e sem retirada de tendência tecnológica, consta na Figura 10. A análise de tendência temporal foi realizada a fim de verificar a existência de incremento nos rendimentos de grãos em virtude da incorporação de novas técnicas de manejo, adubação, cultivares, ou outra tecnologia que vise promover o aumento do rendimento de grãos das lavouras de trigo (tendência tecnológica).

Cunha *et al.* (1999b) também verificaram a existência de tendência tecnológica na série de rendimentos de trigo (1920 a 1997) para o Estado do Rio Grande do Sul. Além disso, estas tendências também foram verificadas

nas culturas do arroz (Carmona & Berlato, 2002) e cevada (Cunha *et al.*, 2001).

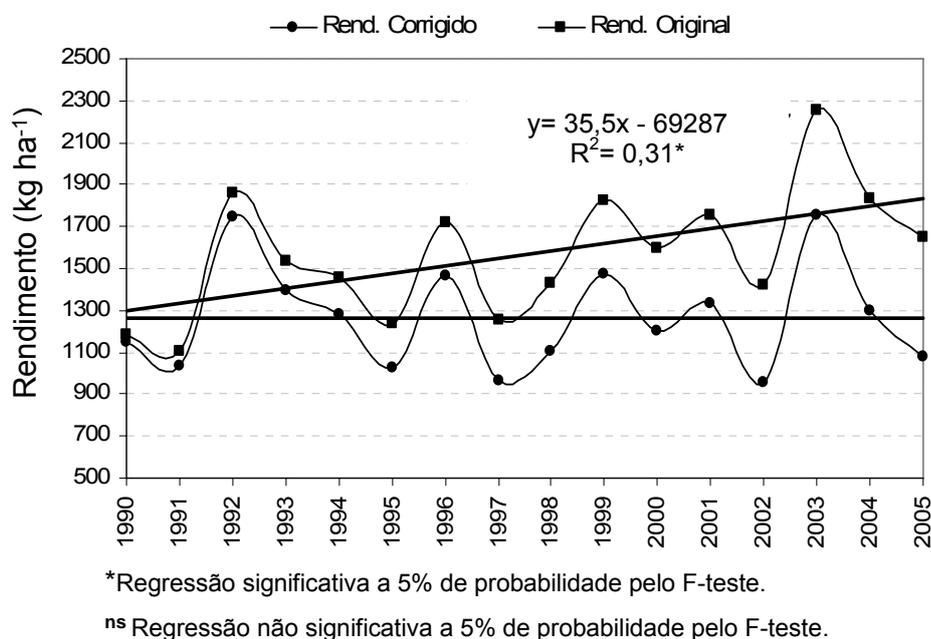


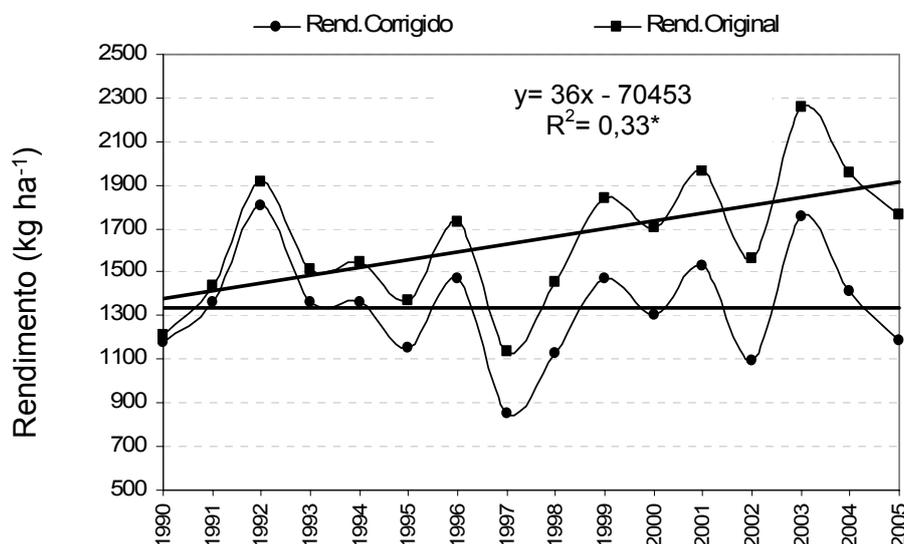
Figura 10. Rendimento de grãos de trigo (kg.ha<sup>-1</sup>) do Rio Grande do Sul. Fonte dos dados: Embrapa Trigo (2007).

#### 4.1.2 Regional EMATER Passo Fundo

O rendimento médio de grãos, na Regional EMATER Passo Fundo, foi de 1.650 kg.ha<sup>-1</sup>, para o período de 1990 a 2005. Foi verificada a existência de tendência tecnológica e incremento de 36 kg.ha<sup>-1</sup> a cada ano (Figura 11). Os resultados foram semelhantes aos verificados na tendência temporal de rendimentos do Rio Grande do Sul, de maneira que essa macroregião pode ser considerada representativa do Estado, no que se refere ao incremento anual de rendimento de grãos no período analisado.

Após a retirada da tendência tecnológica, tanto para o Rio Grande do Sul, quanto para a Regional EMATER Passo Fundo, a variabilidade dos

rendimentos de grãos, ao longo dos anos analisados, pode ser considerada conseqüente da influência dos elementos meteorológicos na agricultura.



\*Regressão significativa a 5% de probabilidade pelo F-teste.

<sup>ns</sup> Regressão não significativa a 5% de probabilidade pelo F-teste.

Figura 11. Rendimento de grãos de trigo (kg.ha<sup>-1</sup>) da Regional EMATER Passo Fundo. Fonte dos dados: LSPA-IBGE (2007).

#### 4.1.3 Cotrijal

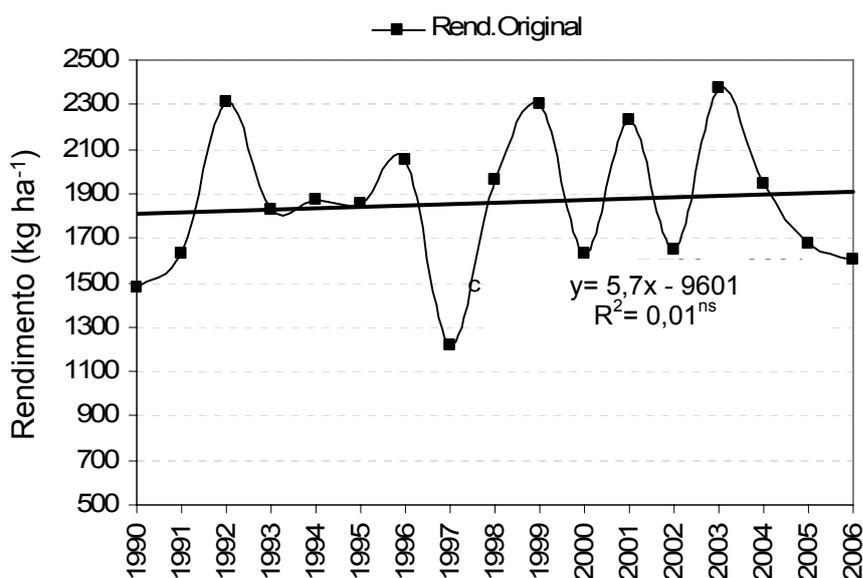
Os municípios pertencentes a Cotrijal tiveram, no período de 1990 a 2006, rendimento médio de grãos de 1.860 kg.ha<sup>-1</sup>, valor superior a média do Estado e da Regional EMATER Passo Fundo. Nestes municípios, não foi verificado incremento significativo no rendimento de grãos, em função da incorporação de novas tecnologias, ou seja, não foi verificada tendência tecnológica (Figura 12).

A não existência de tendência tecnológica e os maiores rendimentos médios de grãos, comparativamente ao que é verificado no Estado, decorrem, provavelmente, de tecnologias de cultivo adequadamente

implantadas na região da Cotrijal. Este fato pode estar associado à existência, na região, de instituições de pesquisa difusoras de novas tecnologias e de cooperativas responsáveis pela adequada implementação destas novas tecnologias junto ao produtor rural.

No Estado, por sua vez, existem várias regiões de menor importância tritícola, onde o processo de implementação de novas tecnologias ainda está em andamento e os rendimentos não estão consolidados.

Dada a não existência de tendência tecnológica, os dados utilizados na elaboração do modelo de estimativa de rendimento de grãos para a região da Cotrijal não foram corrigidos, ou seja, foram utilizados os valores originais.



\*Regressão significativa a 5% de probabilidade pelo F-teste.

<sup>ns</sup> Regressão não significativa a 5% de probabilidade pelo F-teste.

Figura 12. Rendimento de grãos de trigo ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) da região de abrangência da Cotrijal. Fonte dos dados: LSPA-IBGE (2007).

#### 4.2 Perfis temporais de NDVI: lavouras de cereais de inverno

Os perfis de NDVI, das lavouras de cereais de inverno (Figura 13), mostram que os valores mínimo e máximo do índice espectral ocorreram, respectivamente, em abril (período anterior à semeadura) e na primeira quinzena de julho, no ano de 2006. Os cereais de inverno apresentaram valor máximo de NDVI, ainda em fase vegetativa, indicando rápido desenvolvimento inicial e acúmulo de biomassa no referido ano. Dados de Epiphanyo (1996) mostram que, no início do desenvolvimento, o trigo tem rápida produção de biomassa e de área foliar, com valores de NDVI crescente até o fim do alongamento, quando estabilizam em torno de 0,9. Os valores decrescem a partir da maturação fisiológica.

No ano de 2006, o NDVI foi crescente até a primeira quinzena do mês de julho. Teoricamente, atingido o máximo NDVI, os valores estabilizariam

em um patamar, até o final de outubro, quando decresceriam em função da maturação fisiológica. Porém, no ano de 2006, foi observada uma queda do índice no início do mês de setembro em virtude das baixas temperaturas e geadas ocorridas, na região, no final de agosto e início de setembro (ver Apêndice 1).

O comportamento do NDVI, ao longo do tempo, foi semelhante para as três culturas analisadas, fato este que confirma a semelhança que os cereais de inverno trigo, cevada e aveia apresentam, tanto em termos morfológicos quanto de estrutura de dossel. Tal semelhança, observada a campo e em imagens de satélite, e comprovada pelo perfil de NDVI, torna estas culturas de difícil separação espectral e quantificação individual. Por isso, no presente estudo, as culturas foram analisadas conjuntamente (máscara de cultivo).

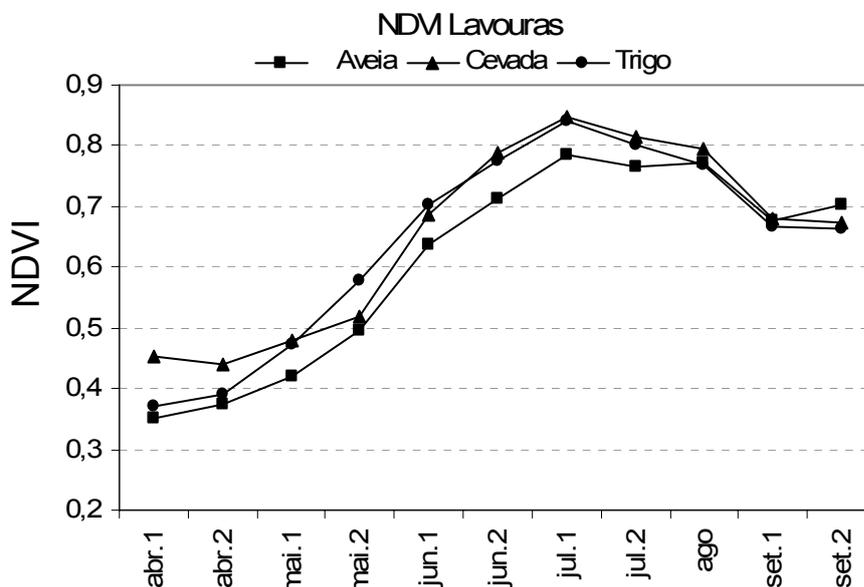


Figura 13. Perfis temporais de NDVI de lavouras de cereais de inverno. Região de abrangência da Cotrijal, 2006.

### **4.3 Máscara de cultivo**

As imagens de mínimo e máximo NDVI podem ser visualizadas nas Figuras 14 e 15, respectivamente. Nas imagens de mínimo, os valores de NDVI situaram-se, na maior parte da área, entre 0,25 e 0,65 (tons amarelados e alaranjados). Os baixos valores decorrem das poucas lavouras existentes na região, nos meses de abril e maio, visto que as lavouras de verão já foram colhidas e as de cereais de inverno estão sendo implementadas. Mesmo nas imagens de mínimo ocorreram áreas com valores de NDVI acima de 0,65 (tons esverdeados), as quais correspondem às matas. Nas imagens de máximo NDVI, os valores foram acima de 0,65, na maior parte da área indicando que, do período de abril-maio, até junho-setembro, houve o desenvolvimento da vegetação, com conseqüente acúmulo de biomassa e maiores valores de NDVI. Nas imagens de máximo, as áreas urbanas, com baixos valores de NDVI, foram salientadas.

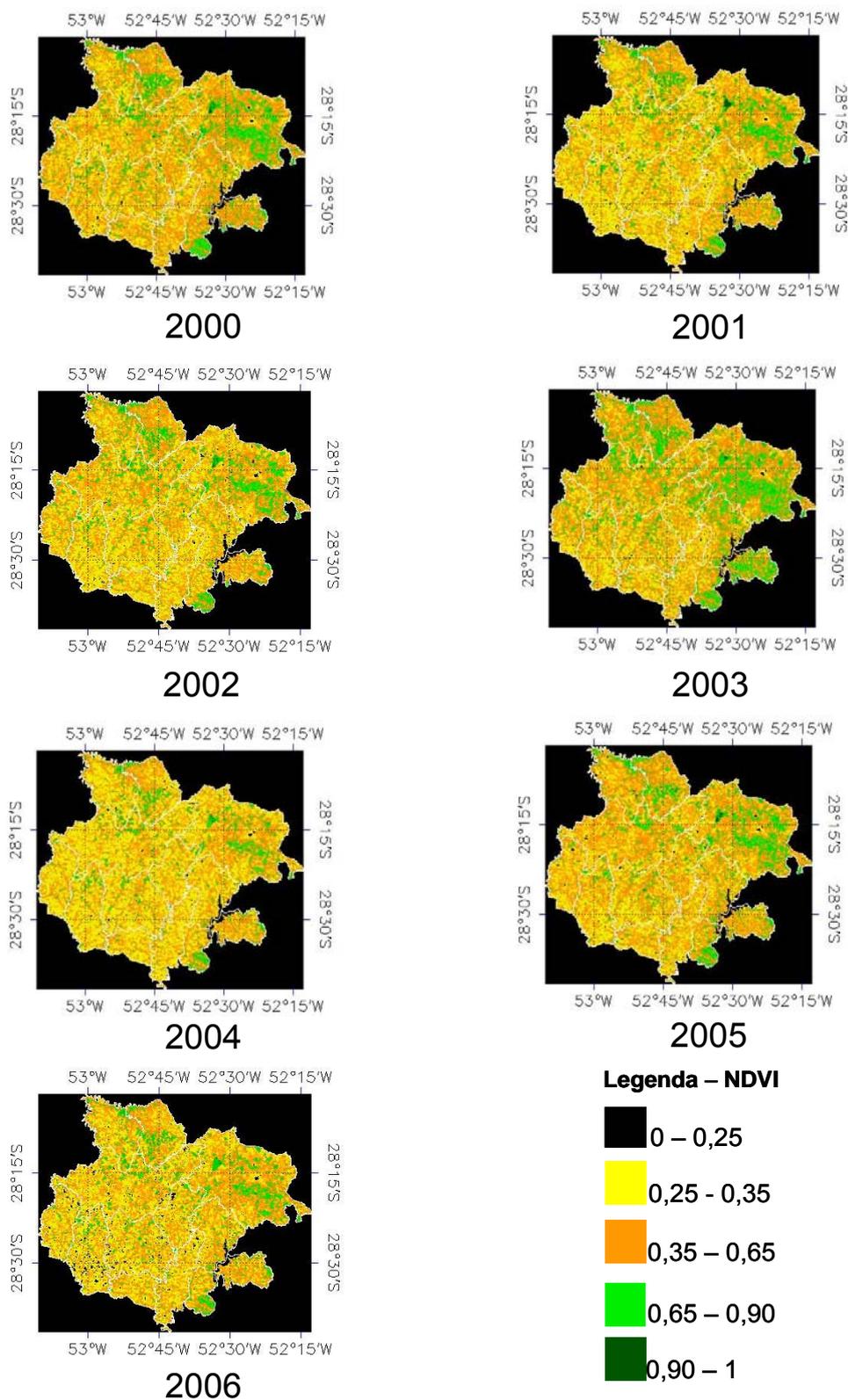


Figura 14. Imagens de mínimo NDVI (abril a maio) para os anos de 2000 a 2006. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

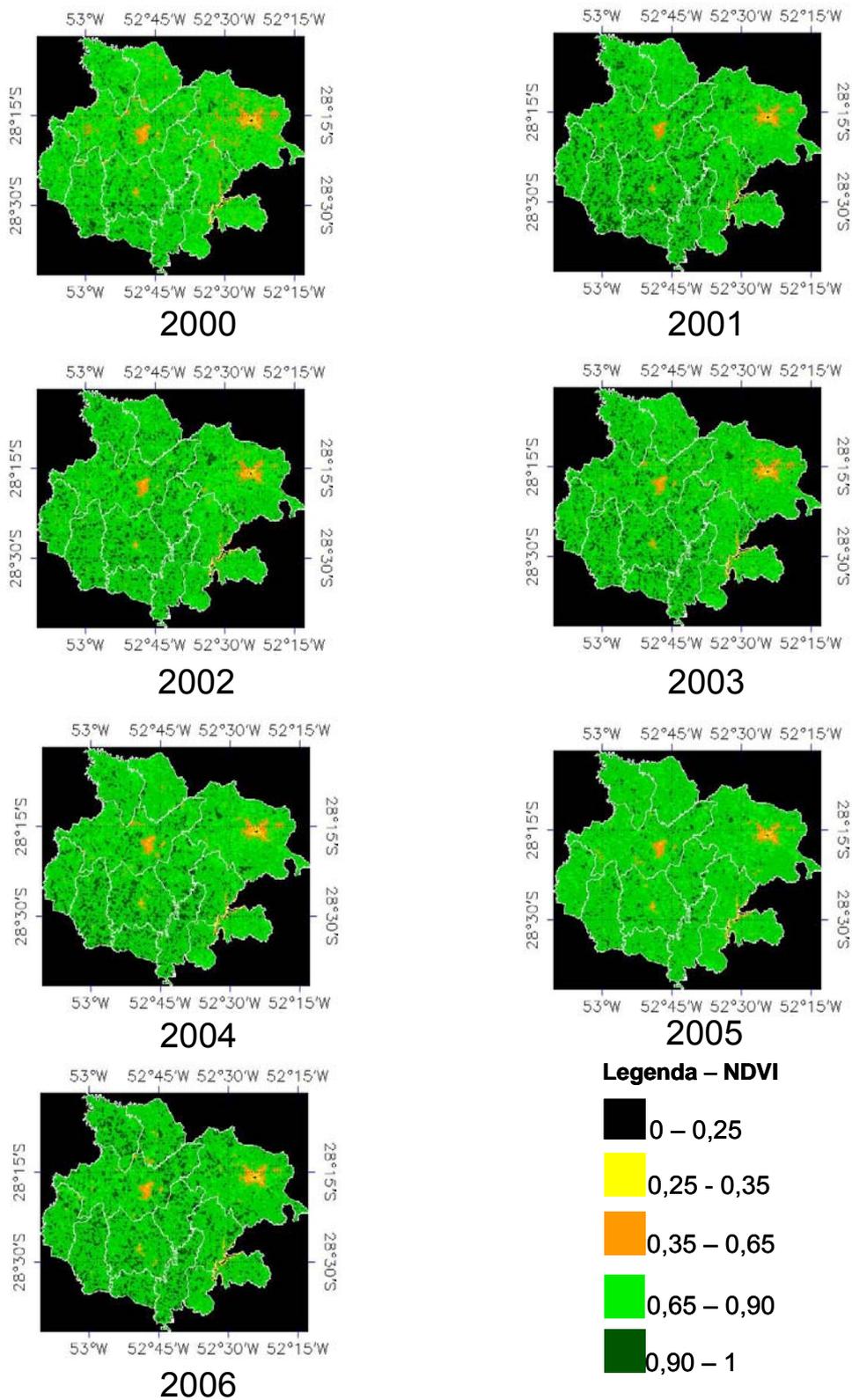


Figura 15. Imagens de máximo NDVI (junho a setembro) para os anos de 2000 a 2006. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

A partir das imagens, de mínimo e máximo, foram elaboradas as imagens diferença, sobre as quais foram aplicados os limiares. Os valores dos limiares e da área estimada por eles (máscara de cultivo) constam na Tabela 5, onde os valores em negrito representam, para cada ano, o limiar escolhido.

Nas Figuras 16 a 21 podem ser visualizadas as imagens diferença sem e com a máscara de cultivo.

Tabela 5. Área estimada pelos limiares (máscara de cultivos) e área oficial (IBGE) ocupada com cereais de inverno. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

Ano	Limiar e Área (ha)						
	IBGE	0,50	0,51	0,52	0,53	0,54	0,59
2000	65.620	83.098	75.045	<b>67.035</b>	59.438	-	-
2001	67.779	89.139	80.114	<b>71.114</b>	62.465	-	-
2002	73.410	114.964	105.552	96.103	86.438	<b>77.420</b>	-
2003	84.000	112.577	103.189	93.747	<b>84.882</b>	75.525	-
2004	86.512	136.606	126.345	115.801	105.423	<b>95.112</b>	-
2005	72.310	<b>76.638</b>	69.484	62.901	56.042	-	-
2006	42.975	124.401	115.167	105.872	96.539	87.767	<b>46.562</b>

Estudos anteriores, como os realizados por Fontana et al.. (2007) para trigo, e Kreling (2007) para arroz, mostraram a existência de um valor de limiar estável, através dos anos, para a cultura em estudo. O fato de não ter sido encontrado um limiar único no presente trabalho, adequado a todos os anos de estudo, pode ser decorrente da inclusão de áreas de pastagens de inverno (aveia-preta e azevém) na máscara de cultivos, como consequência da semelhança espectral destas pastagens com lavouras de cereais de inverno.

Esta hipótese está baseada nos dados de área cultivada em 2006, ano em que o limiar é o mais divergente dos demais. Em 2006, a área cultivada com cereais de inverno na região da Cotrijal foi a menor dos anos estudados e, comparativamente a de 2005, cerca de 29.000 hectares inferior. Supondo a ocupação desta área com pastagens de inverno, a mesma foi incluída na máscara de cultivo em função da semelhança espectral.

De acordo com a Associação dos Produtores de Sementes do Rio Grande do Sul – APASSUL, foram semeados, em 2006, 3.057.080 hectares de aveia-preta no Estado, cerca de 81.880 hectares a mais do que em 2005, fato este que pode ajudar a explicar a ocupação de áreas, tradicionalmente destinadas às lavouras de cereais, com pastagens de inverno, em 2006. Além disso, em uma análise visual das Figuras 16 a 21 percebe-se que, no ano de 2006, à exceção dos demais, a máscara de cultivo (áreas em vermelho) não sobrepôs muitas das áreas onde ocorreram mudanças nos valores de NDVI ao longo dos meses (áreas em verde). Dessa maneira, muitas destas áreas não sobrepostas podem ser pastagens e, para que se obtivesse uma área próxima à área oficial, o limiar do ano de 2006 foi aumentado e, por isso, difere bastante dos demais.

Sendo assim, a metodologia empregada neste trabalho, pode ser considerada válida no sentido de que são inseridas na máscara apenas as áreas da imagem que sofreram as maiores modificações ao longo do período (abril a novembro), sendo excluídas as áreas urbanas ou de mata. Além disso, esta metodologia é de baixo custo, tendo em vista que as imagens MODIS são disponibilizadas gratuitamente aos usuários, de simples

execução e de fácil implementação em rotinas de processamento de imagens. Os resultados obtidos indicam, porém, que são necessários estudos que envolvam técnicas mais robustas, quer seja para o aprimoramento desta metodologia, ou para a elaboração de novas metodologias, para que se obtenha uma máscara de cultivo específica e aplicável para trigo.

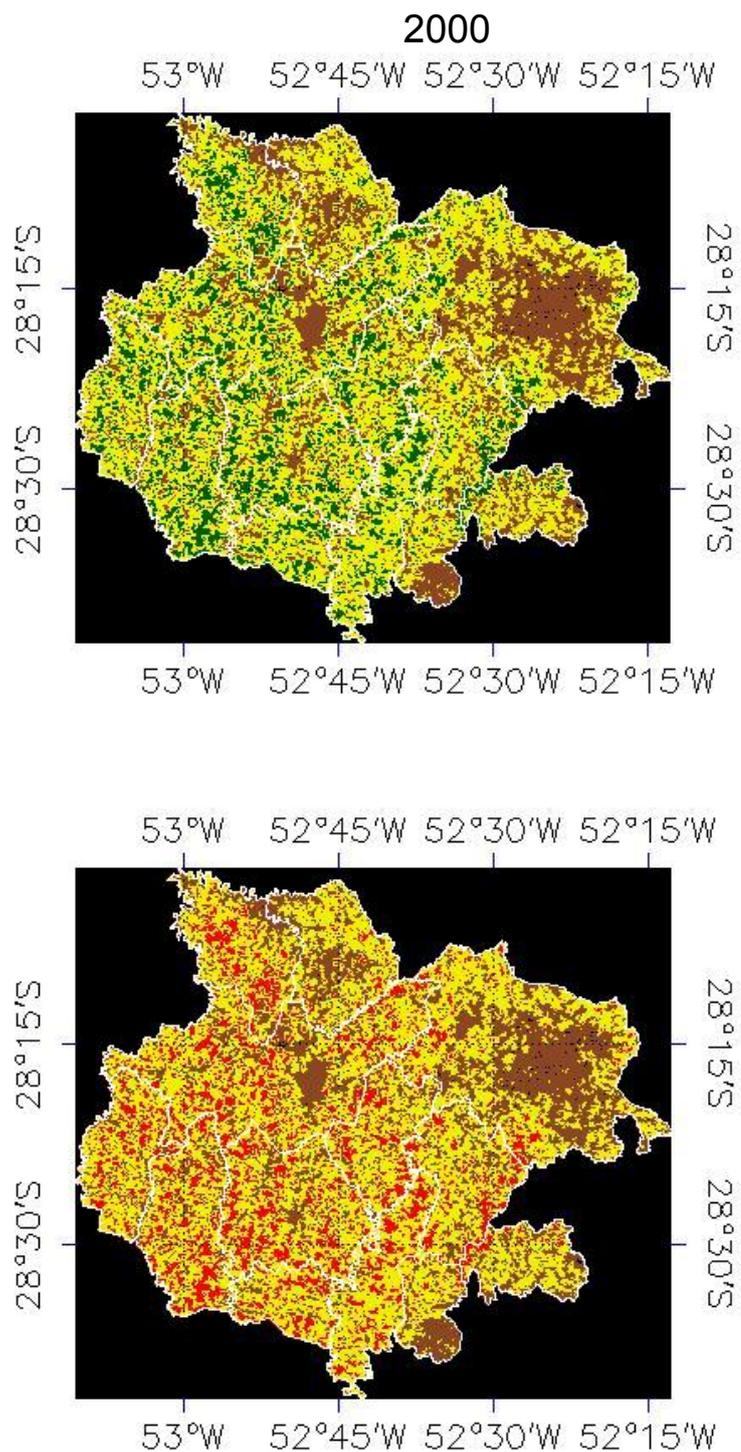


Figura 16. Imagens NDVI de diferença sem e com aplicação do limiar, para o ano 2000. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

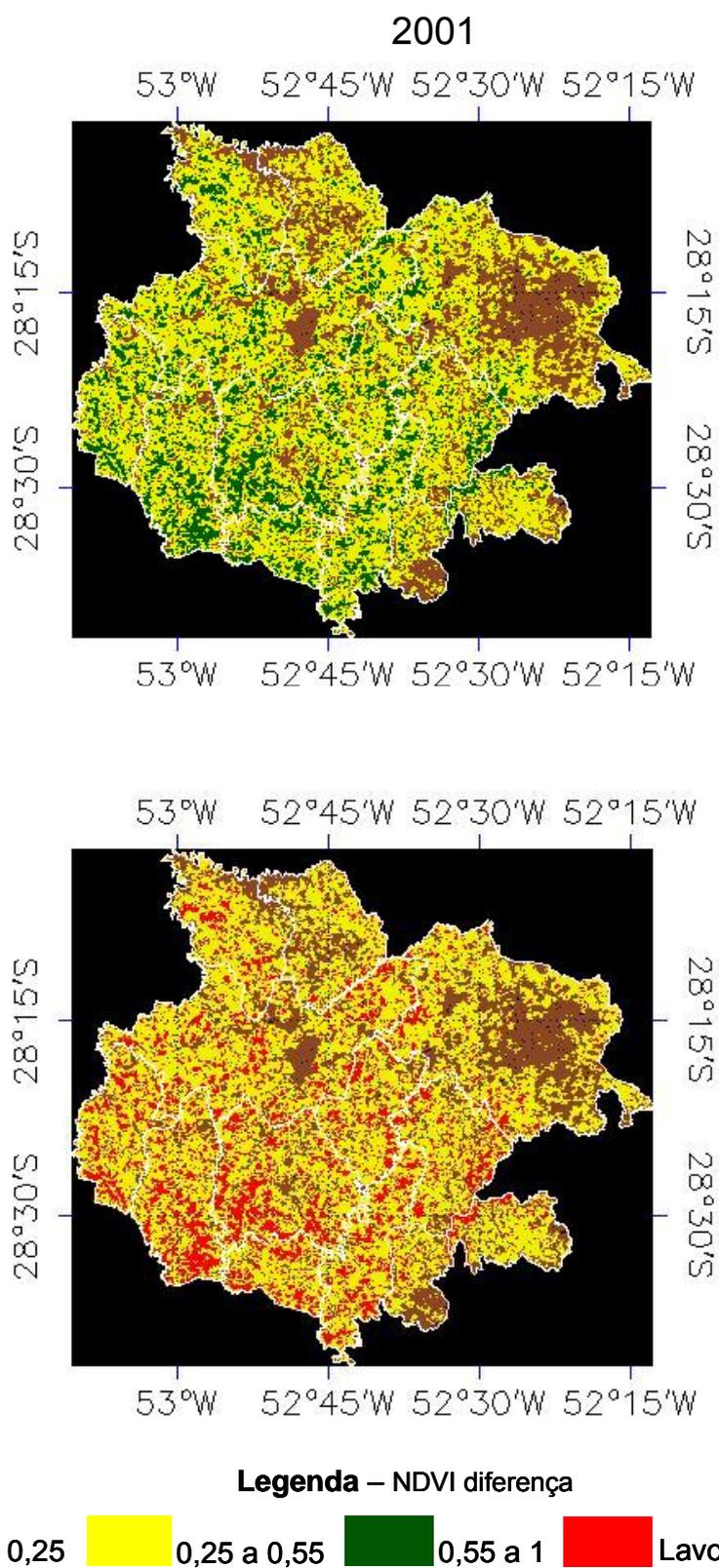


Figura 17. Imagens NDVI de diferença sem e com aplicação do limiar, para o ano 2001. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

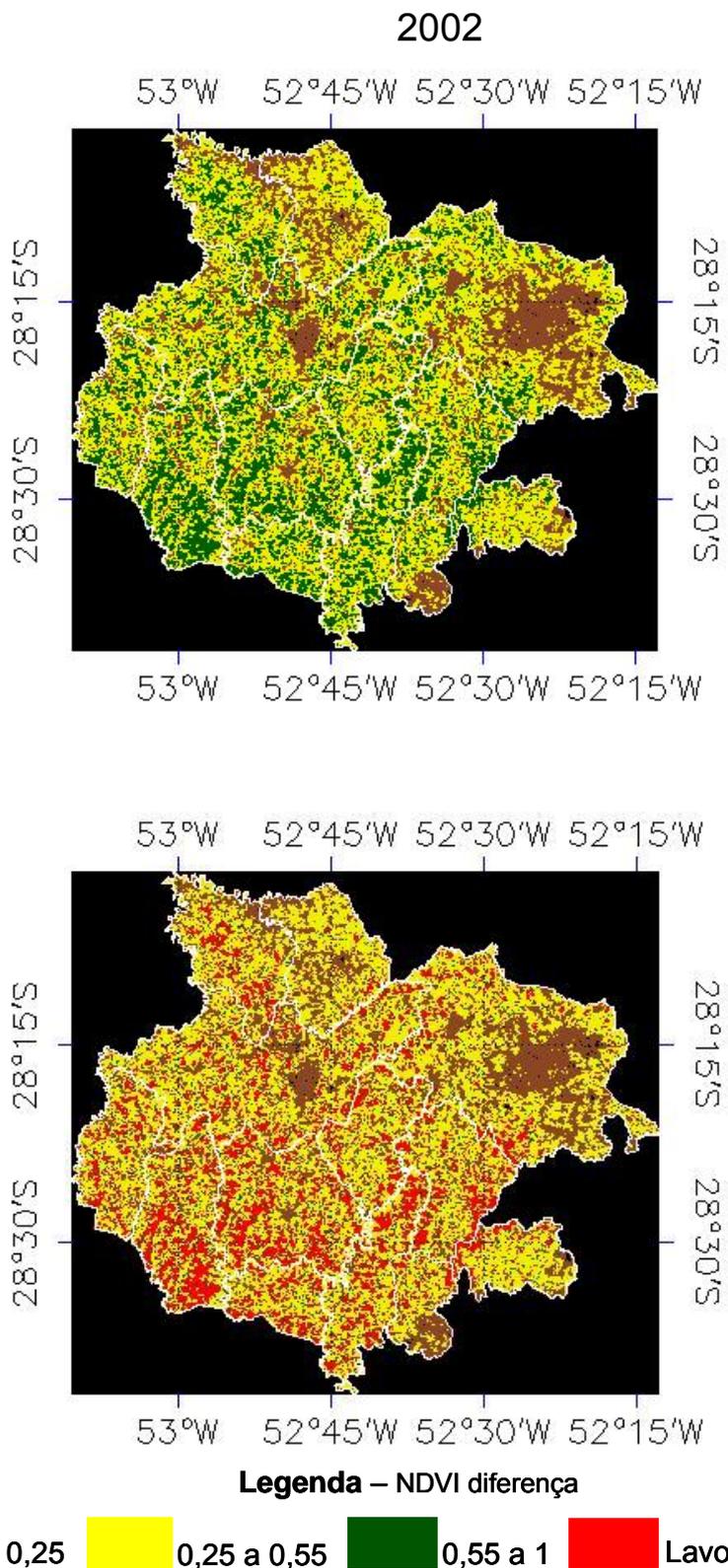


Figura 18. Imagens NDVI de diferença sem e com aplicação do limiar, para o ano 2002. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

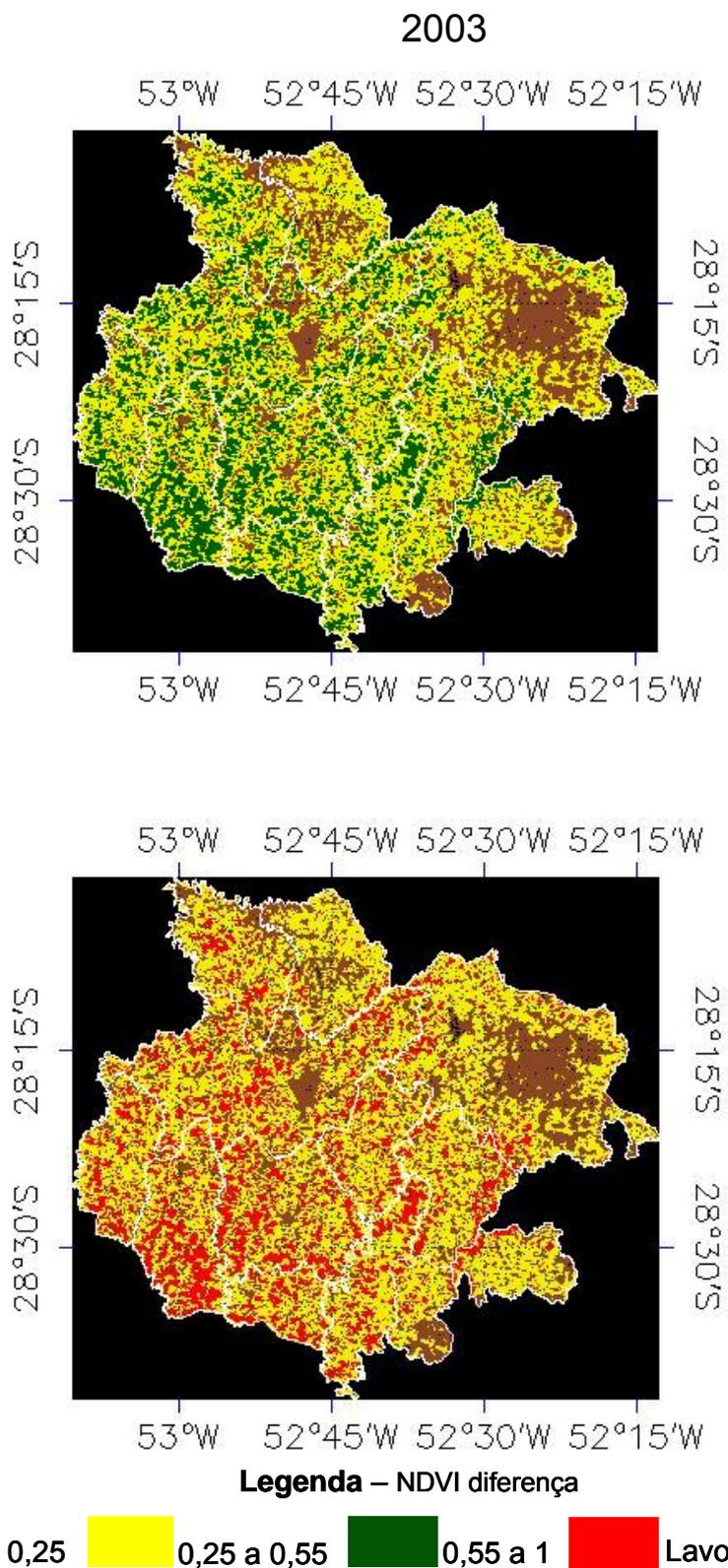


Figura 19. Imagens NDVI de diferença sem e com aplicação do limiar, para o ano 2003. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

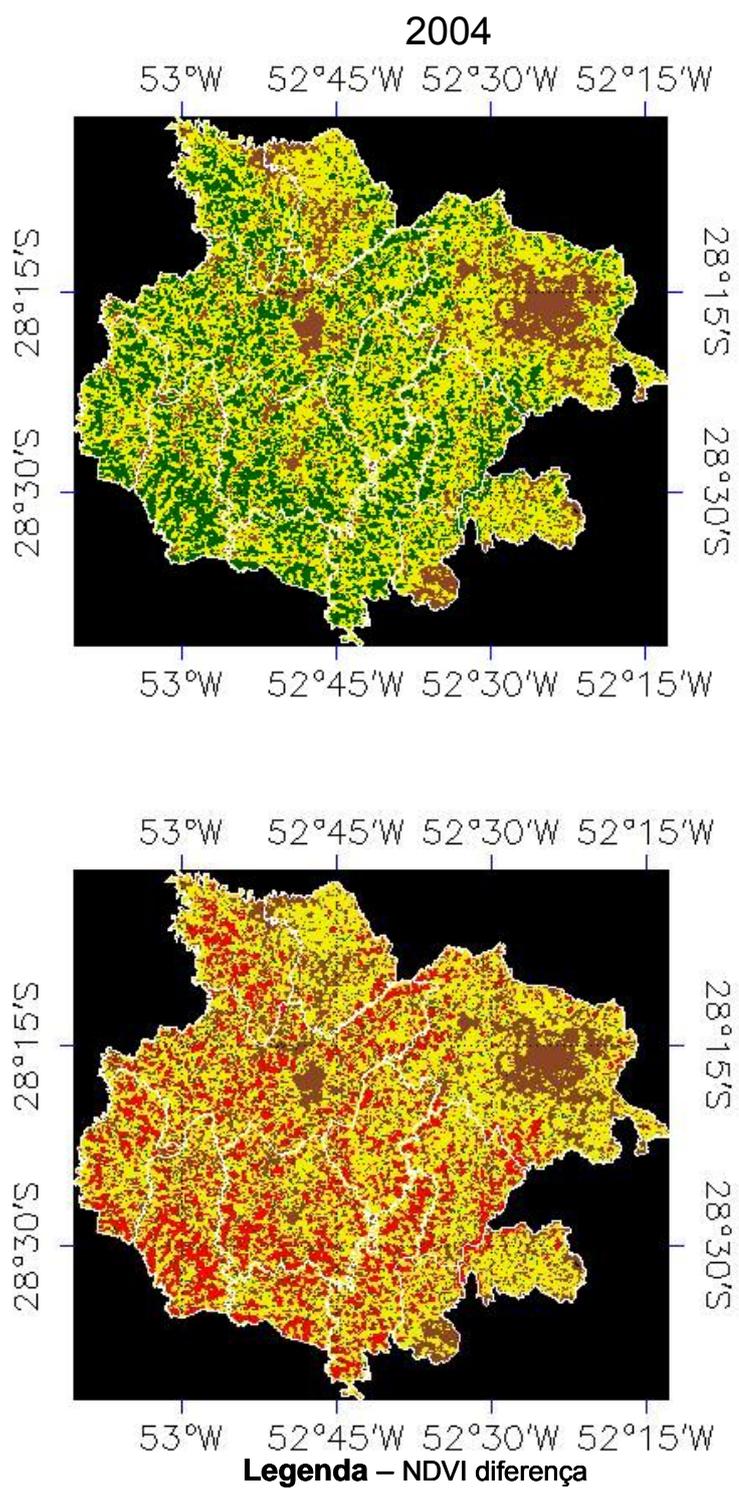


Figura 20. Imagens NDVI de diferença sem e com aplicação do limiar, para o ano 2004. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

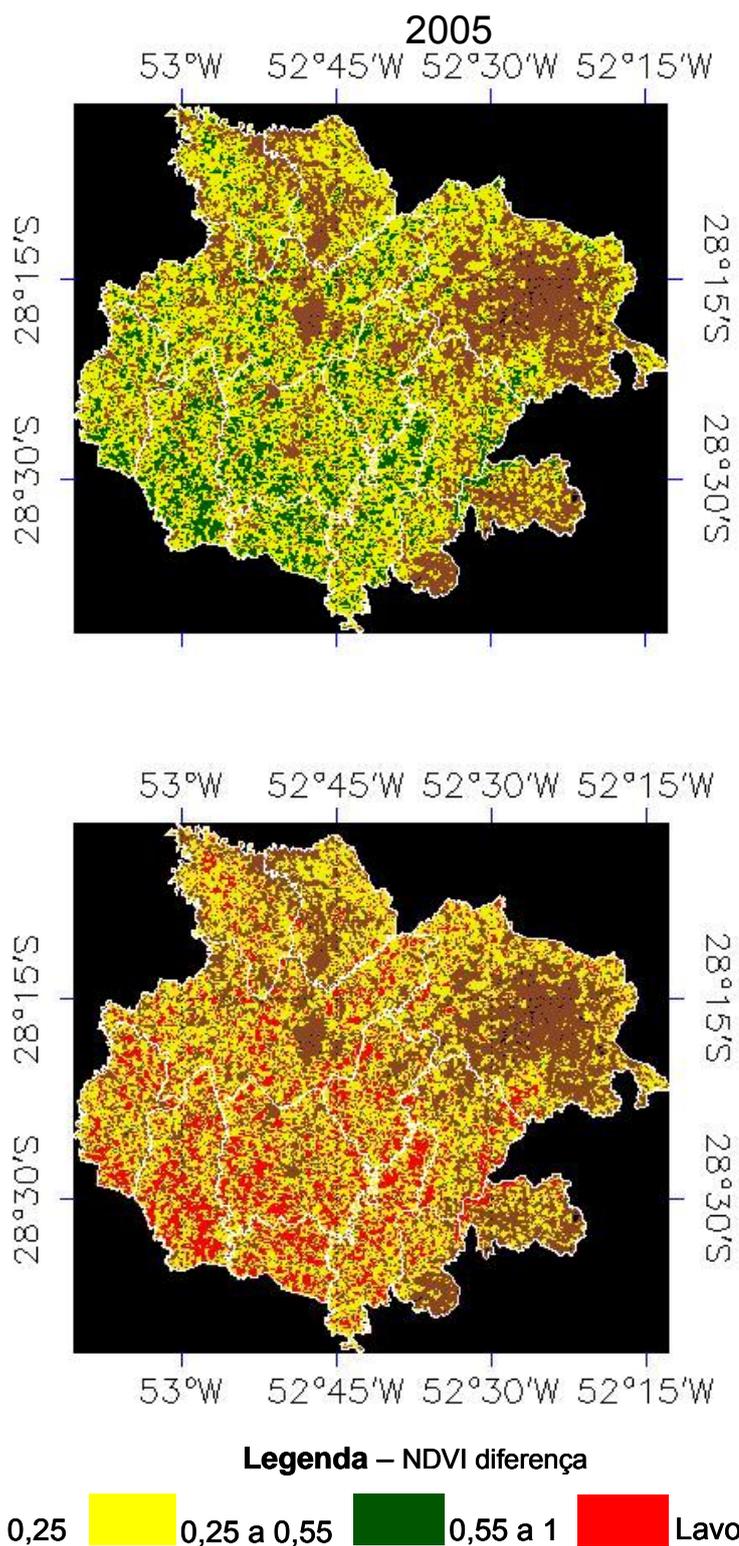


Figura 21. Imagens NDVI de diferença sem e com aplicação do limiar, para o ano 2005. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

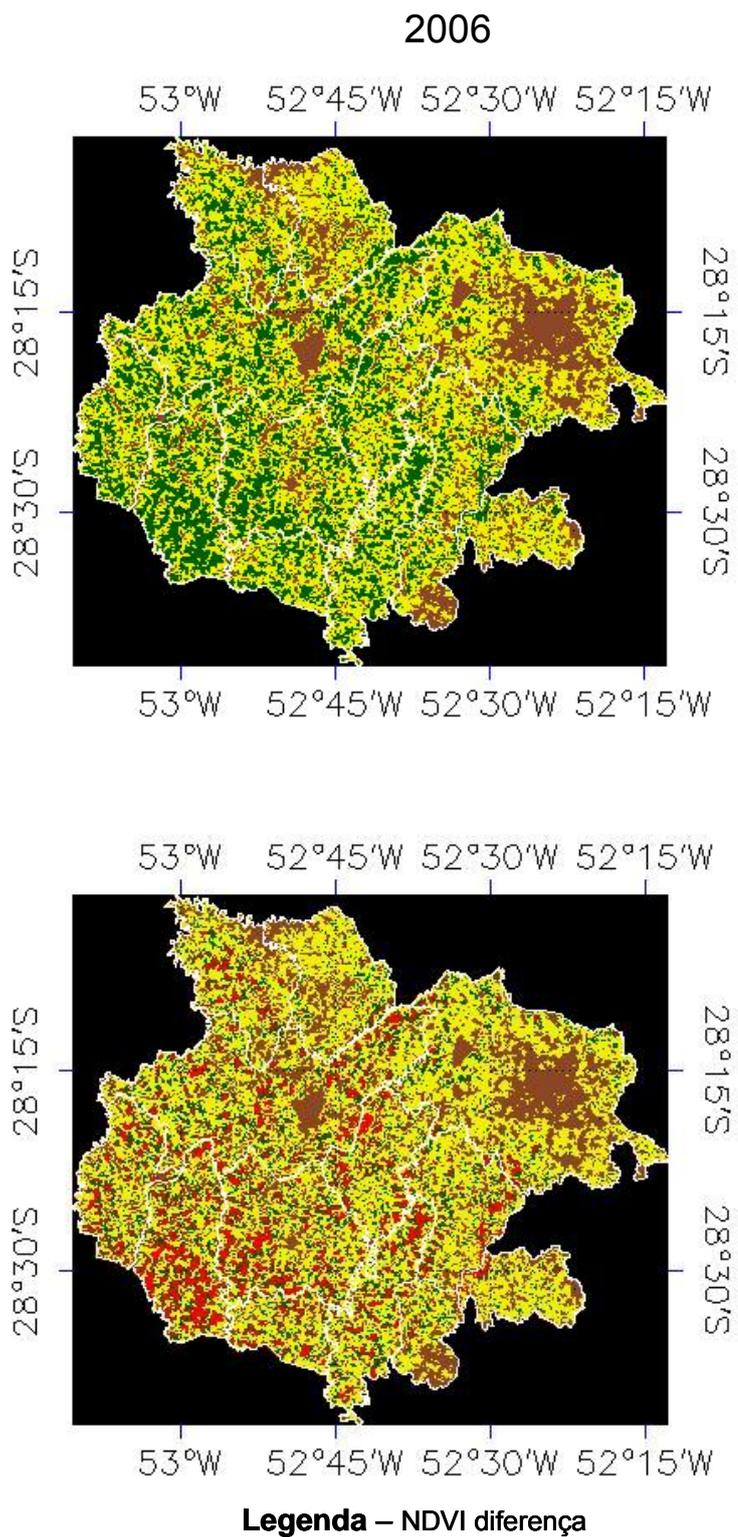


Figura 22. Imagens NDVI de diferença sem e com aplicação do limiar, para o ano 2006. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

#### **4.4 Perfis temporais de NDVI: regional e máscara de cultivo**

Os perfis temporais obtidos a partir de imagens NDVI, com e sem a aplicação da máscara de cultivo (NDVI regional e NDVI máscara de cultivo, respectivamente) podem ser visualizados nas Figuras 23 a 25.

Os perfis temporais de NDVI regional apresentaram, em geral, valores sempre superiores aos observados nos perfis temporais referentes à máscara de cultivo. Tal resultado já era esperado em função de estarem incluídas, nos perfis de NDVI regional, informações referentes não somente às lavouras, mas também às matas, corpos d'água e áreas urbanas.

O emprego da máscara de cultivo, por sua vez, gerou perfis de NDVI com comportamento típico de lavouras e muito semelhante ao das lavouras de cereais de inverno apresentado na Figura 13, ou seja: valores de NDVI menores no início do ciclo, crescentes ao longo do desenvolvimento das plantas com posterior estabilização (máximo acúmulo de biomassa) e decrescentes a partir da maturação fisiológica.

Sendo assim, comprovou-se que a metodologia de extração dos dados espectrais, via geração da máscara de cultivo, foi válida, pois permitiu que somente informações referentes a áreas de lavouras fossem empregadas nos perfis temporais de NDVI da região de estudo.

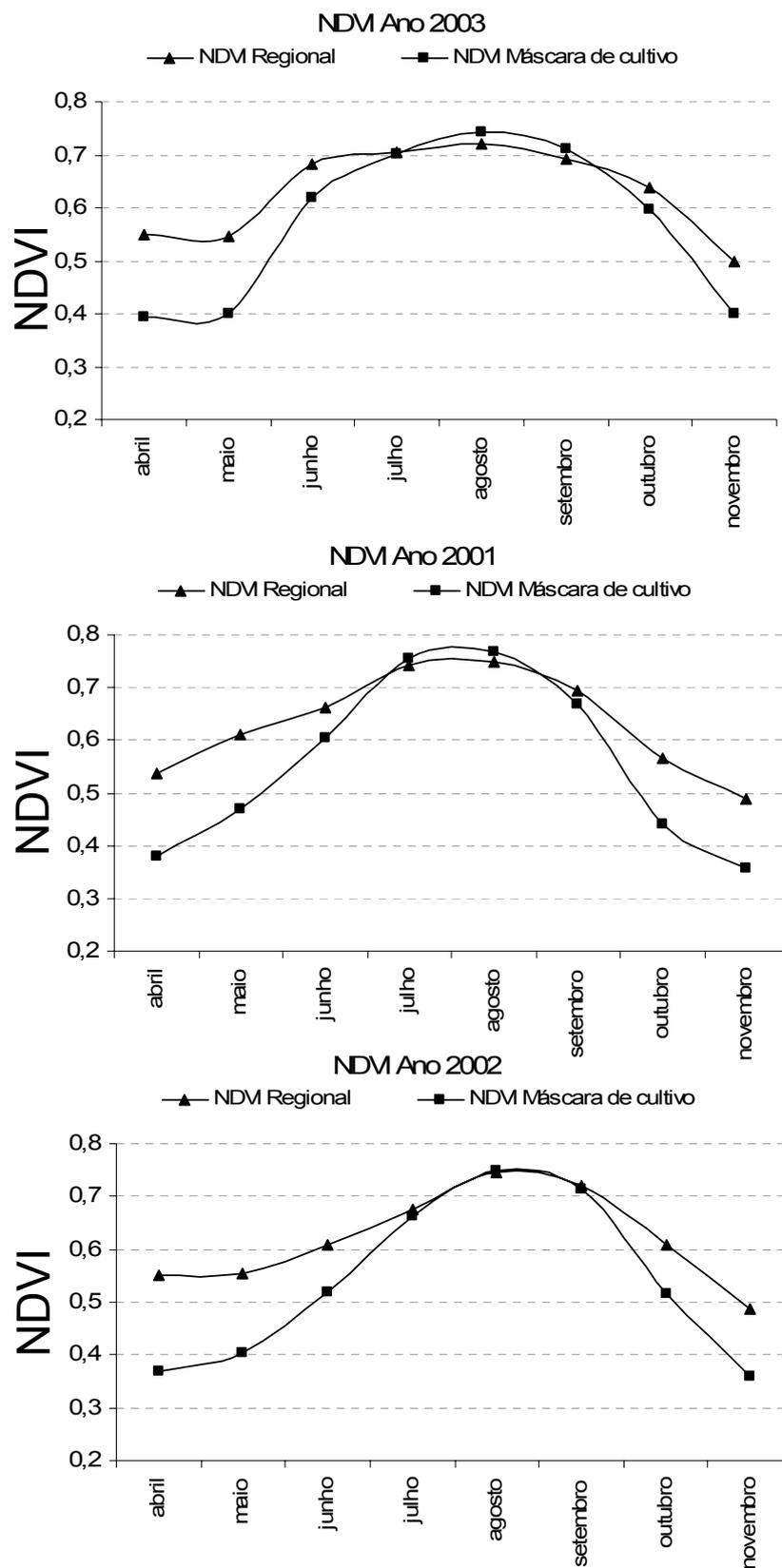


Figura 23. Perfis temporais de NDVI regional e máscara de cultivo para os anos 2000 a 2002. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

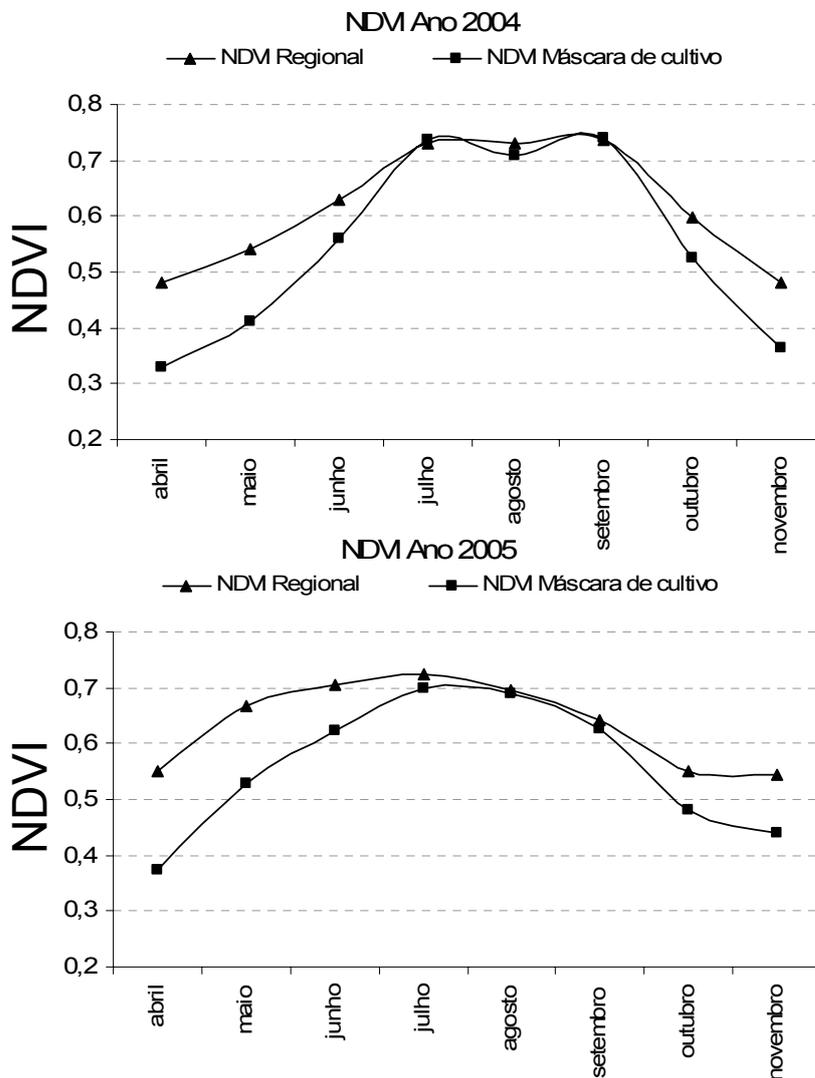


Figura 24. Perfis temporais de NDVI regional e máscara de cultivo para os anos 2003 a 2005. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

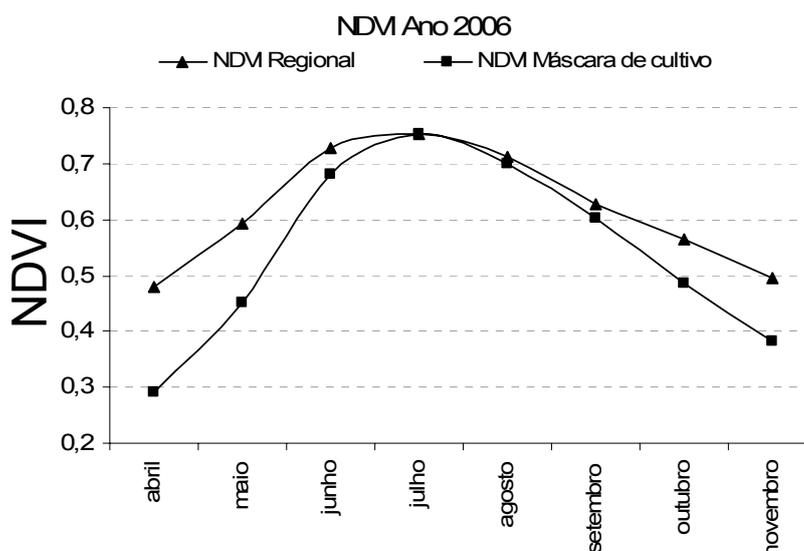


Figura 25. Perfil temporal de NDVI regional e máscara de cultivo para o ano 2006. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

Os perfis temporais de NDVI máscara de cultivo apresentaram variações interanuais, que podem estar associadas a variações da produção de biomassa e do rendimento de grãos. Para melhor compreensão e caracterização dos perfis temporais de NDVI máscara de cultivo, os mesmos foram apresentados separadamente: perfis temporais de NDVI máscara de cultivo de anos com rendimento de grãos inferior (Figura 26) e superior (Figura 27) a  $1.800 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . De modo geral, em anos com valores inferiores a  $1.800 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , os perfis indicaram rápido aumento ou decréscimo nos valores de NDVI ou, como no caso de 2005, o valor de NDVI não foi superior a 0,7, indicando menor acúmulo de biomassa neste ano. Por sua vez, anos de maiores rendimentos de grãos possuem perfis onde altos valores de NDVI foram mantidos por um período maior (maior área sob a curva). Sendo assim, para a cultura do trigo, o período de manutenção de altos valores de NDVI parece estar mais associado ao rendimento de grãos do que o valor do índice de vegetação propriamente dito.

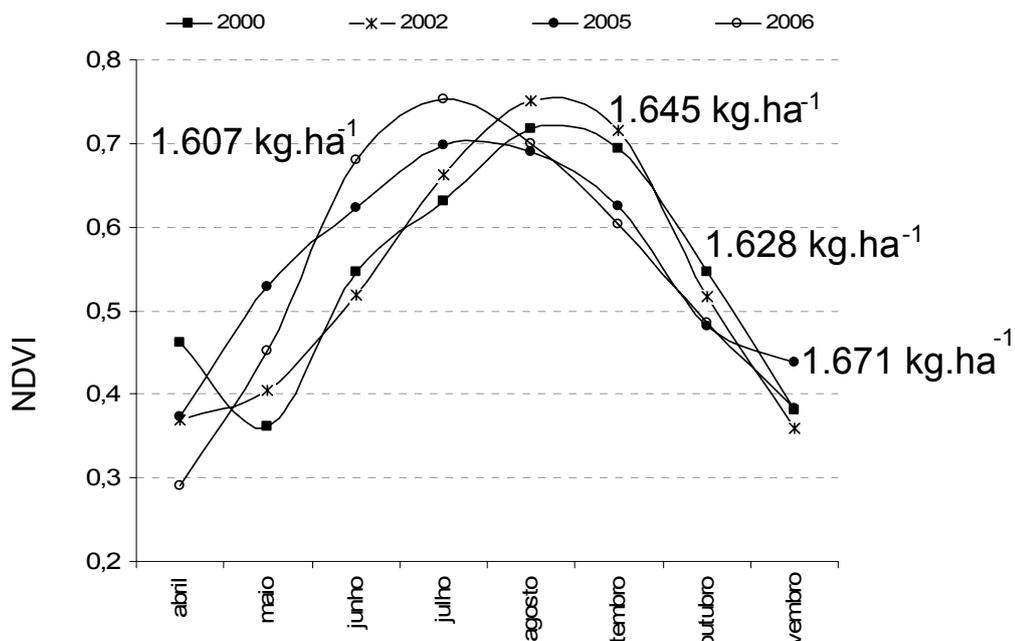


Figura 26. Perfil temporal de NDVI máscara de cultivo e rendimentos anuais de grãos de trigo inferiores a 1.800 kg.ha<sup>-1</sup>. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

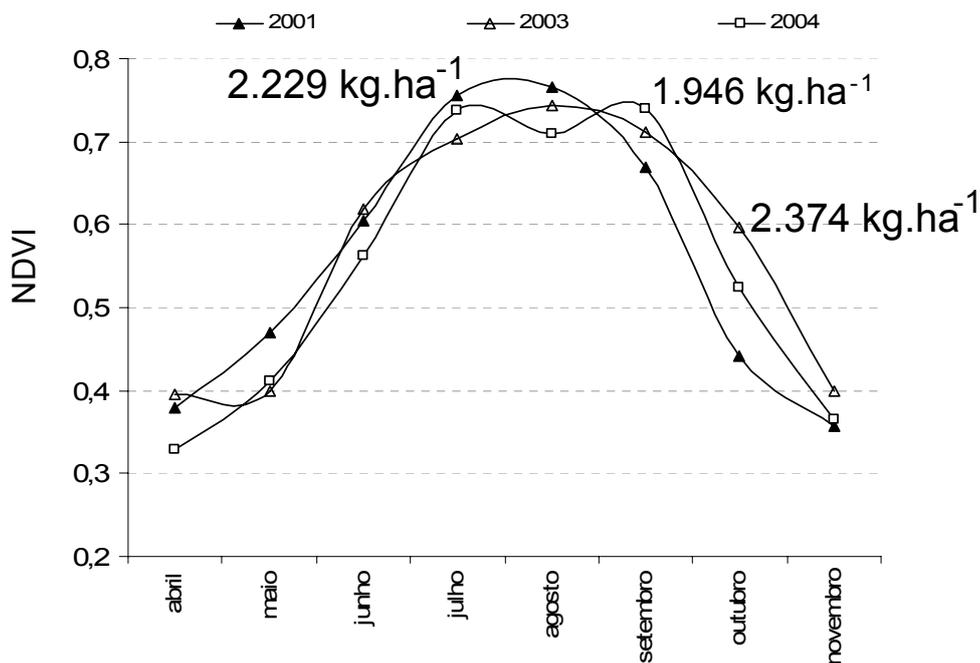


Figura 27. Perfil temporal de NDVI máscara de cultivo e rendimentos anuais de grãos de trigo superiores a 1.800 kg.ha<sup>-1</sup>. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

## **4.5 Indicadores agrometeorológicos do rendimento de grãos de trigo**

### **4.5.1 Correlações significativas**

Os elementos agrometeorológicos, que foram significativamente correlacionados ao rendimento de grãos de trigo, são apresentados na Tabela 6. Verifica-se que a precipitação pluvial, número de dias com precipitação pluvial, umidade relativa do ar, temperatura mínima do ar e graus-dia foram correlacionados com o rendimento de grãos, de maneira inversa, enquanto que o quociente fototermal foi diretamente correlacionado (nível de significância de 5%).

O maior número de correlações significativas ocorreu em outubro, de maneira que o mês, em que, nesta região, as plantas se encontram em estágio de enchimento de grãos, pode ser considerado um dos mais importantes para definição do rendimento final de grãos da cultura do trigo.

Uma correlação negativa, entre rendimento de grãos e temperatura mínima do ar seria esperada, principalmente, nos meses de agosto e setembro dado que, a partir do florescimento, o trigo é prejudicado por baixas temperaturas (Mundstock, 1999). Porém, correlação negativa observada em outubro e novembro (Tabela 6) não pode ser considerada relacionada diretamente ao rendimento de grãos, mas sim indiretamente. Na fase final do ciclo (outubro e novembro), o excesso de umidade, a baixa insolação e altas temperaturas do ar (e não as temperaturas mínimas) são os principais elementos negativamente associados ao rendimento de grãos em função da diminuição do período de enchimento dos grãos (Nedel *et al.*, 1999).

Tabela 6. Correlações entre elementos agrometeorológicos e rendimentos de grãos de trigo. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

Elemento	Média Mensal							Total Acumulado		
	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	mai_nov	jun_nov	mai_out
Precipitação Pluvial (mm)	0,29	-0,46*	0,17	-0,42	0,04	-0,55**	-0,36	-	-0,53**	-
Umidade Relativa (%)	0,33	0,05	0,34	-0,04	-0,05	-0,45**	-0,51**	-	-	-
Temperatura Mínima (°C)	-0,22	-0,01	-0,25	-0,35	0,20	-0,46*	-0,56**	-	-	-
Nº Dias com Precipitação pluvial	0,09	-0,56**	0,04	-0,22	0,17	-0,44*	-0,30	-0,29	-	-
Graus-dia (Tb*** = 0°C)	-	-	-	-	-	-	-	-0,52**	-0,44*	-0,47*
Graus-dia (Tb = 4.5°C)	-	-	-	-	-	-	-	-0,49*	-0,45*	-0,46*
Quoc. Fototermal (Q)	-0,76	-0,46	-0,13	0,33	-0,01	0,45*	0,57**	-	-	-

\*Correlação significativa entre as variáveis a 10% de probabilidade pelo teste-t.

\*\*Correlação significativa entre as variáveis a 5% de probabilidade pelo teste-t.

\*\*\*Tb = temperatura basal

A umidade relativa do ar foi negativamente correlacionada ao rendimento de grãos nos meses de outubro e novembro, também em virtude de prejuízos ao enchimento de grãos: o excesso de umidade e as doenças da parte aérea (favorecidas por condições de alta umidade do ar associada a altas temperaturas do ar) são estresses que aceleram a redução da área foliar verde da planta e diminuem o período de enchimento do grão (Nedel *et al.*, 1999).

Porém, umidade relativa do ar não é um elemento agrometeorológico que atue isoladamente (e diretamente) na definição do rendimento de grãos, mas sim, relacionada à precipitação pluvial, fato comprovado pelos resultados encontrados: a precipitação pluvial também foi correlacionada negativamente ao rendimento de grãos nos meses de outubro e novembro (Tabela 6). Grãos formados em condições de excesso de precipitação pluvial

(ou de maior número de dias com precipitação pluvial) apresentam baixa qualidade devido a fatores como moléstias, deterioração decorrente de sucessivos processos de perda e ganho de umidade (que originam grãos trincados) e germinação pré-colheita (Guarienti *et al.*, 2003; Bassoi, 2004). Sendo assim, a precipitação pluvial foi considerada um importante indicador do rendimento de grãos de trigo.

De acordo com Cunha *et al.* (2005), no norte do Estado do Rio Grande do Sul, os valores de quociente fototermal (Q) implicam em diminuição nos valores de potencial de rendimento de grãos, por razões de ambiente, no sentido dos Campos de Cima da Serra para as Missões e Vale do Uruguai. Sendo assim, maiores valores de Q (mais radiação solar e menor temperatura média do ar) estão relacionados a maiores rendimentos de grãos, em função do desenvolvimento da planta com disponibilidade de radiação (para atividade fotossintética) e com temperaturas amenas (sem aceleração do ciclo). Maiores valores de Q são importantes para o rendimento de grãos ao longo do desenvolvimento vegetativo da planta e também, no período próximo à antese (Cunha *et al.*, 2005). Mas, nos resultados obtidos na Tabela 6 com a correlação entre Q e rendimento, significativa apenas nos meses de outubro e novembro, este não foi considerado indicador do rendimento de grãos.

Os graus-dia tiveram correlação significativa com o rendimento e grãos (Tabela 6). O acúmulo de biomassa está relacionado ao rendimento biológico da cultura, sendo definido como a quantidade total de matéria seca (biomassa aérea) acumulada em uma determinada unidade de área. Por sua vez, o rendimento agrônômico está relacionado à matéria seca acumulada

nos grãos (Rodríguez, 2005). É importante salientar que um maior rendimento biológico não implica, necessariamente, em um maior rendimento agrônomo. Dessa maneira, a correlação negativa entre soma térmica (ou graus-dia) e rendimento de grãos pode estar relacionada a elevadas temperaturas no aphilamento (que causam aceleração do ciclo) e a ocorrência de possíveis golpes de calor. Mais considerações a respeito do possível efeito negativo de golpes de calor não puderam ser realizadas, pois os dados de temperatura média do ar foram analisados mensalmente e não diariamente, o que seria necessário para a caracterização adequada de golpes de calor, definido como a ocorrência de temperatura do ar superior a 32°C por dois ou mais dias, acelerando o ciclo da cultura e prejudicando enchimento de grãos em função da paralisação da síntese de proteínas (Mundstock, 1999).

O emprego de graus-dia é adequado para caracterização do ciclo da cultura como um todo. No contexto deste trabalho, os graus-dia foram considerados um dos indicadores do rendimento de grãos, pois as correlações foram significativas para os valores acumulados em diferentes sub-períodos (maio a novembro, junho a novembro e maio a outubro) (Tabela 6).

#### **4.5.2 Correlações não significativas**

A insolação mensal e a insolação acumulada; a temperatura máxima do ar, média, e mínima absoluta; a radiação solar global; o número dias com temperatura mínima inferior a 0°C; índice de dano por geada (IG) e por excesso de precipitação na colheita (IC), não apresentaram significância estatística, quando correlacionados ao rendimento de grãos.

O peso do grão, um dos fatores que definem o rendimento de grãos (Cunha, 2006a), é influenciado pela taxa de enchimento de grãos, a qual está relacionada à radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela planta e ao aporte de fotoassimilados para o grão (Guarienti *et al.*, 2003). A insolação e a radiação solar não foram correlacionados significativamente ao rendimento de grãos, ou seja, os efeitos destes elementos podem afetar a planta em determinadas etapas do seu desenvolvimento, incluindo a formação do grão e a definição do número de grãos por área. Porém, os valores, na série de dados analisados, não foram críticos e não chegaram a afetar o rendimento de médio anual de grãos dos municípios da região da Cotrijal.

As baixas temperaturas e a ocorrência de geadas afetam negativamente o rendimento de grãos quando ocorrem no florescimento (Mundstock, 1999), de maneira que o fato de não ter havido correlação entre rendimento de grãos e temperatura média, temperatura mínima absoluta, número dias com temperatura mínima inferior a 0°C, ou ainda, com IG, não significa que esses elementos não sejam importantes para a definição do rendimento de grãos de trigo. Sabe-se que deve haver a penalização do rendimento de grãos de grãos nos anos em que ocorrem eventos extremos. Na presente análise, trabalhando-se com valores médios mensais de temperaturas do ar, não se conseguiu detectar a correlação entre esses elementos agrometeorológicos e o rendimento.

A temperatura máxima não foi correlacionada ao rendimento, embora possa influenciá-lo negativamente em função da diminuição do período de enchimento de grãos (Nedel *et al.*, 1999). As plantas podem ser

negativamente afetadas por pragas e doenças, as quais são favorecidas em anos de elevada temperaturas do ar associadas a elevada umidade relativa do ar, porém essa relação não parece estar diretamente relacionada ao rendimento.

Também o índice de dano por excesso de precipitação pluvial na colheita (IC) não apresentou correlação significativa com o rendimento. Os resultados mostraram que é complexo estipular valores de quantidade de precipitação pluvial, tal como exige o cálculo do IG, pois, mesmo aqueles valores que não são considerados pelo IG (por estarem fora das faixas estabelecidas), parecem afetar o rendimento de grãos. Essa hipótese é sustentada pelo fato de que somente o número de dias com precipitação pluvial, ou a precipitação pluvial acumulada, tiveram correlação com o rendimento.

#### **4.5.3 Escolha dos indicadores agrometeorológicos**

Tendo por base os resultados e considerações apresentadas acima, os seguintes elementos agrometeorológicos foram escolhidos como indicadores do rendimento de grãos de trigo, possíveis de serem utilizados como variáveis independentes no ajuste do modelo de estimativa de rendimento:

-Precipitação pluvial do mês de outubro;

-Índice dano por geadas (IG): o IG não teve correlação significativa com rendimento, porém, com base nos estudos da safra de 2006 e na magnitude das perdas de rendimento, decorrentes da ocorrência de geadas (Apêndice 1), optou-se por considerar o IG como um indicador

agrometeorológico e incluir essa variável no modelo de estimativa de rendimento de grãos.

Sendo assim, foi escolhida a maior correlação entre rendimento de grãos e IG, nos meses em que as plantas de trigo se encontram, na região de estudo, no florescimento: IG de agosto, setembro e outubro (período total de florescimento) e IG somente de setembro (período no qual a maior parte das lavouras de trigo - 75% da área - se encontra em florescimento). O IG do mês de setembro foi o que apresentou a melhor correlação com rendimento, comparativamente, tanto para a série de 16 anos (-0,20), quanto na análise de sete anos (-0,33) sendo, portanto, o indicador do rendimento de grãos ideal para inserção no modelo. Este resultado está de acordo com Mota (1998), pois, embora calculado com faixas diferentes de temperaturas, o índice de geadas do mês de setembro também foi utilizado no modelo de estimativa de grãos de trigo proposto por este autor.

-Graus-dia, calculados com temperaturas basais de 0°C e 4,5°C tiveram correlações significativas, podendo, ambos, serem utilizados como indicadores do rendimento de grãos. Foram escolhidos os valores de graus-dia, calculados com temperatura basal de 0°C e acumulados entre os meses de maio a outubro, como forma de simplificação dos dados de entrada do modelo. Da mesma maneira, não foram incluídos os dados referentes ao mês de novembro, buscando tornar o modelo mais prático e funcional, pois a inclusão de dados referentes ao mês da colheita faz com que a estimativa só possa ser realizada neste mês, de maneira que o modelo teria restrições de uso em programas de previsão de safras.

## **4.6 Indicador espectral do rendimento de grãos de trigo**

### **4.6.1 NDVI regional**

Não foram encontradas correlações significativas entre o rendimento de grãos e os valores de NDVI referentes a toda área de estudo (NDVI regional), com exceção daquele acumulado entre junho e outubro (Tabela 7). Este resultado aponta que uma melhor correlação entre rendimento de grãos e NDVI ocorre, não com os valores mensais do índice, mas, sim, com valores integrados. O fato de a maior parte das correlações não ter sido significativa já era esperado, em função de o NDVI incluir áreas que não somente as de lavouras de cereais de inverno.

### **4.6.2 NDVI máscara de cultivo**

Com emprego da máscara de cultivo foram obtidas correlações significativas entre rendimento de grãos e os seguintes valores de NDVI (Tabela 7): NDVI soma, NDVI integração maio a novembro e NDVI integração junho a outubro. Estes resultados confirmaram que o rendimento de grãos não esteve associado a valores mensais de NDVI, mas sim a valores acumulados ao longo do ciclo. Sebem (2005), trabalhando com trigo na região da Andalucia, Espanha, também encontrou maiores coeficientes de correlação entre rendimento de grãos e valores integrados (0,75) ou soma (0,74) de NDVI, em detrimento de valores mensais (0,45 em média, com exceção do mês de agosto, quando o coeficiente de correlação foi de 0,75).

Tabela 7. Correlações entre rendimento de grãos de trigo e NDVI mensal, NDVI soma e NDVI integração obtidos sem e com a aplicação da máscara de cultivo, respectivamente, NDVI regional e NDVI máscara. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

NDVI	Média Mensal							Soma	Integração		
	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	MAI_NOV	MAI_NOV	JUN_OUT
Regional	-	-	0,01	0,27	0,47	0,39	0,39	-	0,44	0,44	0,70*
	0,01	0,16						0,29			
Máscara	0,10	-	0,13	0,40	0,60	0,38	0,23	-	0,67*	0,68*	0,83**
		0,05						0,13			

\*Correlação significativa entre as variáveis a 10% de probabilidade pelo teste-t.

\*\*Correlação significativa entre as variáveis a 5% de probabilidade pelo teste-t.

Com o emprego da máscara de cultivo, a correlação entre NDVI e rendimento de grãos reflete adequadamente o padrão de desenvolvimento de culturas agrícolas, ou seja, correlações positivas crescentes até o mês de agosto (mês anterior ao florescimento) e decrescentes após.

Sendo assim, as imagens quinzenais (ou as composições mensais) do sensor MODIS, produto NDVI, podem ser utilizadas para monitoramento das lavouras de cereais de inverno via perfis de NDVI, os quais permitem o acompanhamento do desenvolvimento das plantas, inclusive indicando a ocorrência de eventos extremos adversos, como ocorrido na safra 2006 (Junges *et al.*, 2007). Porém, os valores integrados ou soma de NDVI foram os mais indicados para emprego no modelo de estimativa de rendimento.

Tendo por base os resultados e considerações apresentados acima, o NDVI integrado junho a outubro, foi escolhido como indicador do rendimento de grãos de trigo, para compor o grupo de variáveis independentes no ajuste

do modelo de estimativa de rendimento. De acordo com Liu (2007), valores de NDVI acumulado ao longo do período de crescimento, ou acumulado durante a fase reprodutiva, foram empregados respectivamente, em modelos espectrais de estimativa de rendimento de grãos de milho em Ribeirão Preto (SP) e de milheto no Senegal. Da mesma maneira, o NDVI integrado obtido a partir de imagens NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), durante o período de enchimento de grãos, foi empregado na estimativa de rendimento de grãos de trigo na Itália (Liu, 2007).

#### **4.7 Indicadores agrometeorológicos e espectrais**

A elaboração de um modelo conceitual de estimativa de rendimento de grãos de trigo, está baseada no pressuposto de que o NDVI indica as condições reais das lavouras em termos de manejo, cultivares e condições de solo. Portanto, maiores valores do NDVI indicariam maior acúmulo de biomassa e, teoricamente, maior rendimento de grãos. Porém, um maior acúmulo de biomassa não significa, necessariamente, um maior rendimento, tendo em vista que elementos agrometeorológicos, adversos ao desenvolvimento da planta ou ao processo de formação e enchimento de grãos, podem ocorrer.

Elementos agrometeorológicos tais como excesso de precipitação pluvial na colheita ou geada no florescimento podem diminuir o rendimento de grãos, mas, não necessariamente, acarretam redução de biomassa. Sendo assim, foram testados modelos que partem do NDVI integrado (junho a outubro) e o penalizam (descontam) frente à ocorrência de elementos agrometeorológicos negativamente relacionados à formação do potencial de rendimento de grãos. As variáveis de entrada, para ajuste dos modelos,

constam nas Tabelas 8 (valores reais) e 9 (precipitação pluvial e soma térmica como função exponencial).

Tabela 8. Indicadores agrometeorológicos e espectral empregados na elaboração dos modelos de estimativa de rendimento de grãos de trigo, expressos em valores reais. Cotrijal, 2007.

<b>Ano</b>	<b>Rendimento (kg.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>NDVI Integrado (jun_out)</b>	<b>Índice de Geadas (IG) (setembro)</b>	<b>Precipitação Pluvial (mm) (outubro)</b>	<b>Graus-dia (Tb=0°C) (mai_out)</b>
<b>2000</b>	1628	94,0	3	339,3	2709,3
<b>2001</b>	2229	97,1	7	275,5	2793,4
<b>2002</b>	1645	94,9	10	372,3	2760,4
<b>2003</b>	2374	101,2	3	237,1	2743,5
<b>2004</b>	1946	98,2	0	193,2	2668,6
<b>2005</b>	1671	93,5	0	384,8	2709,4
<b>2006</b>	1607	96,6	23	94,9	2769,5

Tabela 9. Indicadores agrometeorológicos e espectral empregados na elaboração dos modelos de estimativa de rendimento de grãos de trigo, expressos em forma de função exponencial. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

Ano	Rendimento (kg.ha <sup>-1</sup> )	NDVI Integrado (jun_out)	Índice de Geadas (IG) (setembro)	Função Exponencial	
				Prec.Pluvial (outubro) $y = 2463,5e^{-0,0007x}$ $R^2 = 0,43$	Graus-dia (Tb=0°C) (mai_out) $y = 18,6e^{-0,0008x}$ $R^2 = 0,22$
<b>2000</b>	1628	94,0	3	1732	2132
<b>2001</b>	2229	97,1	7	1872	1994
<b>2002</b>	1645	94,9	10	1645	2047
<b>2003</b>	2374	101,2	3	1855	2075
<b>2004</b>	1946	98,2	0	1976	2203
<b>2005</b>	1671	93,5	0	1699	2132
<b>2006</b>	1607	96,6	23	1853	2032

#### 4.8 Modelo agrometeorológico-espectral

Os resultados do ajuste dos modelos testados constam na Tabela 10.

Tabela 10. Resultados do ajuste dos modelos de estimativa de rendimento de grãos de trigo. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
		RENDIMENTOS (kg.ha <sup>-1</sup> )						
M1 <sup>1</sup>	<b>IBGE</b>	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* (%)	-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 <sup>2</sup> = 0,83		R <sup>2</sup> ajustado = 0,67		Erro padrão = 182,08		
M2 <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup> = 0,99		R <sup>2</sup> ajustado = 0,99		Erro padrão = 8,58		
	M3 <sup>3</sup>	Modelo	1.668	1.925	1.689	2.391	2.096	1.662
Diferença (%)		-2,47	13,64	-2,68	-0,73	-7,74	0,48	-3,71
Equação		y= -7733+(10,38*NDVI)-(0,13*IG)-(0,18*PREC)						
Estatísticas		R <sup>2</sup> = 0,80		R <sup>2</sup> ajustado = 0,60		Erro padrão = 202,12		
M4 <sup>4</sup>		Modelo	1.618	2.232	1.672	2.362	1.962	1.655
	Diferença (%)	0,65	-0,15	-1,67	0,50	-0,85	0,91	0,59
	Equação	y= 186,5+(6,89*NDVI)-(0,28*IG)+(0,68*PREC)-(2,87*GD)						
	Estatísticas	R <sup>2</sup> = 0,99		R <sup>2</sup> ajustado = 0,99		Erro padrão = 28,41		

\*Diferença (%)= rendimento de grãos oficial– rendimento de grão modelado

<sup>1</sup>M1: NDVI, IG (setembro), precipitação pluvial (outubro);

<sup>2</sup>M2: NDVI, IG (setembro), precipitação pluvial (outubro) e graus-dia (maio a outubro);

<sup>3</sup>M3: NDVI, IG (setembro), precipitação pluvial (outubro) função;

<sup>4</sup>M4: NDVI, IG (setembro), precipitação pluvial (outubro) função e graus-dia (maio a outubro) função.

#### 4.8.1 Modelo 1 (M1)

Neste modelo foram testados os indicadores de rendimento de grãos NDVI, IG e precipitação pluvial, expressos em valores reais (Tabela 10). O modelo apresentou coeficiente de determinação de 0,83 e coeficiente de determinação ajustado de 0,67. As diferenças entre rendimento de grãos oficial (IBGE) e rendimento de grãos modelado (M1) foram inferiores a 10% nos anos estudados, com exceção do ano 2001 (12%).

De modo geral, situações adversas ao adequado desenvolvimento das plantas, porém não relacionadas à elementos agrometeorológicos, podem ser monitoradas via NDVI, ou seja; pragas, moléstias e demais problemas relacionados ao manejo das lavouras, que provocariam uma redução do indicador espectral e estariam, assim, incluídas no modelo. Porém, não foi observada uma diminuição dos valores de NDVI de 2001, comparativamente aos demais anos, ou seja, o erro da estimativa neste ano não está relacionado ao NDVI ou, indiretamente, às imagens MODIS.

Em 2001, as temperaturas do ar (média, máxima e mínima), no mês de agosto, foram cerca de 2,5°C superiores à Normal Climatológica de Passo Fundo e a precipitação pluvial foi de apenas 28 mm (Normal de 166 mm) provocando déficit hídrico na região (Figura 28).

As altas temperaturas e a falta de precipitação pluvial podem ter afetado as plantas no final do desenvolvimento vegetativo e/ou início do florescimento, tendo em vista que o período, no qual a cultura mais necessita de água, é do florescimento até início da formação de grãos (Mundstock, 1999). Em 2001, o inverno com temperaturas amenas acelerou o ciclo de desenvolvimento das plantas durante a fase vegetativa e, durante

a fase reprodutiva, as estiagens foram responsáveis pela morte de afilhos e por dificuldades, em algumas lavouras, da aplicação da adubação nitrogenada em cobertura (Cunha, 2002).

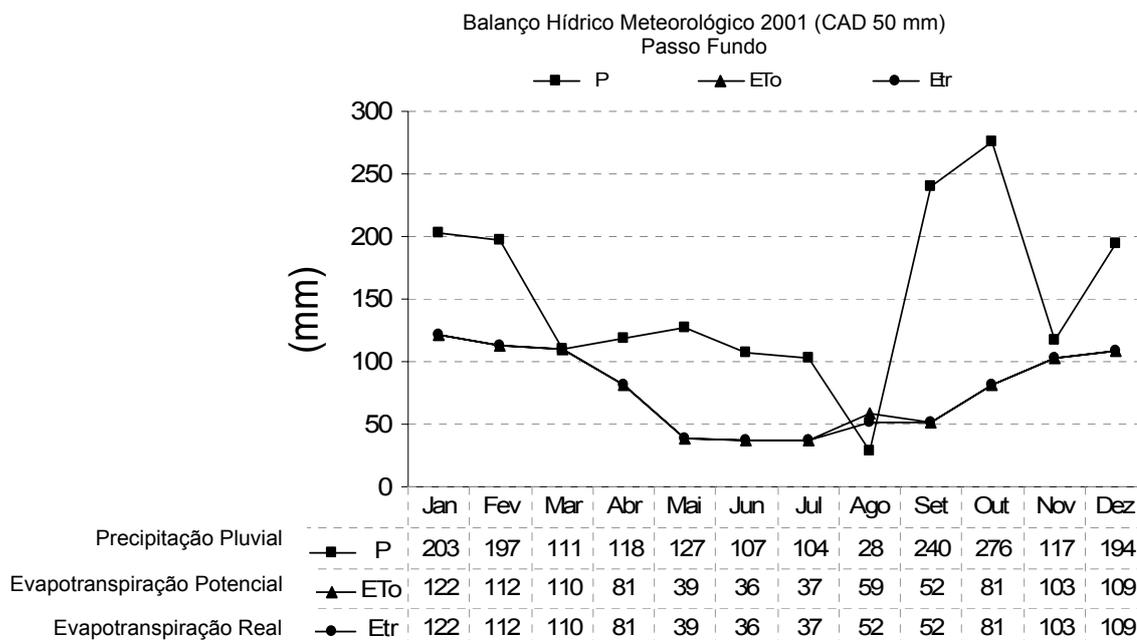


Figura 28. Balanço Hídrico Meteorológico (CAD 50mm). Passo Fundo, 2001.  
Fonte dos dados: 8<sup>o</sup>DISME/INMET (2007).

Sendo assim, o erro de 12% na estimativa do modelo M1 em 2001 foi causado pela baixa precipitação pluvial no florescimento, situação adversa à cultura, não incluída diretamente no modelo e que não provocou alterações no valor do NDVI.

Na análise da correlação entre as variáveis independentes de um modelo de regressão múltipla, é importante considerar que os coeficientes de correlação são úteis no entendimento de um caráter complexo (como o rendimento), mas não determinam as influências diretas e indiretas de outras variáveis no rendimento, pois a correlação entre duas variáveis mede a

associação entre ambas, não determinando, portanto, a relação de causa e efeito entre as demais.

Sendo assim, para compreensão das causas da associação entre variáveis pode ser realizada uma análise de coeficientes de trilha. A Análise de Trilha (*Path Coefficient Analysis*) mede a influência direta de uma variável sobre outra, independente das demais, no contexto da relação de causa e efeito, permitindo desdobrar os coeficientes de correlações simples em seus efeitos diretos e indiretos (Vieira *et al.*, 2007). A análise de trilha é um dos métodos estatísticos mais empregado por agrônomos e melhoristas para explicar as relações entre os componentes de rendimento, inclusive para a cultura do trigo (Hafiz, 2003).

Neste modelo, o coeficiente da variável precipitação pluvial é positivo, o que não significa erro no ajuste da equação, pois pode ser explicado pela análise de trilha (Tabela 11). A precipitação pluvial está correlacionada negativamente com rendimento, tal como indica a correlação total de -0,18, porém, a maior parte desta correlação é com o NDVI (-0,60). Nesse caso, o aumento da precipitação pluvial está relacionado à redução do NDVI e é essa redução é que acarreta menor rendimento de grãos, ou seja, no modelo, o efeito negativo da precipitação pluvial é indireto. Por sua vez, o efeito direto da precipitação pluvial sobre o rendimento de grãos é menor (0,35) e, por ser positivo, faz com que o coeficiente também se torne positivo na equação que define o modelo.

Tabela 11. Análise de trilha do modelo M1, com as variáveis NDVI integrado (junho a outubro), índice de geada (setembro) e precipitação pluvial (outubro) expressas em valores reais. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

	NDVI Integrado (jun_out)	Índice de Geada (IG) (setembro)	Prec.Pluvial (mm) (outubro)
Efeito direto sobre Rendimento	1,0379	-0,1141	0,3550
Efeito indireto NDVI	-	-0,0144	-0,6059
Efeito indireto via IG	0,0015	-	0,0655
Efeito indireto via Prec.Pluvial (out)	-0,2072	-0,2037	-
Efeito total	0,8322	-0,3323	-0,1854

#### 4.8.2 Modelo 2 (M2)

Em virtude do erro de estimativa de 12% do modelo M1, em 2001, foi testado o modelo (M2) com a inserção de mais uma variável, no caso do indicador agrometeorológico graus-dia. Assim, foram incluídos no modelo os indicadores de rendimento de grãos NDVI, IG, precipitação pluvial e graus-dia, expressos em valores reais. O modelo apresentou alto coeficiente de determinação e coeficiente de determinação ajustado. As diferenças entre rendimento de grãos oficial (IBGE) e o modelado (M1) variaram de 0,007% a 0,5%, ou seja, muito inferiores a 10% (Tabela 10).

Os resultados do modelo, que teve melhor ajuste quando da inserção da soma térmica, bem como a análise de trilha (Tabela 12), mostram que os graus-dia são um importante indicador do rendimento de grãos de trigo. Porém, na equação do modelo M2, o coeficiente dos graus-dia é positivo, o que deve ser interpretado com cuidado, pois, tal como consta no item 4.3.1

deste trabalho, a correlação entre graus-dia e rendimento de grãos tende a ser negativa (-0,47).

Nos sete anos incluídos no modelo, o maior acúmulo de graus-dia esteve positivamente relacionada ao rendimento de grãos. Esse resultado é decorrente do reduzido conjunto de dados utilizado, o qual não expressou a relação esperada.

Tabela 12. Análise de trilha do modelo M2, com as variáveis NDVI integrado (junho a outubro), índice de geada (setembro), precipitação pluvial (outubro) e graus-dia (maio a outubro) expressas em valores reais. Região de abrangência da Cotrijal, 2007

	<b>NDVI</b> <b>Integrado</b> (jun_out)	<b>Índice de</b> <b>Geada (IG)</b> (setembro)	<b>Prec.Pluvial</b> <b>(mm)</b> (outubro)	<b>Graus-dia</b> <b>(Tb=0°C)</b> (mai_out)
Efeito direto sobre Rendimento	0,5009	-1,0497	-0,4089	0,7730
Efeito indireto via NDVI	-	-0,0069	-0,2924	0,0504
Efeito indireto via IG	0,0145	-	0,6025	-0,6668
Efeito indireto via Prec.Pluvial (out)	0,2387	-0,2347	-	0,0458
Efeito indireto via Soma Térmica (out)	0,0778	0,4895	-0,0865	-
Efeito total	0,8322	-0,3323	-0,1854	0,2045

É importante salientar, porém, que o conjunto de dados incluídos no modelo é pequeno e pode não estar expressando a tendência esperada, ou seja, de que maior acúmulo de graus-dia significa que a planta se desenvolveu mais rapidamente, com redução do ciclo fenológico como consequência das altas temperaturas médias diárias, e consequente redução do rendimento final de grãos (Silva *et al.* 2002).

O emprego da soma térmica é importante para o modelo, mas deve ser analisado com atenção e exige estudos futuros a fim de que se verifique se, com um conjunto maior de dados (anos) a equação do modelo indica a correlação negativa de soma térmica e rendimento de grãos ou continuará apontando uma positiva.

#### **4.8.3 Modelo 3 (M3)**

Neste modelo foram testados os indicadores de rendimento de grãos NDVI, IG e precipitação pluvial expressa em termos de função exponencial. Como já foi mencionado, o uso das funções tem por finalidade evitar que resultados aleatórios fossem obtidos, fruto da pequena extensão da série de dados espectrais (imagens MODIS) disponível, que foi de somente sete anos. A equação e as estatísticas da regressão podem ser visualizadas na Tabela 10. O modelo apresentou um valor intermediário de coeficiente de determinação (0,80) e coeficiente de determinação ajustado (0,60). As diferenças entre o rendimento de grãos oficial (IBGE) e o modelado (M1) foram inferiores a 10% nos anos estudados, com exceção do ano de 2001, quando atingiu 13,6%.

Os resultados do modelo 3 (M3) foram muito semelhantes aos resultados já encontrados no modelo 1 (M1), de maneira que o emprego da função exponencial não é justificado.

A análise de trilha (Tabela 14) mostra que, com emprego da função exponencial, o efeito total da precipitação pluvial sobre o rendimento de grãos de grãos é positivo, assim como o efeito via NDVI. Isso se deve ao fato de que, ao expressarmos a precipitação pluvial em termos de função

exponencial, a função se torna positiva, e isso acontece tanto nos dados de sete, quanto de dezesseis anos. Ou seja, o emprego da função exponencial para os dados de precipitação pluvial não teve o resultado esperado, ou seja, não “incluiu” no modelo a correlação negativa entre este indicador agrometeorológico e o rendimento, tal como é observado na série de dezesseis anos.

Tabela 13. Análise de trilha do modelo M3, com as variáveis NDVI integrado (junho a outubro), índice de geada (setembro) e precipitação pluvial (outubro) expressa em termos de função exponencial. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

	NDVI Integrado (jun_out)	Índice de Geada (IG) (setembro)	Prec.Pluvial Função (outubro)
Efeito direto sobre Rendimento	0,8759	-0,3211	-0,0677
Efeito indireto NDVI	-	-0,0121	0,6245
Efeito indireto via IG	0,0044	-	0,0050
Efeito indireto via Prec.Pluvial (out)	-0,0481	0,0010	-
Efeito total	0,8322	-0,3323	0,5621

#### 4.8.4 Modelo 4 (M4)

Neste modelo foram testados os indicadores de rendimento de grãos NDVI, IG, precipitação pluvial e graus-dia, sendo os dois últimos expressos em termos de função exponencial. A equação e as estatísticas da regressão podem ser visualizados na Tabela 10. O modelo apresentou um alto coeficiente de determinação e coeficiente de determinação ajustado. As diferenças entre o rendimento de grãos oficial (IBGE) e o modelado (M4) foram inferiores a 10%.

A análise de trilha pode ser visualizada na Tabela 14.

Ao contrário dos resultados do modelo 3 (M3), neste modelo, o uso da função exponencial atingiu os resultados esperados, pois o indicador graus-dia foi negativamente relacionado ao rendimento, ou seja, indicou a mesma relação negativa dos valores de dezesseis anos. Para o caso específico de graus-dia, o uso da função exponencial é indicado, a fim de que se possa incluir no modelo a relação negativa entre o maior acúmulo de graus-dia e o rendimento de grãos de trigo.

É importante salientar que, embora a função exponencial, por si só, tenha atingido os resultados esperados, isso não se refletiu na estimativa do modelo 4 (M4) pois, de modo geral, este modelo é muito semelhante ao modelo 2 (M2), confirmando novamente, a não necessidade do emprego de funções exponenciais na tentativa de melhora das estimativas do modelo.

Tabela 14. Análise de trilha do modelo M4, com as variáveis NDVI integrado (junho a outubro), índice de geada (setembro), precipitação pluvial (outubro) e soma térmica (maio a outubro), sendo as duas últimas expressas em termos de função exponencial. Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

	<b>NDVI Integrado (jun_out)</b>	<b>Índice de Geada (IG) (setembro)</b>	<b>Prec.Pluvial Função (outubro)</b>	<b>Graus-dia (Tb=0°C) (mai_out)</b>
Efeito direto sobre Rendimento	0,5815	-0,7330	0,2484	-0,6509
Efeito indireto via NDVI	-	-0,0080	0,4146	-0,0565
Efeito indireto via IG	0,0101	-	0,0011	-0,4647
Efeito indireto via Prec.Pluvial (out)	0,1777	-0,0038	-	0,0429
Efeito indireto via Soma Térmica (out)	0,0633	0,4126	-0,1125	-
Efeito total	0,8322	-0,3323	0,5621	-0,1998

#### 4.8.5 Considerações finais

Em função dos resultados apresentados acima, todos os modelos foram considerados adequados para estimativa de rendimento de grãos de trigo na região da Cotrijal.

Inicialmente, a construção dos modelos esteve baseada na penalização do indicador espectral NDVI, quando da ocorrência de elementos meteorológicos adversos ao desenvolvimento das plantas com reais implicações na definição do rendimento final de grãos. O modelo M1 representa, justamente, este conceito simples de modelo de estimativa. Além disso, em somente um dos anos estudados o erro da estimativa foi superior a 10%. No presente estudo, este foi considerado um bom resultado,

tendo em vista que erros de até 20%, em modelos espectrais de estimativa de rendimento de grãos de trigo, foram citados por Liu (2007).

Nos modelo M2 e M4 as estimativas modeladas foram semelhantes às estimativas oficiais (Figura 29), e, além dos bons resultados estatísticos, estes modelos mostram a importância dos graus-dia, acumulados ao longo do ciclo da cultura, como indicador do rendimento de grãos.

É importante salientar, no entanto, que indicadores agrometeorológicos e espectral expressos em termos de valores reais, e não em termos de função exponencial, tornam mais simples e prática a inserção destas variáveis de entrada nos modelos.

Os modelos foram elaborados com uma série de dados de apenas sete anos e, nesse contexto, apresentaram resultados muito satisfatórios. Porém, mais estudos são necessários, a fim de que se verifique o comportamento e os resultados das estimativas destes modelos, quando da incorporação de uma série maior de dados espectrais. Para isso, os estudos podem ser conduzidos, futuramente, com um maior número de imagens MODIS e/ou com a ampliação da área de estudo.

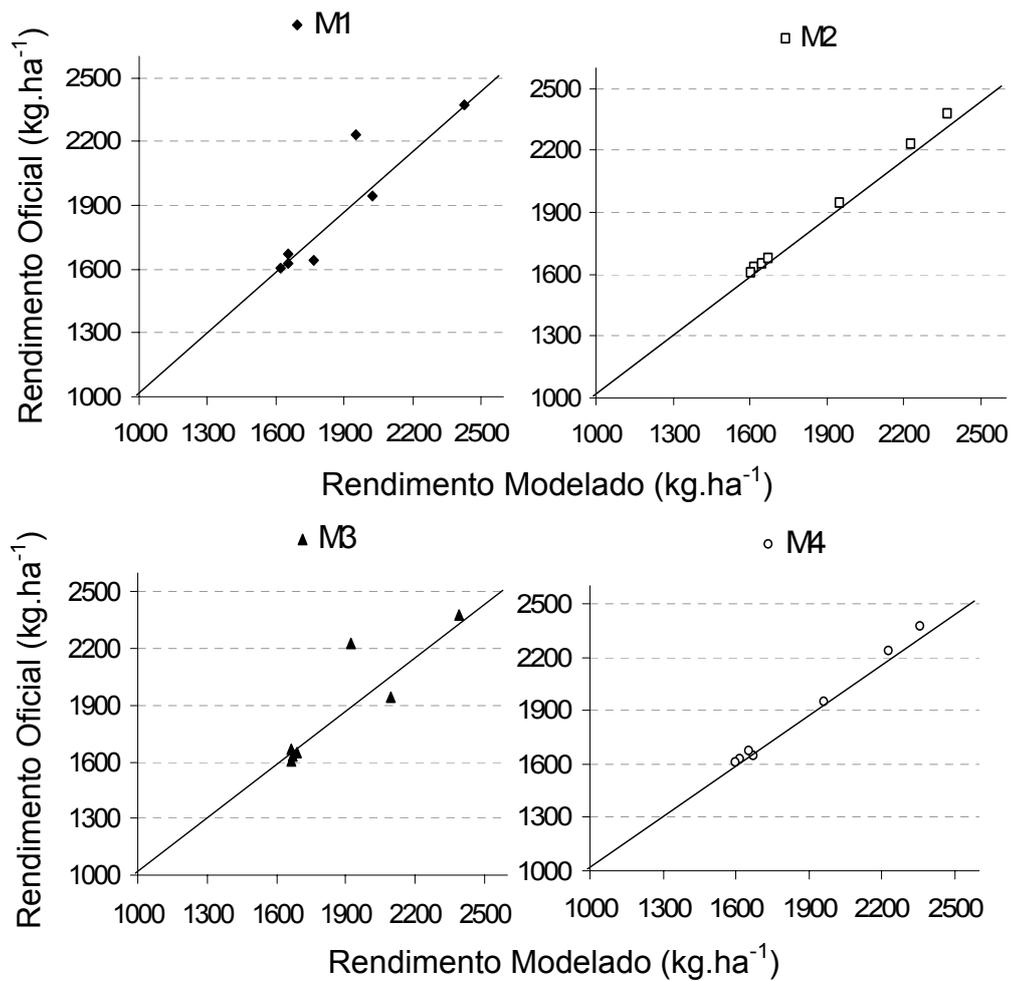


Figura 29. Relação entre rendimento de grãos de trigo ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) oficial e estimado pelos modelos M1, M2, M3 e M4 no período de estudo (2000 a 2006). Região de abrangência da Cotrijal, 2007.

## 5 CONCLUSÕES

Nos municípios pertencentes à região da Cotrijal, as tecnologias de cultivo, existentes até o momento, encontram-se consolidadas. Sendo assim, a região de estudo caracteriza-se por maiores rendimentos médios anuais de grãos de trigo, comparativamente aos rendimentos médios do Estado do Rio Grande do Sul, onde ainda são verificados incrementos anuais decorrentes da incorporação de novas tecnologias de cultivo.

A soma térmica (acumulada ao longo do ciclo da cultura, mais especificamente do estágio vegetativo até a maturação fisiológica); a precipitação pluvial (na etapa final de desenvolvimento dos grãos e na colheita); e a ocorrência de eventos extremos de temperaturas mínimas do ar (geadas por ocasião do florescimento) são considerados indicadores do rendimento de trigo por explicarem, de forma direta e com base fisiológica, a maior parte da variabilidade dos rendimentos desta cultura.

A metodologia máscara de cultivo, de fácil execução e baixo custo, é apropriada para extração do componente espectral de imagens NDVI/MODIS e para a representação da evolução temporal do índice de vegetação, em lavouras de cereais de inverno.

A integração dos valores de NDVI, ocorridos ao longo do ciclo da cultura, é um importante indicador do rendimento de trigo, pois permite uma

adequada caracterização do processo dinâmico (e variável em termos espaciais e temporais) de desenvolvimento da cultura.

Os modelos de estimativa de rendimento de trigo ajustados, construídos a partir de indicadores agrometeorológicos e espectrais, caracterizam de forma adequada as condições ambientais e seus efeitos na definição do rendimento final, apresentando características de precisão, fácil execução, e baixo custo.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO TRIGO. **História do trigo Parte 2: A Triticultura Brasileira**. Disponível em: <[http://www.abitrigo.com.br/historia\\_do\\_trigo2a.asp](http://www.abitrigo.com.br/historia_do_trigo2a.asp)>. Acesso em: 02 ago. 2006.

ALMEIDA, M. L. et al. Cultivares de trigo respondem diferentemente à qualidade da luz quanto à emissão de afilhos e acumulação de massa seca. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.3, p.377-383, 2002.

ASSOCIAÇÃO DOS PRODUTORES DE SEMENTES DO RIO GRANDE DO SUL. **Estatísticas das safras de aveia-preta**. Disponível em: <<http://www.abrasem.com.br/estatisticas/index.asp>>. Acesso em: 19 jan. 2008.

BACALTCHUK, B. Estratégias para viabilizar uma triticultura mais competitiva no Brasil. In: CUNHA, G.R. (Org.). **Trigo, 500 anos no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1999. p.13-18.

BASSOI, M.C. Aspectos gerais da germinação pré-colheita e seu controle genético. In: CUNHA, G. **Germinação pré-colheita em trigo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2004. p.23-45.

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

CAFÉ, S. L. Cadeia Produtiva do Trigo. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n.18, p.193-220, 2003. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/conhecimento/publicacoes/catalogo/setor2.asp>>. Acesso em: 15 maio 2007.

CARMONA, L.C.; BERLATO, M. A. Relação entre elementos meteorológicos e rendimento do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.2, p.289-294, 2002.

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

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: sexto levantamento, março de 2008. Disponível em:  
[www.conab.gov.br/conaweb/download/safra/6\\_levantamento\\_mar2008.pdf](http://www.conab.gov.br/conaweb/download/safra/6_levantamento_mar2008.pdf)

CROMEY, M. G Effects of frost during grain filling on wheat yield and grain structure. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, Christchurch, v.26, p.279-290, 1998.

CUNHA, G. R. et al. **Zoneamento agrícola e época de semeadura para trigo no Rio Grande do Sul**. Embrapa Trigo-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento on line, Passo Fundo, n.2., 1999a. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/publicacoes/puboltri>>. Acesso em: 25 jul. 2006.

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, 1999b.

CUNHA, G. R. et al, El Nino-Oscilação do Sul e seus impactos sobre a cultura de cevada no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n.1, p.137-145, 2001.

CUNHA, G.R. Clima e cevada cervejeira no Brasil: análise da safra 2001 e perspectivas climáticas para a safra 2002. In: REUNIÃO ANUAL DE PESQUISA DE CEVADA, 22., 2002, Passo Fundo. **Anais e Ata...** Passo Fundo, 2002. p.27-37.

CUNHA, G.R. 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. Por que variam o rendimento e a qualidade tecnológica na cultura do trigo. **Informativo Fundação Pró-Sementes e Apassul**, Passo Fundo, n.18, p.4-5, 2006a.

CUNHA, G. R. Estresses térmicos em trigo. **Informativo Embrapa Trigo**, Passo Fundo, n.19, p.2-3, 2006b.

EMBRAPA TRIGO. **Informações gerais sobre a cultura do trigo**. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/trigo>>. Acesso em: 25 jul. 2006.

EMBRAPA TRIGO. **Normais Climatológicas (1960-1990) Passo Fundo-RS.** Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/app/principal/normais.phpl>>. Acesso em: 20 abr. 2007.

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**, Victoria, v.3, n.1, p.1-16, 2007.

GUARIENTI, E.M. et al. Avaliação do efeito de variáveis meteorológicas na qualidade industrial e no rendimento de grãos de trigo pelo emprego de análise dos componentes principais. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.23, n.3, p.500-510, 2003.

HAMADA, E.; PINTO, H.S. Avaliação do desenvolvimento do trigo utilizando medidas radiométricas em função de graus-dia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. p.95-101.

IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola.** Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric>. Acessos diversos.

IBGE. Pesquisas Agropecuárias. **Série Relatórios Metodológicos.** 2 ed. v.6. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. 92p.

IGNACZAK, J.C. et al. Dinâmica da produção de trigo no Brasil no período de 1975 a 2003. **Embrapa Trigo-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento on line**, Passo Fundo, n.36. 2006. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/publicacoes/puboltri>>. Acesso em: 22 jun.2007.

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

JUNGES, A.H. et al. Avaliação das perdas de rendimento de trigo na safra 2006 na região do Planalto do Rio Grande do Sul através da análise de temperaturas mínimas do ar e de superfície. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracaju. **Anais....**Aracaju: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007. DOC0116. 1 CD-ROM.

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

LIU, W.T.H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto.** Campo Grande: Uniderp, 2007. 908p. Cap.12: Previsão de safra agrícola.

MELO, R.W. et al. Modelo Agrometeorológico-Espectral de Estimativa de Rendimento da Soja para o Estado do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos:INPE, 2003. p.173-179.

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.

MUNDSTOCK, C. M. **Planejamento e Manejo Integrado da Lavoura de Trigo**. Porto Alegre: Evangraf, 1999. 227p.

NASA-National Aeronautics and Space Administration. **MODIS Website**. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>>. Acessos diversos.

NEDEL, J.L. et al. Variação e associação de características ligadas a formação do grão de genótipos de trigo **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.56, n.4, p.1255-1260, 1999.

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

RABELO, P.M. **Mercado de Trigo-Conjuntura e Cenário no Brasil e no Mundo**. Disponível em: [www.conab.gov.br/conabweb/download/cas/especiais/texto\\_para\\_revista\\_paulo\\_magno.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/cas/especiais/texto_para_revista_paulo_magno.pdf)>. Acesso em: 15 maio 2007.

REUNIÃO DA COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 38., 2006, Passo Fundo. **Informações Técnicas para a safra 2007: trigo e triticale**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006. 114 p.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Planejamento e Gestão. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <http://www.scp.rs.gov.br/ATLAS>>. Acesso em: 27 ago. 2006.

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

RODRIGUES, O. et al. Modelo para previsão de estádios de desenvolvimento em trigo. **Embrapa Trigo-Circular técnica on line**, Passo Fundo, n.5. 2001a. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/publicacoes/puboltri>>. Acesso em: 20 ago. 2006.

RODRIGUES, O. et al. Desenvolvimento de trigo: efeito da temperatura. **Embrapa Trigo-Circular técnica on line**, Passo Fundo, n.3. 2001b. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/publicacoes/puboltri>>. Acesso em: 20 ago. 2006.

RODRIGUES, O. et al. Características fisiológicas associadas ao avanço no potencial de rendimento de grãos de trigo. **Embrapa Trigo-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento on line**, Passo Fundo, n.6., 2002. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/publicacoes/puboltri>>. Acesso em: 25 jul. 2006.

SCHEREN, P.L. et al. Efeito do frio em trigo. **Embrapa Trigo-Comunicado Técnico on line**, Passo Fundo, n.57, 2000. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/publicacoes/puboltri>>. Acesso em: 25 ago. 2006.

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**. Madri : Universidad Politécnica, 2005. 384 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrônômica)- Universidad Politécnica de Madri, Madri, 2005.

SHROYER, J.P.; MIKESSEL, M.E.; PAULSEN, G.M. **Spring freeze injury to Kansas wheat**. Manhattan: Kansas State University, 1995. 12 p. Disponível em: <<http://www.oznet.ksu.edu/library/crpsl2/C646.pdf>>. Acessos diversos.

SILVA, F.C. et al. **Simulação do Crescimento e Desenvolvimento do Trigo Irrigado Utilizando o Modelo CERES-Wheat na Região de Campinas-SP**. Campinas : Embrapa Informática Agropecuária, 2002. Circular Técnica, 2. Disponível em: <http://www.cnptia.embrapa.br/publica/2002/circctec2.pdf>. Acesso em: 15 set. 2007.

SUGAWARA, L. **Avaliação de modelo agrometeorológico e de imagens NOAA/AVHRR no acompanhamento e estimativa de produtividade da soja no Estado do Paraná**. São José dos Campos: INPE, 2001. 181f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

VIEIRA, E.A. et al. Análise de trilha entre os componentes primários e secundários do rendimento de grãos em trigo. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.13, n.2, p.169 -174, 2007.

## **7 APÊNDICES**

### **1. Avaliação das perdas de rendimento de trigo na safra 2006, na região do Planalto do Rio Grande do Sul, através da análise de temperaturas mínimas do ar e de superfície<sup>3</sup>**

#### **Introdução**

A produção brasileira de trigo, na safra 2006, sofreu expressiva redução de 51,9%, em relação à safra anterior, sendo a menor dos últimos cinco anos. De acordo com o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), tal queda foi conseqüência da retração na área plantada (baixos preços), da difícil comercialização do produto (concorrência com o produto importado) e das condições meteorológicas (IBGE, 2007).

No Rio Grande do Sul, segundo avaliação de campo, a produtividade média, de cerca de 1.027 kg.ha<sup>-1</sup>, foi conseqüência das geadas ocorridas no mês de setembro, que atingiram fortemente o desenvolvimento das plantas e a qualidade do grão (Agrolink 2006).

A formação da geada se dá pela sublimação do vapor d'água do ar e causa, nas plantas, um estresse térmico que afeta negativamente diversos processos fisiológicos relacionados ao crescimento e desenvolvimento, bem como o rendimento final da lavoura e a qualidade dos grãos (Cunha, 2006b). No sul do Brasil, a geada é um dos fenômenos mais relevantes para a

---

<sup>3</sup> Apresentado no XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia , Aracaju – SE, 2007.

cultura do trigo, sendo determinante da época de semeadura para cada região (Mundstock, 1999). Durante a fase de florescimento, as plantas são extremamente sensíveis às baixas temperaturas, embora a sensibilidade da cultura aumente já a partir do emborrachamento. Geadas nestes períodos podem causar danos severos, tais como redução no número de grãos por espiguetas e, conseqüentemente, por espiga. (Mundstock, 1999).

O objetivo deste trabalho foi avaliar as perdas de rendimento de trigo, ocorridas na safra 2006, na principal região tritícola do Rio Grande do Sul, através da análise das temperaturas mínimas do ar registradas em estação meteorológica e das temperaturas de superfície calculadas com uso de imagens do satélite NOAA-12 (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

### **Material e Métodos**

A área de estudo compreende treze municípios ao norte do Estado do Rio Grande do Sul, principal região produtora de cereais de inverno (trigo, cevada e aveia) no Estado. De acordo com a classificação climática de Köppen (1948), a região de estudo situa-se na Zona Climática Fundamental Temperada (C), apresentando clima do tipo fundamental úmido (f), com chuva bem distribuída durante o ano, e variedade específica subtropical (Cfa), com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C.

Os dados de rendimento médio de trigo, para as safras agrícolas de 2000 a 2005, foram provenientes do IBGE. Já os valores referentes à safra 2006 foram disponibilizados por técnicos da Cooperativa Tritícola Mista Alto Jacuí Ltda - COTRIJAL. Para cada município foi determinada a média de

rendimento nas safras de 2000 a 2005 e o desvio da média ocorrido na safra 2006. Posteriormente, foi elaborada uma figura dos desvios de rendimento verificados em 2006.

Os dados de temperatura mínima do ar foram obtidos da estação meteorológica localizada no município de Passo Fundo/RS e pertencente à rede de estações do 8º Distrito do Instituto Nacional de Meteorologia – 8ºDISME/INMET. Foram analisados os meses de julho a outubro, período que compreende as principais etapas do ciclo de desenvolvimento da cultura (vegetativo, florescimento, emborrachamento e enchimento de grão).

Imagens da passagem do satélite NOAA-12, sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), do início da manhã foram obtidas do arquivo permanente de dados do Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia - CEP SRM/UFRGS. Para os dias com temperaturas abaixo de 0°C, e com disponibilidade de imagens do satélite, foram calculadas as temperaturas da superfície usando o método de Sobrino et al., 1993 (Gusso *et al.*, 2007). Destas imagens foram extraídos os valores de temperatura da superfície para uma janela de 3x3 *pixels*, centrados sobre a estação meteorológica de Passo Fundo, e comparados com os dados observados na mesma. Foram determinadas, também, as temperaturas médias da superfície dos municípios da área de estudo.

É importante salientar que, para uma melhor caracterização da magnitude dos danos causados pela geada na safra 2006, a mesma foi comparada com a safra de trigo do ano de 2003, considerado um dos melhores para a triticultura gaúcha.

## Resultados e Discussão

Os resultados mostram (Figura 1) que, dos treze municípios estudados, nove tiveram redução significativa de rendimento na safra 2006, com perdas de 426 kg.ha<sup>-1</sup> (Não-Me-Toque) a 817 kg.ha<sup>-1</sup> (Lagoa dos Três Cantos).

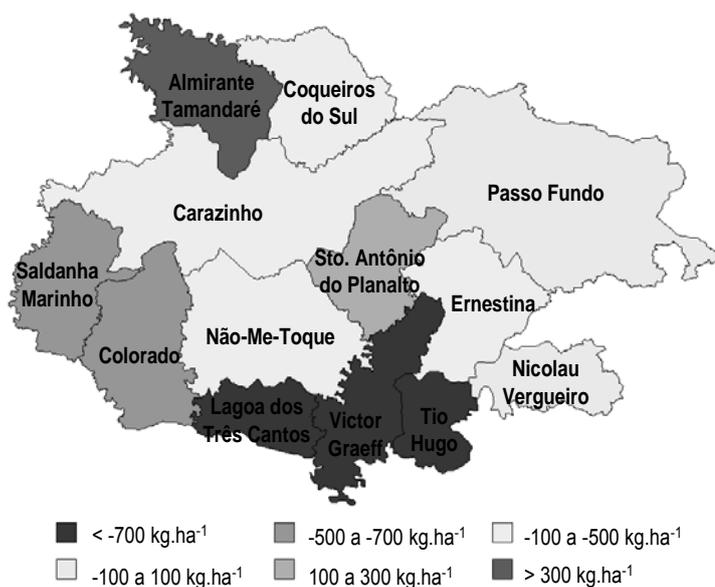


Figura 1. Desvios de rendimento de lavouras de trigo (kg.ha<sup>-1</sup>) na safra 2006, em 13 municípios da região do Planalto do Rio Grande do Sul. Cotrijal, 2007.

Na safra 2006 ocorreram sete dias com valores de temperatura mínima do ar inferiores a 0°C, considerada, neste trabalho, como a temperatura a partir da qual podem ocorrer danos ao trigo, especialmente nas áreas mais baixas do relevo (Scheeren, 2000). Nesta safra, o rendimento médio do trigo na região foi de 1.593 kg.ha<sup>-1</sup>. Já em 2003 os rendimentos foram muito superiores (2.351 kg.ha<sup>-1</sup>), com ocorrência de somente dois dias de temperaturas baixas, ambos, no mês de julho. Em julho as lavouras de trigo se encontravam em estágio vegetativo. Por sua

vez, em 2006, das sete geadas registradas, três ocorreram no mês de setembro, quando as lavouras se encontram no final do período vegetativo e/ou início do florescimento.

Tão importante quanto a quantificação do número de dias com temperatura capaz de causar danos às plantas, é a verificação do quão baixa foi a temperatura do ar, pois sabe-se que o grau de dano depende do quão baixa é a temperatura e da duração do período de exposição. Neste sentido, exposições prolongadas as baixas temperaturas causam maiores danos às plantas do que exposições breves (Shroyer *et al.*, 1995). A Figura 2 mostra a evolução temporal das temperaturas mínimas registradas na estação meteorológica, sendo observados quatro eventos de baixas temperaturas no período: 31 de julho ( $-1,7^{\circ}\text{C}$ ), 21 de agosto ( $-0,5^{\circ}\text{C}$ ), 22 de agosto ( $-1,3^{\circ}\text{C}$ ) e 5 de setembro ( $-2,5^{\circ}\text{C}$ ).

Para a cultura do trigo, geadas tardias (primaveris), ou seja, aquelas que ocorrem nos meses de agosto e setembro são as de maior risco. Isto é válido especialmente em anos em que a cultura tem o desenvolvimento acelerado por altas temperaturas nas fases iniciais do ciclo (meses de junho e julho), como ocorreu em 2006, pois o florescimento é o período de maior sensibilidade da cultura. Sendo assim, as geadas ocorridas em final de agosto e início de setembro provavelmente foram responsáveis pela queda de rendimento ocorrida na maioria dos municípios estudados. Este resultado está de acordo com a porcentagem de quebra de safra decorrentes de eventos meteorológicos divulgada pela EMATER (Figura 3), os quais indicam quebra de safra de trigo a partir da segunda quinzena de agosto e primeira quinzena de setembro.

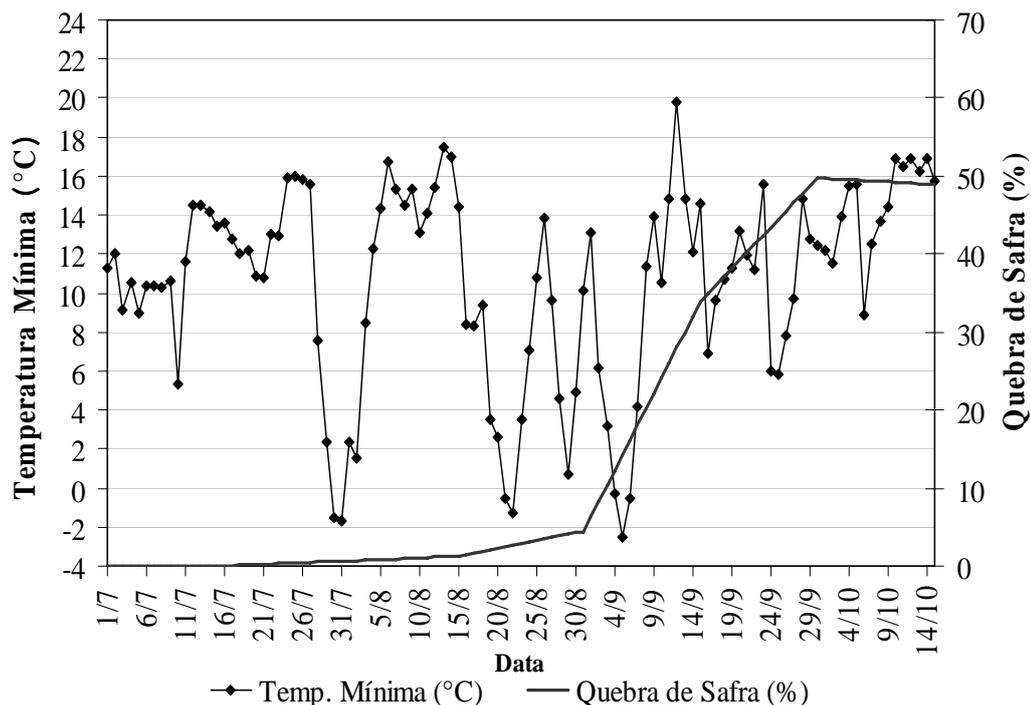


Figura 2. Temperaturas mínimas de julho a outubro e quebra de safra (produção), decorrente de eventos meteorológicos, estimada pela EMATER. Passo Fundo (RS), 2006. Fonte dos dados: 8ºDISME/INMET e EMATER, 2007.

As possíveis conseqüências da ocorrência destas geadas são: permanência de espigas no interior da folha-bandeira ou emergindo estéreis, clorose de aristas, formação de anel de congelamento e esterilidade das estruturas reprodutivas (anteras e óvulos). Em virtude do trigo ser uma planta de auto fecundação, a esterilidade decorrente de injúria por frio é responsável pela redução do rendimento final de grãos, com pouco ou nenhum grão formado por espiga (Shroyer *et al.*, 1995).

Injúrias no início do florescimento provocam morte de anteras e embriões, especialmente nas espiguetas da porção central da espiga, as primeiras a florescer. Caso o dano ocorra na fase final do florescimento, os grãos, em início de formação, serão afetados independentemente da posição na espiga (Cromei, 1998).

Os dados de temperatura do ar, provenientes de estação meteorológica, são pontuais, ou seja, representam as condições observadas numa área restrita, próxima do ponto de medição. Como a temperatura do ar é um elemento com alta associação com o relevo local, a extrapolação do valor medido em estação para regiões mais amplas apresenta importantes restrições. Em uma análise regional, imagens NOAA/AVHRR podem contribuir para a espacialização mais adequada das temperaturas da superfície (Gusso *et al.*, 2007), as quais correspondem a um valor de temperatura mais próxima da real temperatura, percebida pelas plantas, e que são potenciais causadoras de danos às mesmas.

A diferença entre a temperatura medida na estação meteorológica e a obtida por satélite foi de 1°C no dia 22 de agosto e de 1,2°C no dia 6 de setembro, sempre menor na superfície, como consequência da inversão térmica noturna. As temperaturas da superfície obtidas nas imagens NOAA são mostradas na Figura 4. Verifica-se que, em toda a região de estudo, as temperaturas da superfície foram negativas, sendo em média, de -2,33°C no dia 22 de agosto e de -2,18°C no dia 6 de setembro. Apesar das médias semelhantes, foram verificadas diferenças na distribuição espacial das temperaturas.

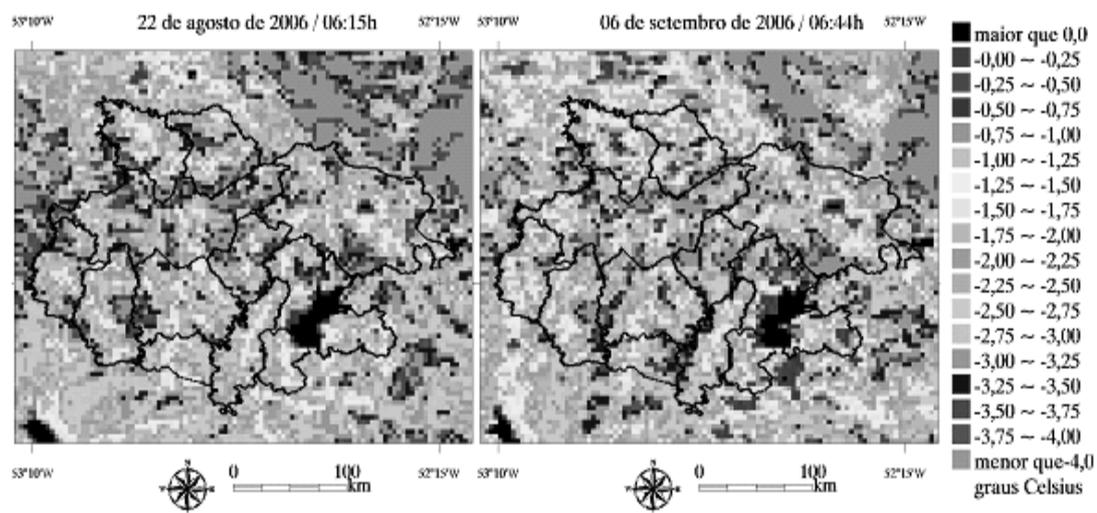


Figura 3. Temperaturas da superfície obtidas de imagens NOAA-12. Cotrijal, 2007.

### Conclusões

A safra 2006 caracterizou-se pela expressiva queda de rendimento nas lavouras de trigo, localizadas ao norte do Rio Grande do Sul, com desvios negativos de até  $817 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , em relação à média das safras anteriores (2000 a 2005). Geadas ocorridas em final de agosto e início de setembro, período no qual as lavouras se encontravam na fase final de desenvolvimento vegetativo e/ou início do florescimento, comprometeram o adequado desenvolvimento das plantas e afetaram o rendimento final das lavouras.

## **2. Estudo de Caso: Quebras de safra de trigo decorrentes de eventos meteorológicos estimadas pela EMATER-RS**

### **Introdução**

A cada ano, em função de eventos meteorológicos e/ou ocorrência de pragas e moléstias, há uma redução da quantidade de grãos colhidos, frente às estimativas de safra realizadas por ocasião do plantio ou ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas agrícolas. As quebras de safra têm impactos sobre as políticas de definição de preços (particularmente do preço final ao consumidor), de planejamento dos estoques públicos e das importações (segurança alimentar regional ou nacional).

No Estado do Rio Grande do Sul, o desenvolvimento da planta de trigo, a definição do rendimento final e, conseqüentemente, as possíveis quebras de safra, estão relacionados, principalmente, às variáveis meteorológicas precipitação pluvial, temperatura e umidade relativa do ar. Nesse sentido, sabe-se que o rendimento de grãos de trigo é negativamente afetado por:

1. O excesso de precipitação pluvial, coincidente com a maturação e a colheita do trigo, prejudica o rendimento e a qualidade do grão (Cunha, 1999), especialmente em função da germinação pré-colheita - principal responsável por diminuição do peso do hectolitro e peso de mil grãos decorrente da alta respiração e do consumo de carboidratos acumulados nos grãos (Guarienti, 2003).

2. A alta umidade relativa do ar (acima de 90%), especialmente em associação com altas temperaturas do ar, favorece a ocorrência de moléstias foliares, tais como ferrugem, giberela e helmintosporiose.

3. As baixas temperaturas são prejudiciais às plantas de trigo quando ocorrem no estágio de florescimento, pois provocam esterilidade das estruturas reprodutivas (anteras e óvulos) e, conseqüentemente, poucos ou nenhum grão formado por espiga.

Os danos característicos são, portanto, esterelidade (total ou parcial) da espigueta e enchimento parcial ou nulo de grãos.

A Associação Riograndense de Empreendimentos de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER) estima, quinzenalmente, a quebra de safra das principais culturas agrícolas do Estado do Rio Grande do Sul, em termos de porcentagem da produção, decorrentes de eventos meteorológicos, de pragas ou moléstias.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo de caso, baseado nas quebras de safra de trigo no Rio Grande do Sul, estimadas pela EMATER, nos anos de 2003 a 2006, a fim de verificar e quantificar os efeitos das variáveis meteorológicas; precipitação pluvial, temperatura e umidade do ar.

### **Material e Métodos**

Os dados referentes à quebra de safra de trigo, no Estado do Rio Grande do Sul, para os anos de 2003 a 2006, foram disponibilizados pela EMATER e podem ser visualizados na Figura 1.

O município de Passo Fundo, juntamente com outros 68 municípios pertencentes à Regional EMATER Passo Fundo, compõe uma das principais

regiões tritícolas do Estado, responsável por 22% da produção de trigo do Rio Grande do Sul, na média dos últimos dezesseis anos (1990 a 2005). Sendo assim, para o presente estudo, foram utilizados os dados meteorológicos mensais da Estação Meteorológica de Passo Fundo, pertencente à rede de estações do 8º Distrito do Instituto Nacional de Meteorologia – 8ºDISME/INMET. Os dados da Normal Climatológica 1960-1990 de Passo Fundo foram obtidos junto à Embrapa Trigo (disponíveis em: [http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/cli\\_pf1.html](http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/cli_pf1.html)).

O efeito das variáveis meteorológicas, precipitação pluvial, temperatura e umidade do ar, ao longo das diversas etapas do ciclo de desenvolvimento da planta de trigo, foi analisado tendo como base o Calendário de Acompanhamento de Lavouras de Trigo para região de Passo Fundo (médias das safras 2003 a 2006) (Figura 2).

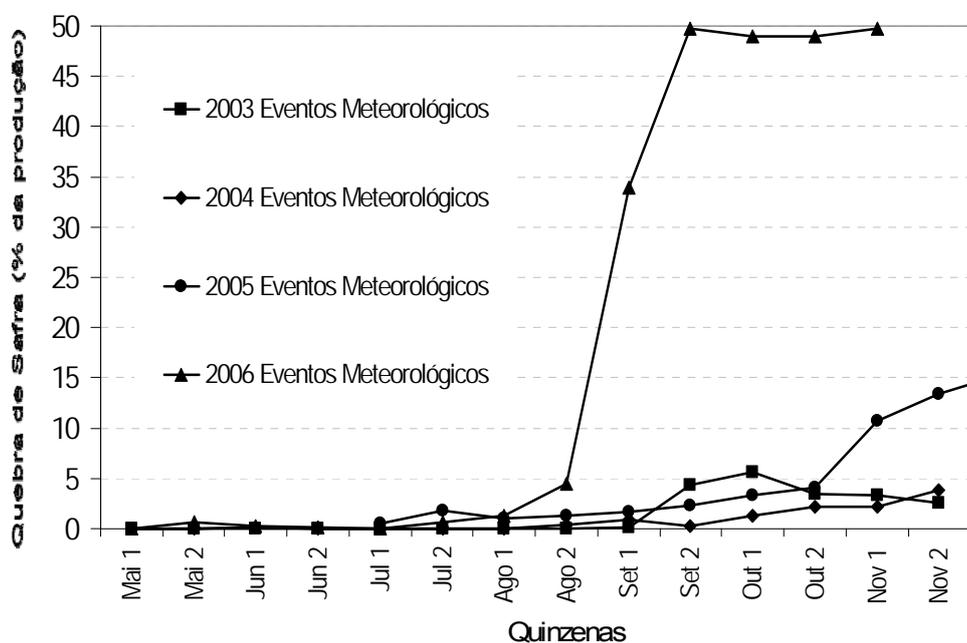


Figura 1. Quebras de safra de trigo estimadas pela EMATER como decorrentes de eventos meteorológicos. Fonte dos dados: EMATER, 2007.

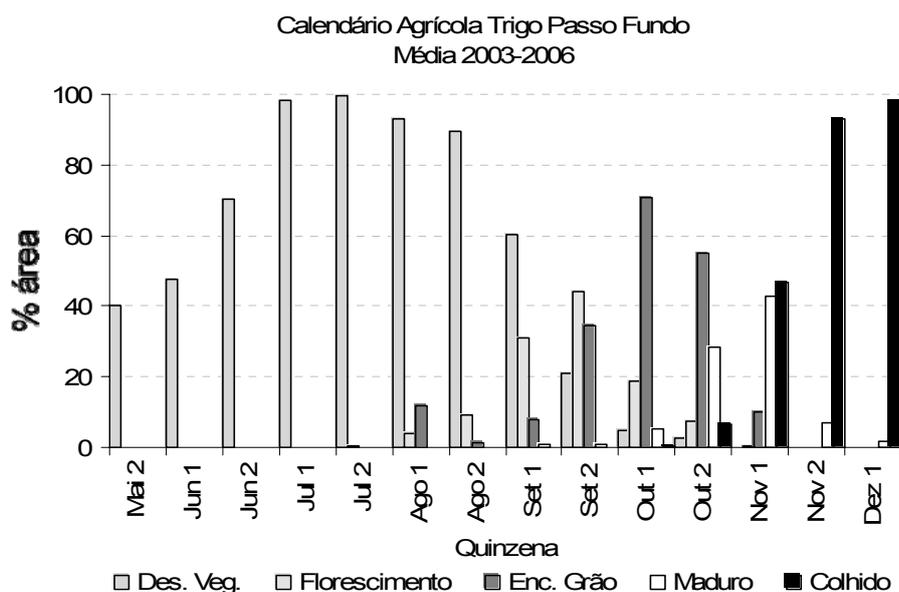


Figura 2. Calendário médio de acompanhamento de lavouras de trigo na Região de Passo Fundo, RS. Fonte: EMATER, 2007.

### Resultados e Discussão

No ano de 2006, a produção total de trigo no Rio Grande do Sul foi de 700 mil toneladas de grãos, cultivadas em uma área de 693 mil hectares. A baixa produtividade média, cerca de  $1.027 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , foi consequência, principalmente, de geadas que comprometeram fortemente o desenvolvimento das lavouras e a qualidade do grão. A quebra de safra em 2006 atingiu, partir da segunda quinzena de agosto, cerca de 50% da produção, na média do Estado. Em uma análise das temperaturas mínimas do ar ocorridas em Passo Fundo, de julho a novembro, período que compreende as principais etapas do ciclo de desenvolvimento da cultura (vegetativo, florescimento, emborrachamento e enchimento de grão), verifica-se a ocorrência de quatro eventos extremos: 31 de julho ( $-1,7^{\circ}\text{C}$ ), 21 e 22 de agosto ( $-0,5^{\circ}\text{C}$  e  $-1,3^{\circ}\text{C}$ , respectivamente) e 5 de setembro ( $-2,5^{\circ}\text{C}$ ) (Figura 3).

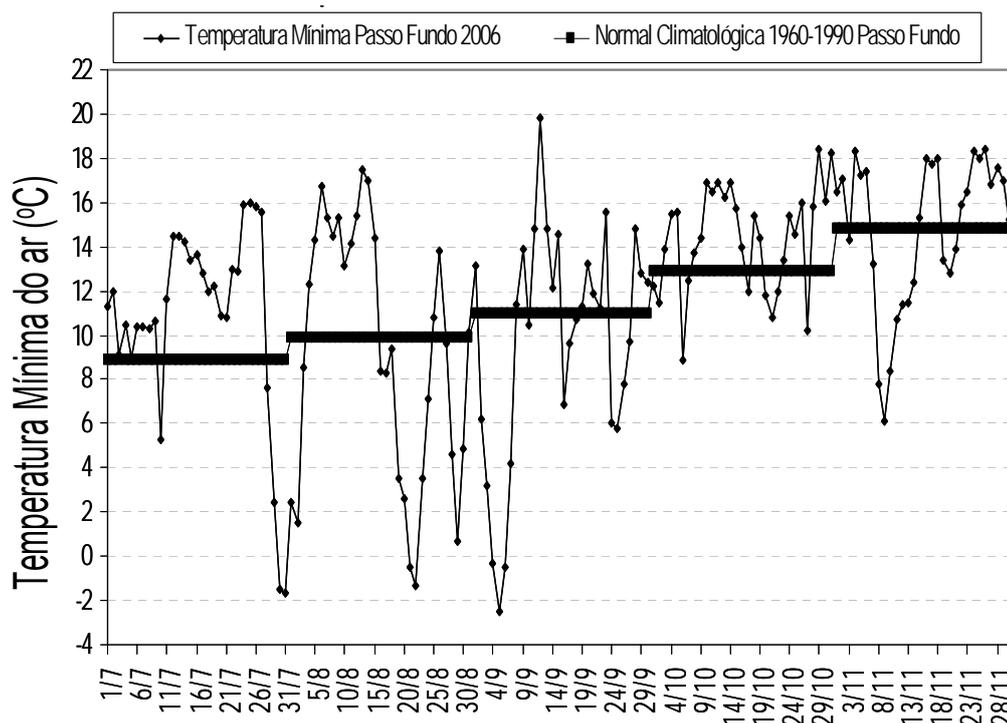


Figura 3. Temperaturas mínimas do ar diárias de julho a novembro. Passo Fundo (RS), 2006. Fonte dos dados: 8°DISME/INMET, 2007.

As geadas ocorridas em final de agosto e início de setembro, foram as responsáveis pela quebra de safra de trigo em 2006 (Apêndice 1).

Em 2005 a quebra de safra chega a 15% a partir da segunda quinzena de outubro, fato este que evidencia que os eventos meteorológicos afetaram as lavouras em estágio de enchimento de grão ou maturação fisiológica (Figura 2). Nestas etapas finais do desenvolvimento das plantas, a precipitação pluvial é a principal variável associada a quebra de safra, pois o excesso de precipitação pluvial atrasa a colheita e favorece a germinação pré-colheita, principal responsável por diminuição do peso do hectolitro e peso de mil grãos, em função da alta respiração e de consumo de carboidratos acumulados nos grãos (Guarienti, 2003).

O excesso de precipitação pluvial, especialmente no mês de outubro, pode ser confirmado como fator responsável pela quebra de safra de 2005,

através da Figura 4, na qual consta a precipitação pluvial total e o número de dias com precipitação pluvial nos meses de outubro e novembro de 2005.

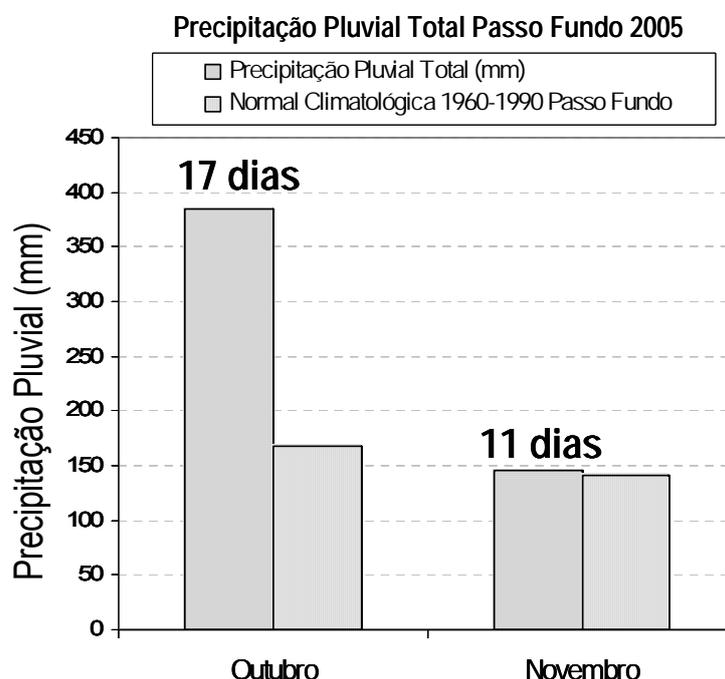


Figura 4. Precipitação pluvial total em outubro e novembro. Passo Fundo (RS), 2005. Fonte dos dados: 8ºDISME/INMET, 2007.

No ano de 2004, a quebra de safra foi muito inferior, comparativamente aos anos analisados anteriormente, não chegando a 5% da produção. Sendo assim, para o presente estudo de caso, o ano de 2004 exige uma caracterização contrária, ou seja, dada a pequena quebra de safra, foram analisadas as condições meteorológicas que caracterizaram este ano.

Como pode ser visualizado na Figura 5, em 2004, não ocorreram geadas próximas ao florescimento (apenas um único evento extremo no início de julho, quando as plantas se encontram em estágio vegetativo e são, conseqüentemente, menos suscetíveis ao estresse causado pelo frio). Da mesma maneira, não ocorreu excesso de precipitação pluvial no final do ciclo (Figura 6): a precipitação pluvial total, de outubro e novembro de 2004,

foi semelhante à Normal Climatológica e inferiores aos valores prejudiciais à cultura registrados em 2005.

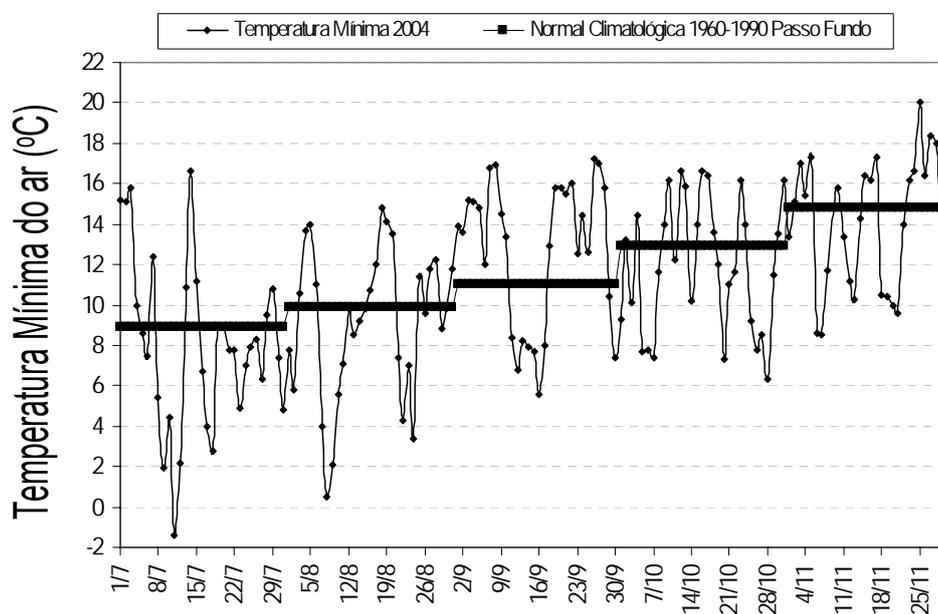


Figura 5. Temperaturas mínimas diárias de julho a novembro. Passo Fundo (RS), 2004. Fonte dos dados: 8ºDISME/INMET, 2007.

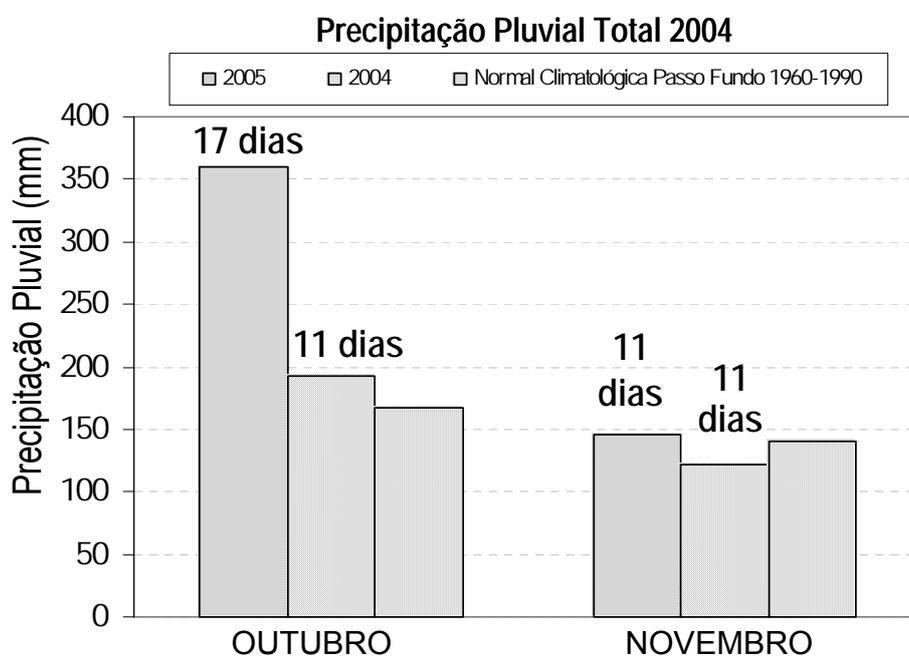


Figura 6. Precipitação Pluvial total de outubro e novembro. Passo Fundo (RS). Fonte dos dados: 8ºDISME/INMET, 2007.

Por sua vez, as temperaturas médias do ar (Figura 7) e a umidade relativa do ar (Figura 8), referentes ao mês de setembro de 2004, foram superiores à Normal Climatológica. A alta umidade do ar, especialmente associada a altas temperaturas, favorece a ocorrência de pragas e de moléstias foliares, tais como ferrugem, giberela e helmintosporiose. Ou seja, estas variáveis meteorológicas podem estar indiretamente associadas às quebras de safras, tal como ocorreu no ano de 2004, quando, diferentemente dos demais anos analisados, a quebra estimada pela EMATER, como decorrente de pragas e moléstias, foi superior à quebra estimada como decorrente de eventos meteorológicos (Figura 9).

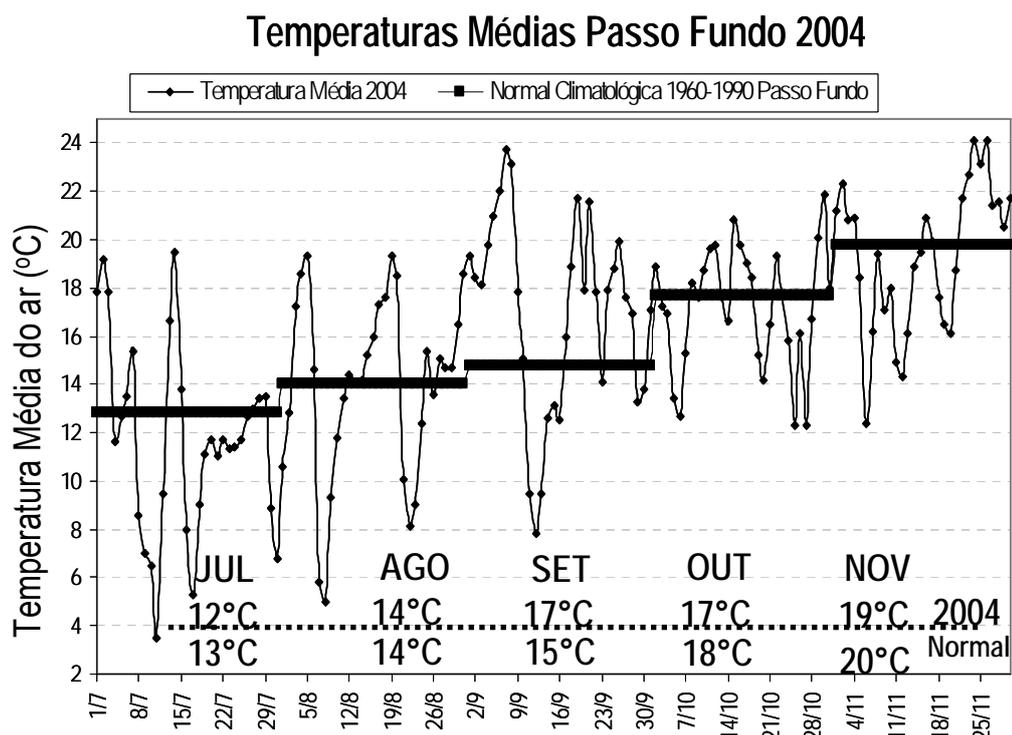


Figura 7. Temperaturas médias do ar diárias de julho a novembro. Passo Fundo (RS), 2004. Fonte dos dados: 8ºDISME/INMET, 2007.

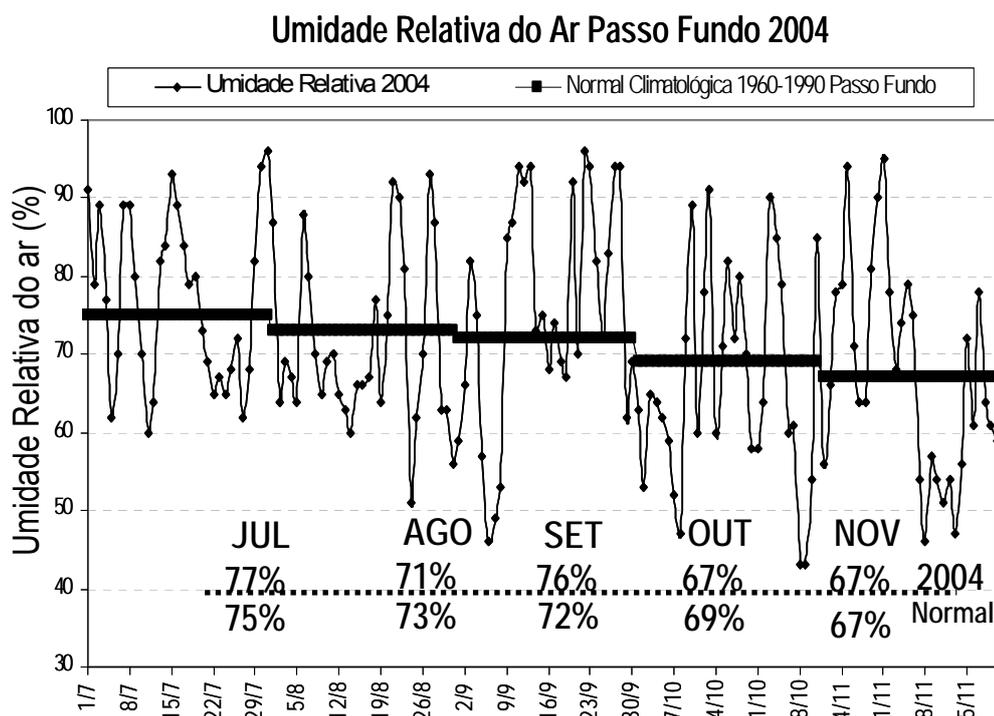


Figura 8. Umidade relativa do ar diária de julho a novembro. Passo Fundo (RS), 2004. Fonte dos dados: 8ºDISME/INMET, 2007.

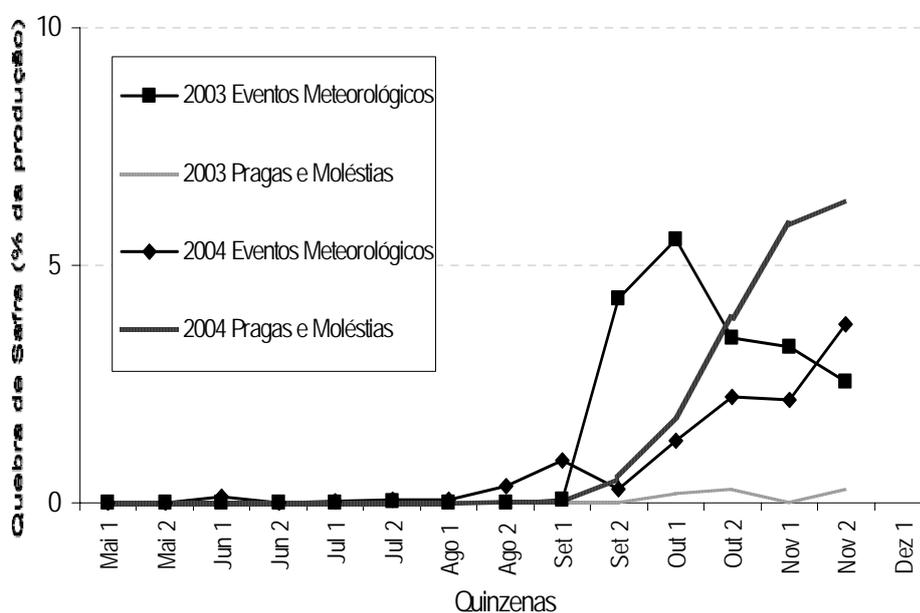


Figura 9. Quebra de safra estimada pela EMATER como decorrente de evento meteorológico (linha cheia) e de pragas e moléstias (linha detalhada). Fonte dos dados: EMATER, 2007.

No ano de 2003, o rendimento médio de trigo do Estado foi de 1.757 kg.ha<sup>-1</sup>, o maior dos últimos treze anos. A quebra de safra foi inferior a 5%, confirmando este ano como um dos melhores para a triticultura gaúcha. Sendo assim, em 2003, não ocorreram eventos meteorológicos, pragas ou doenças que comprometessem as lavouras de trigo, tais como aqueles analisados nos anos anteriores.

Os principais eventos meteorológicos associados à quebra da safra de trigo nos últimos anos foram, basicamente, a ocorrência de geadas no florescimento, com temperaturas mínimas do ar próximas ou inferiores a -2°C; e excesso de precipitação pluvial no enchimento de grãos, maturação fisiológica e colheita. Nestes casos, a quebra de safra foi superior a 10% da produção. Além disso, as variáveis meteorológicas, tais como temperatura e umidade relativa do ar, também estão associadas, de maneira indireta, à quebra de cerca de 5% da produção de trigo, decorrente de pragas e moléstias.

### **Conclusões**

As quebras de safra, da principal região tritícola do Rio Grande do Sul, são decorrentes da ocorrência de geadas no florescimento ou de excesso de precipitação pluvial na fase final de desenvolvimento das plantas (enchimento de grão e maturação) e colheita. Tais informações podem auxiliar na melhor compreensão do efeito das variáveis meteorológicas no rendimento final das lavouras, de maneira a orientar trabalhos de extensão rural e de pesquisas que visem incrementar a produção de trigo, e demais cereais de inverno, no Estado.