

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO  
E METEOROLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

AVALIAÇÃO DO USO DE IMAGENS MODIS NA MODELAGEM  
AGROMETEOROLÓGICA-ESPECTRAL DE RENDIMENTO DE ARROZ IRRIGADO  
NO RIO GRANDE DO SUL

Eliana Velda Klering  
Meteorologista (UFPel)

Dissertação apresentada como um dos  
requisitos à obtenção do Grau de  
Mestre em Sensoriamento Remoto  
Área de concentração Agrometeorologia

Porto Alegre, RS, BRASIL  
Agosto de 2007

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Prof<sup>a</sup>. Denise Fontana pela oportunidade, paciência, confiança, e, principalmente, pelo exemplo profissional. E, expresso também, minha admiração por seu exemplo de dedicação e contribuição à pesquisa e ao ensino.

Ao meu co-orientador preferido Prof. Moacir Berlato pelos ensinamentos e pelo apoio fundamental para realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia pela possibilidade de realização deste curso e a CNPq pela concessão da bolsa de estudo.

Agradeço imensamente a meus pais, Tânia e Silvestre, pessoas que amo muito, que sempre me incentivaram e principalmente me apoiaram em todos os momentos da minha vida com muito amor e carinho. Sou uma pessoa extremamente feliz por ter vocês ao meu lado, sempre me indicando o caminho certo a seguir com seus exemplos de vida e principalmente pelo amor que sempre me deram.

Ao meu irmão Gabriel pelo carinho e amizade, sempre compreendendo e entendendo a minha ausência.

Àquele que com sua presença, incentivo moral, conselhos, amizade, fidelidade e principalmente otimismo me ajudou a nunca desistir e seguir em frente sempre. Àquele que amo e respeito em todas as suas maneiras de ser e pensar, aquele a quem com muitas diferenças me fez repensar meus conceitos e crescer como ser humano também, meu agradecimento de coração ao meu namorado Eduardo Muñoz.

A amiga e irmã do coração Lidiane Ibeiro pela eterna amizade, compreensão e convivência diária durante todo o período de realização deste trabalho.

A todos os colegas do Projeto GeoSafras. Em especial aos amigos Ana Paula Wagner e Ricardo Wanke de Melo.

Aos colegas de turma do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto.

Aos funcionários e professores do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia.

Aos colegas, funcionários e professores do Departamento de Agrometeorologia.

As colegas Maria Custódio e Loana Cardoso, pela ajuda durante esse período tornando-nos mais que colegas, grandes amigas.

E por fim, porém não menos importante agradeço a Deus.

AVALIAÇÃO DO USO DE IMAGENS MODIS NA MODELAGEM  
AGROMETEOROLÓGICA-ESPECTRAL DE RENDIMENTO DE ARROZ IRRIGADO  
NO RIO GRANDE DO SUL<sup>1</sup>

Autor: Eliana Veleda Klering  
Orientador: Dr.<sup>a</sup> Denise Cybis Fontana  
Co-orientador: Dr. Moacir Antônio Berlatto

**RESUMO**

Baseado na demanda de instituições oficiais para geração de informações objetivas sobre o rendimento da cultura do arroz irrigado, o objetivo deste trabalho foi avaliar a possibilidade do uso de imagens MODIS na estimativa de rendimento de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. O estudo foi realizado usando-se dois conjuntos de dados abrangendo as seis regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. O primeiro conjunto, referentes às safras 1982/1983 até 2005/2006, foi de dados meteorológicos de temperatura mínima do ar, radiação solar global e dados de estatísticas agrícolas de rendimento e área cultivada de arroz irrigado. O segundo conjunto considerou as imagens dos índices de vegetação NDVI e EVI provenientes do sensor MODIS, das safras de 2000/2001 até 2005/2006. A partir desses dados foram feitas análises de tendência tecnológica dos rendimentos e estabelecidos os indicadores agrometeorológicos e espectrais para o ajuste de modelos de estimativa de rendimento de arroz irrigado no Estado. Os resultados mostraram que existe tendência tecnológica de incremento nos rendimentos de arroz irrigado no Estado; os perfis espectrais (NDVI e EVI) das áreas de arroz irrigado são típicos de áreas cultivadas, com valores baixos no período de implementação da cultura, crescentes durante o desenvolvimento vegetativo, atingindo os valores máximos durante o enchimento de grão e decrescentes a partir da maturação fisiológica dos grãos. A variabilidade interanual desses perfis é devida, principalmente, às variações das condições meteorológicas; existe uma relação curvilínea entre NDVI e EVI, entretanto ambos índices apresentam um perfil médio similar, com o NDVI apresentando valores maiores do que o EVI; as variáveis meteorológicas radiação solar global e dias com temperatura mínima do ar menor ou igual a 15°C e as imagens de NDVI e EVI provenientes do sensor MODIS podem ser usadas como indicadores do rendimento do arroz irrigado. Os modelos agrometeorológicos e agrometeorológicos-espectrais ajustados apresentam características de precisão, fácil implementação e baixo custo, podendo, portanto, serem introduzidos ao programa nacional de previsão de safras. Embora o período de dados ainda seja reduzido para resultados conclusivos existe a tendência de melhora nas estimativas de rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul a partir da incorporação de dados provenientes de imagens MODIS.

---

<sup>1</sup> Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (116 p.) Agosto, 2007.

EVALUATION OF THE USE OF MODIS IMAGES IN THE  
AGROMETEOROLOGICAL-SPECTRAL MODELLING OF IRRIGATED RICE YIELD  
IN RIO GRANDE DO SUL<sup>2</sup>

Author: Eliana Veleda Klering  
Advisor: Dr.<sup>a</sup> Denise Cybis Fontana  
Co-advisor: Dr. Moacir Antônio Berlato

**ABSTRACT**

Based on the demand of official institution for objective information about the irrigated rice yield, the aim of this research was to evaluate the possibility to use MODIS images for the irrigated rice yield forecasts in Rio Grande do Sul State, Brazil. This study was carried out using two data sets involving the six rice production regions of Rio Grande do Sul. The first data set, relative to the crop years from 1982/1983 to 2005/2006, was meteorological data of the minimum air temperature and global solar radiation, and data of the agricultural statistics about the irrigated rice yield and crop area. The second data set was the vegetation indexes images, NDVI and EVI, obtained from the MODIS sensor, referent to the crop years from 2000/2001 to 2005/2006. From these data, analyzes of yield technological tendencies were made, and the agrometeorological and spectral indicators for the adjustment of the irrigated rice yield models in the State was established. The results showed that there is a technological tendency of increasing the irrigated rice yield in the State; the spectral profiles (NDVI and EVI) of the irrigated rice areas are typical of crop areas, with low values during the implementation crop period, increasing values during the vegetative development, reaching the highest values during the grain-filling period and decreasing values during the grain physiological maturity. The interannual variability of these profiles occurs mainly due to the variations of the meteorological conditions; there is a curvilinear relationship between NDVI and EVI, however, both vegetation indexes show a similar mean profile, with NDVI values higher than EVI ones; the meteorological variables – global solar radiation and days with minimum air temperature below or equal to 15°C – and the NDVI and EVI images from the MODIS sensor can be used as indicators of the irrigated rice yield. The adjusted agrometeorological and agrometeorological-spectral models show characteristics of accuracy, easy implementation and low cost making them able to be introduced to the national program of crop forecast. Although the period of data are still reduced for final conclusions, there is a tendency of improvement of the irrigated rice yield estimates in Rio Grande do Sul through the incorporation of data from MODIS images.

---

<sup>2</sup> Master of Science Dissertation in Remote Sensing, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Post-Graduation in Remote Sensing. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (116 p.) August, 2007.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1. A cultura do arroz irrigado .....	4
2.1.1. Panorama mundial, nacional e estadual .....	4
2.1.2. Exigências climáticas.....	6
2.1.3. Ciclo fenológico.....	8
2.1.4. Zoneamento agroclimático .....	9
2.1.5. Regiões de cultivo.....	11
2.2. Estatísticas agrícolas.....	13
2.2.1. Dados oficiais .....	13
2.2.2. Projeto GeoSafras .....	14
2.3. Modelagem de Rendimento.....	15
2.3.1. Abordagem Agrometeorológica .....	16
2.3.2. Abordagem Agrometeorológica-Espectral .....	17
2.4. Monitoramento da vegetação através de técnicas de sensoriamento remoto .....	18
2.5. Sensor MODIS .....	21
2.5.1. Produto MODIS MOD13Q1 .....	23
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	25
3.1. Região de estudo .....	25
3.2. Período de estudo .....	26
3.3. Dados.....	27
3.3.1. Rendimento e área cultivada.....	27
3.3.2. Dados meteorológicos .....	27
3.3.3. Imagens MODIS.....	29
3.4. Análise com dados de rendimento.....	29
3.4.1. Análise da tendência temporal dos dados de rendimento.....	29
3.4.2. Retirada da tendência tecnológica dos dados de rendimento .....	30
3.5. Análise com dados meteorológicos.....	30
3.5.1. Teste do Modelo de Carmona (2001).....	30
3.5.2. Correlação entre os dados meteorológicos e o rendimento .....	30
3.6. Análise com dados espectrais.....	31

3.6.1. Processamento de imagens .....	31
3.6.2. Determinação da área ocupada com arroz .....	32
3.6.3. Perfis temporais das áreas de arroz.....	32
3.6.4. Correlação entre os dados espectrais e o rendimento .....	33
3.7. Modelagem de rendimento .....	33
3.7.1. Ajuste do modelo agrometeorológico.....	33
3.7.2. Ajuste do modelo agrometeorológico-espectral .....	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	37
4.1. Retirada da tendência tecnológica da série de rendimento.....	37
4.2. Análise com dados meteorológicos.....	41
4.2.1. Teste do modelo de Carmona (2001) .....	41
4.2.2. Correlação entre os dados meteorológicos e o rendimento .....	44
4.3. Análise dos dados espectrais em áreas de arroz irrigado .....	47
4.3.1. Seqüência temporal.....	47
4.3.2. Determinação da área ocupada com arroz irrigado .....	53
4.3.3. Relação entre NDVI e EVI.....	59
4.3.4. Perfis temporais das áreas de arroz irrigado .....	60
4.3.5. Correlação entre os dados espectrais e o rendimento .....	68
4.4. Modelagem de rendimento.....	74
4.4.1. Modelagem agrometeorológica .....	74
4.4.2. Modelagem agrometeorológica-espectral.....	79
5. CONCLUSÕES .....	81
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
7. APÊNDICES.....	90

## RELAÇÃO DE TABELAS

TABELA 1.	Fases e etapas de crescimento das plantas de arroz.....	9
TABELA 2.	Uso principal, largura de banda e resolução espacial das 36 bandas do sensor MODIS.....	22
TABELA 3.	Regiões orizícolas, estações meteorológicas, coordenadas geográficas e Instituição.....	27
TABELA 4.	Coefficientes da equação de Ångstrom ( $\beta_0$ e $\beta_1$ ), utilizados para as estações meteorológicas em estudo (Fonte: Fontana e Oliveira, 1996).....	28
TABELA 5.	Regressão linear múltipla entre rendimento corrigido ( $Y_c$ ), insolação relativa ( $n/N$ ) e número de dias com temperatura mínima do ar igual ou menor que 15°C ( $N^{\circ}tm$ ), para as regiões orizícolas e para o Estado do Rio Grande do Sul.....	31
TABELA 6.	Coefficiente de correlação entre a radiação solar global e o rendimento de grãos (corrigido) da cultura do arroz irrigado nas diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, período 1982-2006.....	45
TABELA 7.	Coefficiente de correlação entre o número de dias com temperatura igual ou inferior a 15°C e o rendimento (corrigido) de grãos da cultura do arroz irrigado nas diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, período 1982-2006.....	46
TABELA 8.	Área média da cultura do arroz irrigado (mil ha) no Rio Grande do Sul estimada com imagens NDVI/MODIS e dados oficiais (IBGE). Período 2000/2001 a 2005/2006.....	58
TABELA 9.	Área média da cultura do arroz irrigado (mil ha) no Rio Grande do Sul estimada com imagens EVI/MODIS e dados oficiais (IBGE). Período 2000/2001 a 2005/2006.....	58

TABELA 10. Modelos agrometeorológicos, para as regiões orizícolas e para o Estado do Rio Grande do Sul, período 1982-2006.....	74
--	----

## RELAÇÃO DE FIGURAS

FIGURA 1.	Produção média dos principais países produtores de arroz para o período de 1990 até 2005. Fonte de dados: FAO (2007). .....	5
FIGURA 2.	Área cultivada média dos principais países produtores de arroz para o período de 1990 até 2005. Fonte de dados: FAO (2007). .....	5
FIGURA 3.	Rendimento médio dos principais países produtores de arroz para o período de 1990 até 2005. Fonte de dados: FAO (2007). .....	5
FIGURA 4.	Produção de arroz no Brasil nas safras 2005/2006 e 2006/2007. Fonte de dados: IBGE (2007). .....	6
FIGURA 5.	Zoneamento Agroclimático por época de semeadura para o arroz irrigado, cultivares de ciclos médios (M) e precoce (P), no Estado do Rio Grande do Sul. Os números e as letras indicam as regiões e sub-regiões agroecológicas. Fonte: Adaptado de Steinmetz e Braga (2001). .....	10
FIGURA 6.	Produção média, para as safras 1997/1998 até 2005/2006, das regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. Fonte de dados: IBGE (2007). .....	12
FIGURA 7.	Área média de arroz irrigado, para as safras 1997/1998 até 2005/2006, das regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. Fonte de dados: IBGE (2007). .....	12
FIGURA 8.	Rendimento médio de arroz irrigado, para as safras 1996/1997 até 2005/2006, das regiões orizícolas do estado do Rio Grande do Sul. Fonte de dados: IBGE (2007). .....	13
FIGURA 9.	Resposta espectral típica de uma folha fotossinteticamente ativa. Fonte: Moreira (2005). .....	20
FIGURA 10.	Regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. ....	26
FIGURA 11.	Calendário agrícola médio do arroz irrigado, safras 1994-1999, para o Estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Carmona (2001). .....	33

FIGURA 12. Tendência tecnológica do rendimento de arroz irrigado no período 1982-2006, para as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul.....	38
FIGURA 13. Tendência tecnológica do rendimento de arroz irrigado no período 1982-2006, o Estado do Rio Grande do Sul (RS). .....	39
FIGURA 14. Rendimentos corrigidos de arroz irrigado (retirada a tendência tecnológica) no período 1982-2006, para as regiões orizícolas do estado do Rio Grande do Sul. ....	40
FIGURA 15. Rendimentos corrigidos de arroz irrigado (retirada a tendência tecnológica) no período 1982-2006, para o estado do Rio Grande do Sul (RS). .....	41
FIGURA 16. Teste dos modelos propostos por Carmona (2001), para o período de 2000 até 2006, nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. ....	43
FIGURA 17. Série temporal média de NDVI para o Rio Grande do Sul referente às safras 2000/2001 até 2005/2006 (outubro a março).....	49
FIGURA 17. Continuação.....	50
FIGURA 18. Série temporal média de EVI para o Rio Grande do Sul referente às safras 2000/2001 até 2005/2006 (outubro a março). ....	51
FIGURA 18. Continuação.....	52
FIGURA 19. Recorte de uma imagem MODIS no Rio Grande do Sul: (a) composição de mínimo NDVI; (b) composição de máximo NDVI, (c) imagem diferença. ....	54
FIGURA 20 Recorte de uma imagem MODIS no Rio Grande do Sul: (a) imagem diferença com aplicação de limiar 0,30, (b) imagem diferença com aplicação de limiar 0,42, (c) imagem diferença com aplicação de limiar 0,60.....	55
FIGURA 21. Relação entre a área cultivada com arroz irrigado nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, estimada através dos limiares aplicados ao NDVI e a área oficial fornecida pelo IBGE. Entre parênteses estão indicados os limiares utilizados em cada região orizícola. ....	57
FIGURA 22. Relação entre a área cultivada com arroz irrigado nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, estimada através dos limiares aplicados ao EVI e a área oficial fornecida pelo IBGE. Entre parênteses estão indicados os limiares utilizados em cada região orizícola. ....	57
FIGURA 23. Relação entre NDVI e EVI das áreas ocupadas com arroz irrigado, em todas as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, para o período de 2000/2001 a 2005/2006. ....	59

FIGURA 24. Perfis temporais de NDVI referentes às safras agrícolas de 2000/2001 a 2005/2005, para as diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul.....	61
FIGURA 24. Continuação .....	62
FIGURA 25. Perfis temporais de EVI referentes às safras agrícolas de 2000/2001 a 2005/2005, para as diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul.....	63
FIGURA 25. Continuação.....	64
FIGURA 26. Perfis temporais médios de NDVI e EVI referentes às safras agrícolas de 2000/2001 a 2005/2005, para as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. As barras representam os valores máximos e mínimos de NDVI e EVI.....	66
FIGURA 26. Continuação.....	67
FIGURA 27. Correlações entre o rendimento e o NDVI/MODIS, nos diferentes períodos do ciclo da cultura do arroz irrigado, para as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. As linhas azuis representam significância de 1%, as linhas verdes significância de 5% e as vermelhas de 10%.....	69
FIGURA 27. Continuação.....	70
FIGURA 28. Correlações entre o rendimento e o EVI/MODIS, nos diferentes períodos do ciclo da cultura do arroz irrigado, para as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. As linhas azuis representam significância de 1%, as linhas verdes significância de 5% e as vermelhas de 10%.....	71
FIGURA 28. Continuação.....	72
FIGURA 29. Correlações entre o rendimento e o NDVI nos diferentes períodos do ciclo da cultura do arroz irrigado, para o Estado do Rio Grande do Sul. As linhas azuis representam significância de 1%, as linhas verdes significância de 5% e as vermelhas de 10%. .....	73
FIGURA 30. Correlações entre o rendimento e o EVI nos diferentes períodos do ciclo da cultura do arroz irrigado, para o Estado do Rio Grande do Sul. As linhas azuis representam significância de 1%, as linhas verdes significância de 5% e as vermelhas de 10%. .....	73
FIGURA 31. Rendimentos oficiais e estimados pelo modelo agrometeorológico ajustado para o Rio Grande do Sul, no período de ajuste do modelo.....	75
FIGURA 32. Rendimentos oficiais e estimados pelos modelos agrometeorológicos ajustados para cada região orizícola do Estado do Rio Grande do Sul, no período de ajuste do modelo.....	76
FIGURA 33. Rendimentos oficiais e estimados pelo modelo agrometeorológico ajustado para do Rio Grande do Sul no período de teste do modelo.....	77

- FIGURA 34. Rendimentos oficiais e estimados pelos modelos agrometeorológicos ajustados para cada região orizícola do Estado do Rio Grande do Sul no período de teste do modelo..... 78
- FIGURA 35. Rendimentos oficiais e estimados pelo modelo agrometeorológico-espectral ajustado para o Rio Grande do Sul..... 80

## RELAÇÃO DE APÊNDICES

APÊNDICE 1.	Rendimentos oficiais (IBGE) e corrigidos (Corr) de arroz irrigado ( $t.ha^{-1}$ ) para as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, período de 1982-2006. ....	90
APÊNDICE 2.	Série temporal média de NDVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2000/2001 (outubro a março).....	91
APÊNDICE 2.	Continuação.....	92
APÊNDICE 3.	Série temporal média de NDVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2001/2002 (outubro a março).....	93
APÊNDICE 3.	Continuação.....	94
APÊNDICE 4.	Série temporal média de NDVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2002/2003 (outubro a março).....	95
APÊNDICE 4.	Continuação.....	96
APÊNDICE 5.	Série temporal média de NDVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2003/2004 (outubro a março).....	97
APÊNDICE 5.	Continuação.....	98
APÊNDICE 6.	Série temporal média de NDVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2004/2005 (outubro a março).....	99
APÊNDICE 6.	Continuação.....	100
APÊNDICE 7.	Série temporal média de NDVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2005/2006 (outubro a março).....	101
APÊNDICE 7.	Continuação.....	102
APÊNDICE 8.	Série temporal média de EVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2000/2001 (outubro a março).....	103
APÊNDICE 8.	Continuação.....	104

APÊNDICE 9.	Série temporal média de EVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2001/2002 (outubro a março).....	105
APÊNDICE 9.	Continuação.....	106
APÊNDICE 10.	Série temporal média de EVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2002/2003 (outubro a março).....	107
APÊNDICE 10.	Continuação.....	108
APÊNDICE 11.	Série temporal média de EVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2003/2004 (outubro a março).....	109
APÊNDICE 11.	Continuação.....	110
APÊNDICE 12.	Série temporal média de EVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2004/2005 (outubro a março).....	111
APÊNDICE 12.	Continuação.....	112
APÊNDICE 13.	Série temporal média de EVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2005/2006 (outubro a março).....	113
APÊNDICE 13.	Continuação.....	114
APÊNDICE 14.	Área cultivada de arroz irrigado (mil ha), nas diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, estimada com imagens NDVI/MODIS e dados oficiais (IBGE), para as safras 2000/2001 até 2005/2006.....	115
APÊNDICE 15.	Área cultivada de arroz irrigado (mil ha), nas diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, estimada com imagens EVI/MODIS e dados oficiais (IBGE), para as safras 2000/2001 até 2005/2006.....	116

## 1. INTRODUÇÃO

O arroz é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo, sendo cultivado em todos os continentes. Nos países em desenvolvimento, onde vivem aproximadamente dois terços da população subnutrida mundial, este grão é considerado o cultivo alimentar de maior importância devido ao seu alto valor nutricional. É alimento básico para cerca de 2,4 bilhões de pessoas e, segundo estimativas, até 2050 haverá uma demanda para atender ao dobro desta população (Azambuja et al., 2004).

Atualmente, o Rio Grande do Sul é considerado estabilizador da safra nacional, pois produz 48% da produção do País (cerca de cinco milhões de toneladas). Esta produção representa 3,1% do PIB (Produto Interno Bruto) gerando, assim, R\$ 175 milhões em ICMS (Imposto de Circulação de Mercadorias e Serviços) e 250 mil empregos no Estado (IBGE, 2004).

A previsão das safras de arroz no Rio Grande do Sul, assim como de diversas culturas em todo o Brasil, é realizada utilizando informações municipais obtidas através de um sistema de levantamento, baseado em opiniões de agentes técnicos e econômicos relacionados ao setor (IBGE, 2004). Contudo, em função do caráter subjetivo dos levantamentos, essas informações não permitem uma análise quantitativa dos erros envolvidos, além de serem passíveis de manipulação. É, portanto, de grande importância o desenvolvimento de métodos objetivos que possam ser incorporados, complementando os programas oficiais.

Uma das alternativas para a resolução do problema da subjetividade do método oficial é o uso de modelos de estimativa de rendimento, os quais, na sua maioria, expressam

a influência de elementos meteorológicos no rendimento das culturas agrícolas, sendo denominados modelos agrometeorológicos. No âmbito da pesquisa científica, a utilidade destes modelos já foi demonstrada em vários estudos e para diversas culturas. No entanto, grande parte dos modelos agrometeorológicos propostos não contemplam outros fatores que influenciam a definição dos rendimentos, como por exemplo, ocorrência de pragas e doenças, manejo diferenciado da cultura, fertilidade dos solos, entre outros.

Neste contexto, a inclusão de uma componente espectral aos modelos agrometeorológicos tem sido proposta por proporcionar uma visão geral da cultura, cujo crescimento é consequência da integração de todos os fatores que determinam o seu desenvolvimento. Assim, os indicadores espectrais oriundos de novos sensores, como o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo da plataforma orbital Terra, devem ser testados e a possibilidade do uso na modelagem de rendimento ser averiguada.

A hipótese deste estudo é que imagens do sensor MODIS podem ser utilizadas em modelos de estimativa de rendimento do arroz irrigado, pois as variações na biomassa das lavouras provocam alterações nas respostas espectrais das mesmas, e a detecção dessas variações permite a quantificação de alguns parâmetros biofísicos que estão correlacionados com o rendimento final da cultura.

Partindo da hipótese formulada, o objetivo geral desse trabalho foi avaliar a possibilidade do uso das imagens MODIS em modelos de estimativa de rendimento para a cultura do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar a existência de tendência tecnológica no rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul;
- Testar o desempenho de modelos já existentes de estimativa do rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul;
- Definir a metodologia de extração de dados espectrais das áreas de arroz irrigado no Estado;
- Determinar o perfil espectral típico das áreas de arroz irrigado situadas nas diferentes regiões orizícolas do Estado;

- Comparar os índices de vegetação NDVI e EVI, obtidos de imagens MODIS nas áreas de arroz irrigado do Estado;
- Definir as variáveis agrometeorológicas e espectrais melhor correlacionadas com o rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul;
- Parametrizar um modelo agrometeorológico de estimativa de rendimento de arroz irrigado para o Rio Grande do Sul;
- Parametrizar um modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de arroz irrigado para o Rio Grande do Sul;

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. A cultura do arroz irrigado**

#### **2.1.1. Panorama mundial, nacional e estadual**

Cultivado e consumido em todos os continentes, o arroz destaca-se pela produção e área de cultivo, desempenhando papel estratégico tanto no aspecto econômico quanto social. Cerca de 150 milhões de hectares são cultivados anualmente no mundo, produzindo 590 milhões de toneladas, sendo que mais de 75% desta produção é oriunda do sistema de cultivo irrigado (Azambuja et al., 2004).

Segundo dados da FAO (2000), o continente asiático é responsável por 90% da produção de arroz no mundo, o continente americano por aproximadamente 9,1% e o restante produzido pelo continente africano (Azambuja et al., 2004).

Índia e China se destacam como os maiores produtores de arroz do mundo, com produção muito superior aos demais países. O Brasil é o maior produtor de fora do continente Asiático, sendo que em média (1990 a 2005), a produção brasileira é de 10,2 milhões de toneladas (Figura 1), ocupando uma área de aproximadamente 3,7 milhões de ha (Figura 2). Em termos de rendimento (Figura 3), no Brasil a média é de 2.770kg.ha<sup>-1</sup>, bastante inferior à China, mas semelhante à da Índia.

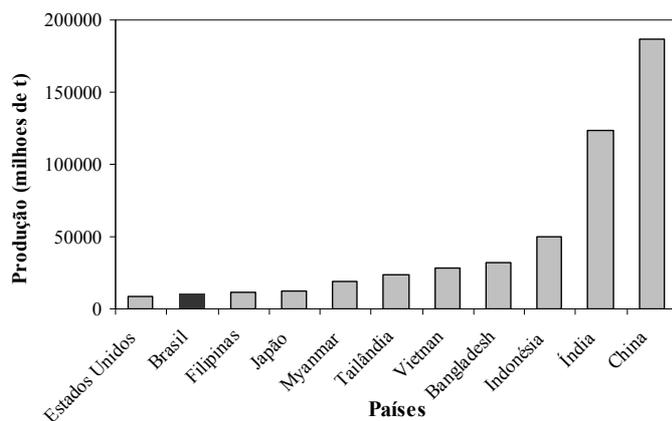


FIGURA 1. Produção média dos principais países produtores de arroz para o período de 1990 até 2005. Fonte de dados: FAO (2007).

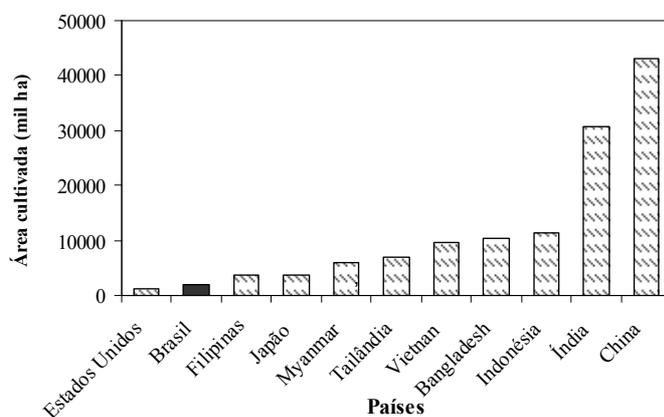


FIGURA 2. Área cultivada média dos principais países produtores de arroz para o período de 1990 até 2005. Fonte de dados: FAO (2007).

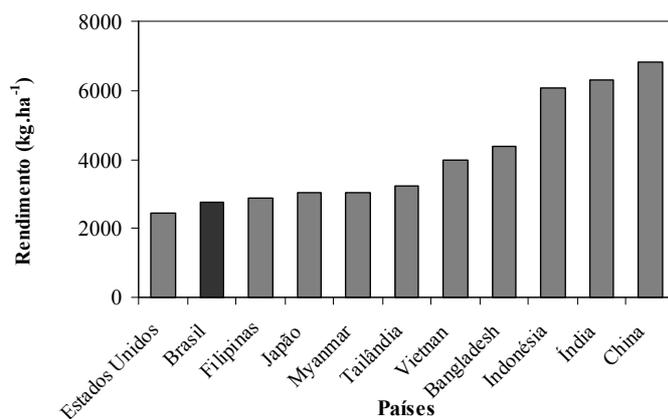


FIGURA 3. Rendimento médio dos principais países produtores de arroz para o período de 1990 até 2005. Fonte de dados: FAO (2007).

Dados do IBGE (2007) mostram que o arroz é cultivado em todas as regiões do Brasil (Figura 4). Nas safras 2005/2006 e 2006/2007 a produção foi, em média, de 11,5 milhões de toneladas o que representou cerca de 2% da produção mundial. Em todo o Brasil essa produção é oriunda de dois sistemas de cultivo: irrigado e de sequeiro. No Rio Grande do Sul, entretanto, a quase totalidade da produção é oriundo do sistema irrigado.

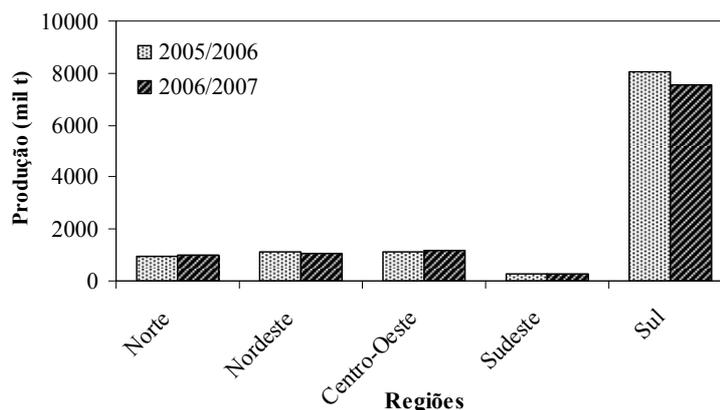


FIGURA 4. Produção de arroz no Brasil nas safras 2005/2006 e 2006/2007. Fonte de dados: IBGE (2007).

Atualmente 60% do arroz irrigado é produzido na Região Sul do País (Gomes e Magalhães Jr., 2004). Somente no Estado do Rio Grande do Sul são cultivados cerca de 950 mil hectares de arroz irrigado, o que representa aproximadamente 48% do total produzido no Brasil. O rendimento médio no Estado do Rio Grande do Sul é em torno de  $5.500\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , bastante acima da média nacional ( $2.770\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).

### 2.1.2. Exigências climáticas

O arroz é uma gramínea anual, classificada no grupo de plantas  $C_3$  adaptada ao ambiente aquático. Esta adaptação é devido à presença de aerênquima no colmo e nas raízes da planta, que possibilita a passagem de oxigênio do ar para a camada da rizosfera (Arroz Irrigado, 2005).

Embora o Estado do Rio Grande do Sul apresente bons níveis médios de rendimento de arroz irrigado, existe certa variabilidade interanual associada, principalmente, às variações nas condições meteorológicas. A ocorrência de baixas temperaturas e a disponibilidade de radiação solar durante as fases críticas da planta, são

dois elementos meteorológicos que estão fortemente relacionados com a variabilidade dos rendimentos do arroz irrigado no Estado (Steinmetz et al., 2005).

Também Oldeman et al. (1986), citado por Carmona (2001), demonstra que o arroz cultivado em áreas inundadas, onde a disponibilidade de água não restringe o crescimento e o desenvolvimento da cultura, e onde os estresses biológicos e as condições adversas do solo são mínimos, o rendimento potencial está relacionado, principalmente à temperatura do ar e à radiação solar global. Para expressão de seu potencial produtivo, a cultura requer temperatura ao redor de 24 a 30°C e radiação solar elevada (Arroz Irrigado, 2005).

Apesar de não poder ser considerada isoladamente, a temperatura do ar é um dos elementos meteorológicos que exerce maior influência sobre o crescimento, desenvolvimento e rendimento das plantas de arroz. Para cada fase fenológica têm-se temperaturas ótimas, mínimas e máximas específicas. A temperatura ótima para o desenvolvimento do arroz situa-se entre 20° e 35°C na germinação, de 30° a 33°C para a floração e de 20° a 25°C para a maturação. Em geral, a cultura exige temperaturas relativamente elevadas da germinação à maturação, uniformemente crescentes até a floração e decrescentes, porém sem diminuições bruscas, após a floração (Yoshida, 1981 citado por Steinmetz, 2004).

A ocorrência de baixas temperaturas pode reduzir a estatura das plantas e aumentar o ciclo da cultura, acarretando ainda incremento da esterilidade das espiguetas e, conseqüentemente, redução na produção de grãos (Infeld e Silveira Jr., 1983).

As plantas de arroz são mais sensíveis aos efeitos das baixas temperaturas nas fases de pré-floração e floração, onde a esterilidade das espiguetas pode causar decréscimos acentuados de rendimento (Terres e Galli, 1985; Mota, 1994). Nestas fases, as temperaturas críticas, que causam esterilidade das espiguetas, variam de acordo com as características das pesquisas realizadas, podendo ser de 13°C, variar entre 15°C e 17°C, para os genótipos tolerantes (Terres e Galli, 1985); e, entre 17°C e 19°C, para os suscetíveis (Satake, 1976, citado por Steinmetz et al., 2003a) ou 15°C (Board et al., 1980, citado por Steinmetz et al., 2003a). Durante a fecundação das flores de arroz a temperatura crítica oscila na faixa entre 15°C e 17°C. Plantas que estão com o primórdio floral em iniciação, submetidas a 17°C durante cinco dias resultam completamente estéreis, enquanto que a 15°C durante apenas

uma hora cessa a formação de pólen. Para alguns genótipos, temperaturas inferiores a 19°C já induzem a esterilidade (Terres e Galli, 1985). A temperatura crítica de 15°C, para toda a fase reprodutiva, tem sido usada como referência em estudos climatológicos para o arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul (Steinmetz e Braga, 2001).

Em regiões onde a temperatura do ar não é um fator limitante para o crescimento e desenvolvimento do arroz irrigado, a radiação solar é um dos principais fatores que influenciam a produção de grãos. A exigência de radiação solar pela cultura do arroz varia de uma fase fenológica para a outra. Durante a fase vegetativa, ela tem relativamente pouca influência sobre o rendimento e os seus componentes. Entretanto, os índices de radiação solar durante as fases reprodutiva e de maturação influenciam fortemente os rendimentos de arroz irrigado (Yoshida e Parao, 1976). Vários estudos mostram que, nessas fases, há uma relação linear positiva entre essa variável e a produção de grãos (Steinmetz, 2004).

Segundo Yoshida e Parao (1976), o decréscimo no rendimento de arroz pode atingir 70%, no caso das plantas serem submetidas a baixos níveis de radiação solar, principalmente se esta redução ocorrer nas fases reprodutiva e de enchimento de grãos. Yoshida (1981) também verificou que a radiação solar durante o período reprodutivo tem um efeito marcante no rendimento de grãos do arroz, e que no período vegetativo é menor.

### **2.1.3. Ciclo fenológico**

O ciclo de desenvolvimento do arroz pode ser dividido em três fases distintas: vegetativa, reprodutiva e maturação (Tabela 1). A duração de cada fase é função da cultivar, época de semeadura, região de cultivo e das condições de fertilidade do solo. No Rio Grande do Sul, para a maioria das cultivares utilizadas, a duração do ciclo varia entre 100 e 140 dias, sendo que, maior parte da variação entre cultivares ocorre na fase vegetativa (Arroz Irrigado, 2005).

A fase vegetativa compreende desde a germinação da primeira semente, até o momento que a panícula começa a se diferenciar. A duração desta fase depende, principalmente, do fotoperíodo e da temperatura. Esta fase pode ser subdividida em: germinação e emergência, fase de plântula, perfilhamento e alongação dos colmos.

A fase reprodutiva, com duração de aproximadamente 30 dias, inicia com a diferenciação do primórdio da panícula e termina com a floração completa (antese),

podendo ser subdivida em: início da diferenciação da panícula, crescimento da panícula e floração. Esta é a fase mais importante para o sucesso da lavoura, pois é nesta fase que ocorrem os períodos considerados críticos. Logo após o início da diferenciação do primórdio floral, fica determinado o número potencial máximo de grãos por panícula, sendo esse componente determinante da produção final. É também nessa fase que ocorre a microsporogênese e a floração propriamente dita, na qual temperaturas baixas podem causar esterilidade nas flores, reduzindo a proporção de espiguetas com grãos.

A fase de maturação tem início logo após a plena floração e a conseqüente fecundação, e termina com a maturação total das sementes, podendo ser subdividida em: etapa leitosa, etapa pastosa e etapa cerosa dos grãos. A fase de maturação também apresenta duração de em torno de 30 dias.

TABELA 1. Fases e etapas de crescimento das plantas de arroz.

<b>Fase</b>	<b>Etapa</b>
Vegetativa	Germinação e emergência
	Plântula
	Perfilhamento
	Elongação do colmo
Reprodutiva	Diferenciação do primórdio floral
	Crescimento da panícula
	Floração
Maturação	Grão leitoso
	Grão pastoso
	Maturação

Fonte: Magalhães Jr. et al. (2004).

#### **2.1.4. Zoneamento agroclimático**

Os Zoneamentos Agroclimáticos e Pedoclimáticos, indicando as regiões com melhores condições de clima e solo e a definição das épocas de semeadura mais apropriadas, dentro dessas regiões, são importantes ferramentas para redução do risco climático de arroz irrigado no Estado. Os primeiros trabalhos classificaram as regiões de cultivo em “Preferencial”, “Tolerada” e “Inapta” (Mota et al., 1974; Rio Grande do Sul, 1994).

Considerando que a época de semeadura é uma das práticas que desempenha um papel de destaque na obtenção de altos níveis de rendimento, pelo fato de aumentar as

chances de que as fases críticas da planta escapem das condições adversas e ou coincidam com as favoráveis, mais recentemente, Steinmetz e Braga (2001) propuseram o Zoneamento de arroz irrigado por épocas de semeadura (Figura 5). O objetivo deste trabalho foi caracterizar os períodos favoráveis de semeadura de arroz irrigado nas distintas regiões agroecológicas do Estado. Os critérios utilizados foram: temperatura do solo desnudo, a 5cm de profundidade, maior ou igual a 20°C, como indicador do início da semeadura; probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas do ar menores ou iguais a 15°C, durante os períodos de pré-floração e floração, e disponibilidade de radiação solar nas fases reprodutiva e de maturação.

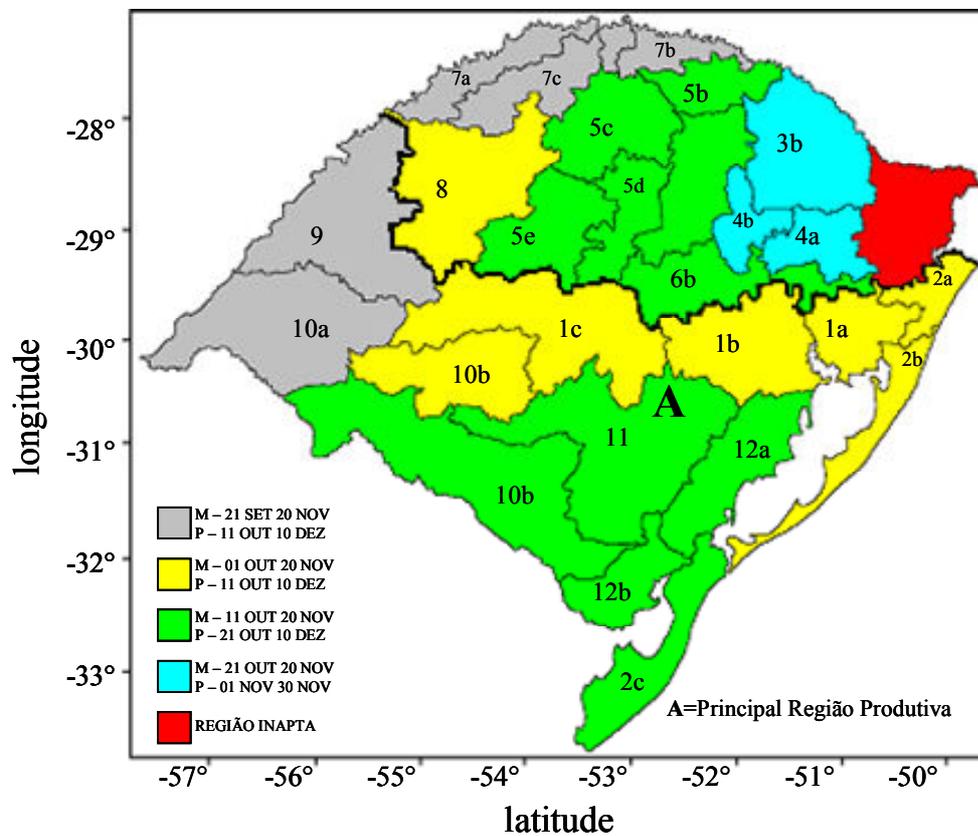


FIGURA 5. Zoneamento Agroclimático por época de semeadura para o arroz irrigado, cultivares de ciclos médios (M) e precoce (P), no Estado do Rio Grande do Sul. Os números e as letras indicam as regiões e sub-regiões agroecológicas. A principal região produtiva está situada ao sul da linha preta. Fonte: Adaptado de Steinmetz e Braga (2001).

Foram estabelecidos quatro períodos de semeadura para cultivares de ciclo médio e quatro para cultivares de ciclo precoce. Nas regiões mais quentes (Fronteira Oeste e Alto Vale do Uruguai) o período de semeadura para cultivares de ciclo médio estende-se de 21 de setembro a 20 de novembro e nas regiões mais frias (Serra do Nordeste e Planalto superior) estende-se de 21 de outubro a 20 de novembro. Nessas mesmas regiões, para as cultivares de ciclo precoce, esse período varia, respectivamente de 11 de outubro a 10 de dezembro e de 01 a 30 de novembro.

#### **2.1.5. Regiões de cultivo**

No Estado do Rio Grande do Sul, segundo a classificação utilizada pelo Instituto Riograndense do Arroz (IRGA), o arroz irrigado é cultivado nas seguintes regiões: Fronteira Oeste, Depressão Central, Campanha, Litoral Sul, Planície Costeira Externa da Lagoa dos Patos e Planície Costeira Interna da Lagoa dos Patos. Essas regiões apresentam diferenças quanto à topografia, clima, solos, disponibilidade de água para irrigação, tamanho de lavoura, etc, determinando variações em termos de produção e rendimento médio (Azambuja et al., 2004).

Nas Figuras 6, 7 e 8 são apresentados os dados de produção, área e rendimento das regiões orizícolas do Estado. A maior parte do arroz irrigado no Rio Grande do Sul é produzida na Fronteira Oeste (29%), onde também se verificam os maiores níveis de rendimento (próximos a  $6.000\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).

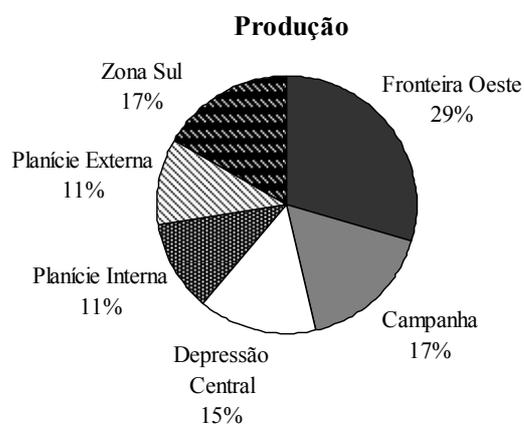


FIGURA 6. Produção média, para as safras 1997/1998 até 2005/2006, das regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. Fonte de dados: IBGE (2007).

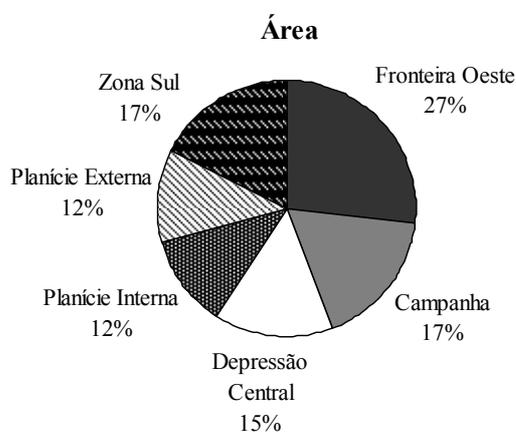


FIGURA 7. Área média de arroz irrigado, para as safras 1997/1998 até 2005/2006, das regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul. Fonte de dados: IBGE (2007).

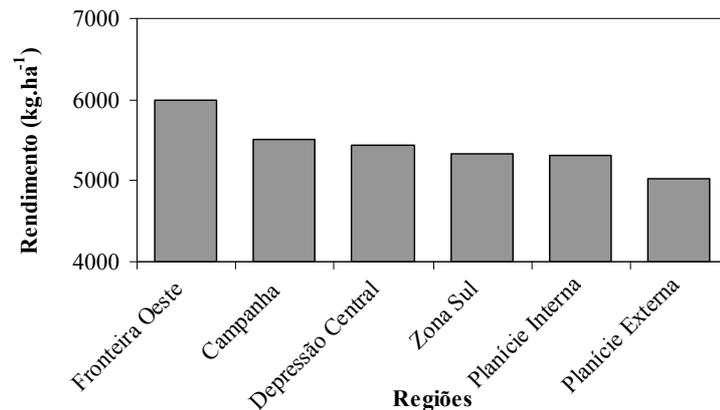


FIGURA 8. Rendimento médio de arroz irrigado, para as safras 1996/1997 até 2005/2006, das regiões orizícolas do estado do Rio Grande do Sul. Fonte de dados: IBGE (2007).

## 2.2. Estatísticas agrícolas

Pino (1999) define a expressão estatísticas agrícolas como o conjunto de estatísticas sobre variáveis referentes ao setor agropecuário, entre as quais se destacam a área plantada, produção e, por consequência destas, o rendimento de determinada cultura agrícola.

### 2.2.1. Dados oficiais

Em todo o Brasil, as previsões de safras agrícolas de abrangência nacional e regional são realizadas utilizando informações municipais obtidas através de um sistema baseado em opiniões de agentes técnicos e econômicos relacionados ao setor (Sano et al., 1998). Esse sistema chamado de Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) fornece mensalmente informações de área plantada, produtividade média e produção de diversas culturas, a partir da fase de intenção de plantio até o final da colheita. Contudo, em função de seu caráter subjetivo, essas informações não permitem uma análise quantitativa dos erros envolvidos, além de serem passíveis de manipulação. Da mesma forma, sua análise não permite a detecção de variações sutis que ocorram ao longo do tempo (Pino, 2001)

### **2.2.2. Projeto GeoSafras**

A Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) realiza as estimativas e previsão de safras de grãos e fibras desde 1976. Para tanto, têm sido utilizados dados obtidos com o mesmo arranjo de levantamento subjetivo, descrito no item anterior.

Com o objetivo buscar ferramentas diversificadas para complementar o método de previsão de safras tradicional (método subjetivo), a Conab vem utilizando, a partir de 2004, recursos tecnológicos de eficiência comprovada, como modelos estatísticos auxiliados pelo sensoriamento remoto, posicionamento por satélite (GPS), sistemas de informações geográficas e modelos agrometeorológicos. Tais tecnologias constituem o método objetivo, de previsão de safras, que recebeu o nome de Projeto GeoSafras. Neste projeto participam diversas instituições brasileiras de ensino, pesquisa e extensão. O GeoSafras tem focado prioritariamente alguns produtos: café; cana-de-açúcar; soja; arroz e milho. Esta prioridade decorre da urgência das demandas por informações relativas a tais culturas (Figueiredo, 2007).

Na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) os trabalhos vinculados ao GeoSafras estão dirigidos para os três segmentos que compõem um programa de previsão de safras: a estimativa de área cultivada, a estimativa de rendimento e o monitoramento ao longo do período de desenvolvimento das culturas. Do ponto de vista metodológico, as ações apresentam um conjunto de técnicas e métodos, alguns já consagrados e outros em fase de desenvolvimento, nas áreas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e agrometeorologia.

O sensoriamento remoto possibilita a mensuração de características da superfície terrestre a partir de dispositivos sensores em grandes altitudes, a bordo de satélite. Tais imagens de satélite têm permitido estudos em escala regional cada vez mais detalhados, devido à possibilidade de visualizar o mesmo território em intervalos regulares de tempo. Essa característica evidencia seu potencial no acompanhamento das alterações que ocorrem na superfície terrestre ao longo do tempo. Além disso, as imagens permitem a mensuração das características da superfície em diferentes bandas, tanto na região do visível quanto do infravermelho. A análise destas bandas permite o mapeamento dos diferentes tipos de cobertura do solo incluindo as culturas agrícolas. No quadro da análise dos dados espaciais através do geoprocessamento é possível localizar geograficamente e

quantificar as áreas cultivadas, integrando informações regionais ou nacionais. Na área de agrometeorologia, já estão disponíveis modelos para algumas culturas que quantificam a relação clima-planta através do uso de dados de estações meteorológicas de superfície aliadas a imagens de satélite, visando estabelecer a previsão do rendimento (Fontana et al., 2006).

### **2.3. Modelagem de Rendimento**

De acordo com Rudorff (1985), os modelos para estimativa de rendimento de uma cultura visam representar de forma simplificada a relação existente entre a cultura e o seu ambiente.

Segundo Berlato (1987), baseado em Baier (1979), os modelos que estabelecem relações quantitativas entre variáveis meteorológicas e rendimento de plantas cultivadas são classificados de três formas:

- Modelo estatístico empírico;
- Modelo de simulação do crescimento da planta;
- Modelo de análise planta-clima.

O Modelo estatístico empírico é construído a partir de séries históricas de dados de rendimento e de dados meteorológicos de uma determinada região. Em geral, esses dados são analisados através da técnica estatística de regressão linear múltipla e o ajustamento do modelo avaliado pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ). A grande desvantagem é que, freqüentemente, estes modelos produzem resultados localizados, pois as variáveis meteorológicas que definem o rendimento, são espacialmente homogêneas somente em áreas limitadas (Braga, 1995). Além disso, diferentes cultivares de uma mesma espécie agrícola costumam apresentar respostas diferentes a essas variáveis (Farias et al., 2000). Cabe ressaltar também que embora os modelos estatísticos empíricos retornem bons resultados em condições climáticas normais, eles são insensíveis às variações climáticas bruscas, as quais influenciam consideravelmente o rendimento.

O modelo denominado de simulação do crescimento da planta pressupõe que, uma vez conhecidos os mecanismos biofísicos das plantas, o impacto das variáveis meteorológicas em processos específicos como fotossíntese, respiração ou transpiração podem ser adequadamente simulados através de um conjunto de equações matemáticas.

Entretanto, do ponto de vista prático, tais modelos apresentam fortes restrições pela falta de informações detalhadas, tanto da fisiologia das plantas, quanto do ambiente (Berlato, 1987).

Já o modelo de análise planta-clima, também denominado modelo agrometeorológico, tem por objetivo explicar, com base nos processos físicos e fisiológicos (e/ou fenológicos), o efeito de uma ou mais variáveis meteorológicas numa resposta quantificável da planta, como crescimento, desenvolvimento ou rendimento. Esse tipo de modelo requer um detalhado conhecimento sobre o que ocorre nas interações entre a planta, o solo e o meio atmosférico, tais como: fluxo de água no solo e na planta, evapotranspiração, radiação solar, etc. Essas interações são transferidas para sistemas de equações que permitem analisar as contribuições das variáveis meteorológicas na definição do rendimento final da cultura (Berlato, 1987).

Os modelos de estimativa de rendimento desenvolvidos até hoje não são capazes de simular com perfeição o efeito conjunto de diversos elementos meteorológicos e culturais que influenciam o rendimento, pois é muito difícil de obterem-se informações precisas e de forma rápida, ao nível de campo e para grandes áreas. Parte deste problema pode ser resolvido a partir da incorporação de uma componente espectral, representada por um índice de vegetação, ao modelo agrometeorológico (Fontana e Berlato, 1998).

### **2.3.1. Abordagem Agrometeorológica**

O desenvolvimento de modelos agrometeorológicos para quantificar o efeito dos elementos meteorológicos no rendimento é uma importante ferramenta aos vários segmentos da agricultura, por permitir a estimativa de rendimento com relativa antecedência à data da colheita (Pedro Jr. et al., 1995).

Os modelos agrometeorológicos têm sido muito utilizados no Rio Grande do Sul dadas características como precisão, objetividade, facilidade de implementação e baixo custo, entre outros. Alguns exemplos de trabalhos realizados no Estado são os de Berlato (1987) para a soja, Barni (1994) para o girassol e Matzenauer et al. (1995) para o milho. Nos modelos propostos, ajustados para culturas não irrigadas, a variável independente é a evapotranspiração relativa, sendo atribuídos pesos diferentes aos estádios de desenvolvimento da cultura, de acordo com a sensibilidade relativa da planta ao déficit hídrico.

No caso de culturas irrigadas, outros elementos que não a disponibilidade hídrica atuam na definição do rendimento das culturas. Carmona (2001) inicialmente propôs um modelo de rendimento baseado na regressão linear múltipla do rendimento em função da insolação relativa ( $n/N$ ) e o número de dias com temperatura mínima igual ou inferior a  $15^{\circ}\text{C}$  ( $N^{\circ}\text{tm}$ ). O modelo foi ajustado para as diferentes regiões orizícolas e para o Estado do Rio Grande do Sul, utilizando o período de 1960 a 2000. A partir do início da década de 80 houve uma mudança no perfil das variedades cultivadas no Estado, passando a predominar variedades de porte baixo, folhas eretas e alta capacidade de perfilhamento, atributos esses que confeririam a estas novas variedades alto potencial produtivo (Nedel et al., 1998), principalmente por serem mais eficientes na interceptação da radiação solar global. Dada esta situação, o autor optou por repetir o ajuste do modelo de regressão linear múltipla do rendimento em função da insolação relativa ( $n/N$ ) e o número de dias com temperatura mínima igual ou inferior a  $15^{\circ}\text{C}$  ( $N^{\circ}\text{tm}$ ) somente para o período de 1980-2000.

### **2.3.2. Abordagem Agrometeorológica-Espectral**

Alguns autores têm proposto incorporar uma variável espectral na estimativa de rendimento. Neste caso, os modelos denominados espectrais, relacionam os índices de vegetação ao rendimento das culturas através de equações de regressão. Esses modelos também podem ser associados a modelos agrometeorológicos, sendo então denominados modelos agrometeorológicos-espectrais (Rizzi, 2005).

No modelo agrometeorológico-espectral a hipótese é de que a componente agrometeorológica representa as condições de radiação solar incidente, temperatura e umidade do ar e disponibilidade hídrica, enquanto que a componente espectral expressa as diferenças de prática de manejo, cultivares e estresses não incluídos nos modelos agrometeorológicos (Rudorff e Batista, 1990). No Rio Grande do Sul, para a cultura da soja, podemos citar os trabalhos de Melo (2003) e Rizzi (2005).

Melo (2003) propôs um modelo agrometeorológico-espectral onde o termo agrometeorológico é obtido através do modelo modificado de Jensen, utilizando a evapotranspiração relativa dos meses de janeiro, fevereiro e março. O termo espectral é representado pelas imagens de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), obtidas do

sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo do satélite NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) referente ao mês de dezembro.

Já no modelo proposto por Rizzi (2005), o termo espectral foi representado pelo IAF (índice de área foliar) estimado a partir de imagens NDVI/MODIS. Neste caso o modelo utilizado foi aquele proposto por Doorenbos e Kassam (1979). Segundo Rizzi (2005), o lançamento do sensor MODIS, que adquire imagens com características muito superiores às adquiridas pelos sensores da série NOAA/AVHRR, até então utilizadas neste tipo de pesquisa (Liu e Kogan, 2002; Melo et al., 2003), abre novas possibilidades para a incorporação dos dados de sensoriamento remoto em modelos agronômicos de estimativa de produtividade.

Fonseca (2004) definiu um sub-modelo espectral com a finalidade estimar a disponibilidade inicial de forragem sobre a qual irão atuar os fatores agrometeorológicos que definem o crescimento da vegetação onde as variáveis espectrais que melhor representam a dinâmica da disponibilidade de forragem foram a reflectância espectral das bandas 3 e 7 (Landsat) e a componente *Wetness* da transformação *Tasseled Cap*. A partir da integração desse sub-modelo espectral com um sub-modelo agrometeorológico de estimativa da produção de forragem foi definido um modelo agrometeorológico-espectral conceitual (modelo JONG) para a estimativa do acúmulo de forragem na unidade homogênea Campo Sul localizada sobre o bioma Campos Sulinos.

#### **2.4. Monitoramento da vegetação através de técnicas de sensoriamento remoto**

Jensen (2000) define o sensoriamento remoto como a arte e a ciência de se obter informações de objetos presentes na superfície terrestre sem contato físico com os mesmos. Um sensor remoto é um sistema capaz de detectar, medir e registrar a Radiação Eletromagnética (REM) emitida ou refletida pela superfície terrestre. Cada objeto apresenta um comportamento diferente frente à relação entre a radiação que nele incide e a radiação por ele refletida, transmitida e absorvida, denominado de comportamento espectral (Novo, 1989).

Nos estudos de vegetação, através de dados de sensoriamento remoto, é muito comum o uso da reflectância de superfície (definida como a porção da radiação solar incidente que é refletida pela superfície), devido à facilidade desta ser medida de forma remota e, principalmente devido às respostas características da vegetação que a tornam facilmente distinguível de outros alvos.

A interação da radiação solar com a vegetação ocorre principalmente nas folhas, onde acontece o processo da fotossíntese. Na porção visível do espectro eletromagnético (0,4 a 0,7 $\mu\text{m}$ ) a vegetação apresenta uma alta absorção da radiação incidente, devido aos pigmentos fotossintéticos presentes nas folhas. Os picos de absorção ocorrem nas regiões do vermelho e do azul, havendo um pico de reflectância em torno do comprimento de onda de 0,55 $\mu\text{m}$  (verde) (Figura 9). Na faixa do espectro eletromagnético correspondente ao vermelho existe uma relação inversamente proporcional entre a intensidade da REM refletida e a quantidade de clorofila presente no dossel. Assim, com o aumento da cobertura vegetal e o conseqüente incremento na quantidade de pigmentos celulares por área, presentes em um maior número de folhas, a quantidade da REM refletida no vermelho diminui, devido ao aumento da absorção da REM incidente (Moreira, 2005).

Na faixa do espectro correspondente ao infravermelho próximo (0,7 até 1,3 $\mu\text{m}$ ) a reflectância aumenta consideravelmente quando comparada à região do visível. Isto resulta do forte contraste entre os índices de refração do conteúdo celular e do espaço intercelular que provoca reflexões e refrações da REM no interior da folha (Knipling, 1970). Nesta faixa de comprimento de ondas, a associação entre densidade de biomassa e reflectância é diretamente proporcional, ou seja, a medida que aumenta a cobertura vegetal existe uma tendência de incremento na reflectância.

Entre 1,3 e 2,5  $\mu\text{m}$  (infravermelho médio), a reflectância das folhas diminui em função das bandas de absorção da água, por volta dos comprimentos de onda 1,4; 1,9 e 2,7  $\mu\text{m}$  (Lillesand e Kiefer, 1999).

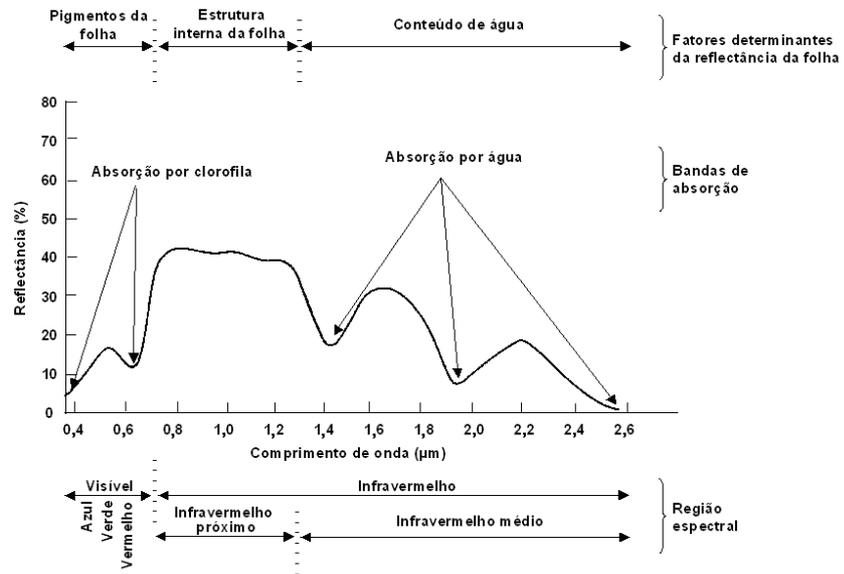


FIGURA 9. Resposta espectral típica de uma folha fotossinteticamente ativa. Fonte: Moreira (2005).

Os valores de reflectância podem ser transformados em índices de vegetação, os quais resultam de transformações lineares da reflectância obtidas em duas ou mais bandas do espectro eletromagnético, mediante soma, razão entre bandas, diferença, ou qualquer outra combinação (Wiegand et al., 1991 citado por Moreira, 2000).

A razão entre as respostas em duas bandas espectrais pode ser utilizada como um indicador eficiente quando o fenômeno em estudo responde de maneira distinta na região do espectro eletromagnético compreendida por cada uma das bandas. A vegetação, por exemplo, frente ao aumento de cobertura, responde de maneira inversa nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo. Assim, a razão entre as duas bandas situadas nessas duas regiões, constituem-se de um indicador adequado e frequentemente tem sido utilizado para o monitoramento da vegetação. Alguns exemplos de trabalhos que mostram que os índices de vegetação podem ser usados para caracterizar parâmetros biofísicos da vegetação são os de Fonseca et al., (2006), Almeida et al., (2005) entre muitos outros.

Fonseca et al. (2006) caracterizaram a evolução temporal do Índice de Vegetação por diferença Normalizada (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*) em *Paspalum notatum* durante o período de crescimento da cultura, a partir de dados de reflectância coletados em campo, e concluíram que este índice de vegetação pode ser

utilizado como um estimador das variáveis biofísicas da cultura, principalmente para baixas e médias densidades de biomassa.

Almeida et al. (2005) compararam o desempenho de alguns índices de vegetação como indicadores das condições de crescimento da cultura da soja, e concluíram que esses índices podem ser utilizados como estimadores remotos do Índice de Área Foliar da cultura submetida a diferentes sistemas de manejo e irrigação.

Os índices de vegetação também são bastante empregados para caracterizar e quantificar diversos parâmetros biofísicos das culturas agrícolas por permitirem a redução da dimensão das informações multiespectrais, minimizarem o impacto das condições de sombreamento e visada das imagens e por estarem correlacionados com um grande número de parâmetros agronômicos (Moreira, 2005).

## **2.5. Sensor MODIS**

O sensor MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*) é o principal instrumento a bordo dos satélites Terra e Aqua, lançados pela NASA em 18 de dezembro de 1999 e 4 de maio de 2002, respectivamente. Estes satélites fazem parte do programa EOS (*Earth Observing System*), formado por diversos países, constituindo uma série de plataformas para monitoramento terrestre em várias áreas de conhecimento em diversas escalas (MODIS, 2003). Este sensor foi projetado para fornecer uma série de observações globais da superfície terrestre, oceano e atmosfera nas regiões do visível e do infravermelho do espectro eletromagnético, cobrindo a Terra a cada dois dias (Soares et al., 2007).

O MODIS é um instrumento que possui alta resolução radiométrica (12 bits) em 36 bandas espectrais (Tabela 2). Estas bandas estão posicionadas a partir do comprimento de onda de 0,405 até 14,385 $\mu$ m, com largura variando entre 10 e 500nm, sendo algumas destas muito importantes para o monitoramento de cultivos agrícolas. As duas primeiras bandas possuem resolução espacial de 250m, as bandas 3 a 7 de 500m e as demais de 1km (MODIS, 2003).

TABELA 2. Uso principal, largura de banda e resolução espacial das 36 bandas do sensor MODIS.

Uso Principal	Banda	Largura de Banda ( $\mu\text{m}$ )	Resolução Espacial (m)
Terra/Nuvens/Aerossóis Limite	1	620-670	250
	2	841-876	250
Terra/Nuvens/Aerossóis Propriedades	3	459-479	500
	4	545-565	500
	5	1230-1250	500
	6	1628-1652	500
	7	2105-2155	500
Cor do Oceano/ Fitoplancton/Biogeoquímica	8	405-420	1000
	9	438-448	1000
	10	483-493	1000
	11	483-493	1000
	12	546-556	1000
	13	626-672	1000
	14	673-683	1000
	15	743-753	1000
	16	862-877	1000
Vapor d'água atmosférico	17	890-920	1000
	18	931-941	1000
	19	915-965	1000
Temperatura da superfície/nuvens	20	3.660-3.840	1000
	21	3.929-3.989	1000
	22	3.929-3.989	1000
	23	1.020-4.080	1000
Temperatura atmosférica	24	4.433-4.498	1000
	25	4.482-4.549	1000
Vapor d'água de nuvens Cirrus	26	1.360-1.390	1000
	27	6.535-6.895	1000
	28	7.175-7.475	1000
Propriedade das nuvens	29	8.400-8.700	1000
Ozônio	30	9.580-9.880	1000
Temperatura da superfície/nuvens	31	10.780-11.280	1000
	32	11.770-12.270	1000
Altitude do topo das nuvens	33	13.185-13.485	1000
	34	13.485-13.785	1000
	35	13.785-14.085	1000
	36	14.085-14.385	1000

Fonte: MODIS (2003).

No que se referem à resolução temporal os dados deste sensor têm características muito apropriadas, pois, a varredura de 55° para cada lado na órbita de

705km de altura resulta numa faixa imageada de 2.330km. Estas características possibilitam que o MODIS faça o imageamento global a cada dois dias e tenha cobertura diária acima de 30° de latitude da superfície terrestre. Isto permite a geração de imagens livres de cobertura de nuvens por meio da composição de várias imagens obtidas em um período maior (como por exemplo, 8 ou 16 dias). Tanto as imagens diárias, quanto as composições estão disponíveis ao usuário no *site* do programa EOS (<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome>) cerca de seis dias após a passagem do satélite ou o término do período das composições, sem qualquer custo. Além disso, as imagens são disponibilizadas com correções atmosféricas e geométricas previamente realizadas, estando prontamente utilizáveis sem a necessidade de georreferenciamento adicional (Rizzi, 2005). Outra característica peculiar às imagens do sensor MODIS é que o programa EOS as disponibiliza sob a forma de produtos direcionados a 55 aplicações específicas, divididas em Terrestres, Oceânicas e Atmosféricas.

### **2.5.1. Produto MODIS MOD13Q1**

Com relação às aplicações terrestres, o produto MOD13Q1 é particularmente interessante ao monitoramento da atividade agrícola. Este produto contém composições de imagens de 16 dias sob a forma dos índices de vegetação (IVs) NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*), além da reflectância de superfície correspondente às bandas do azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio, em uma resolução espacial de 250m (as bandas do azul e infravermelho médio, originalmente obtidas com 500m de resolução espacial, são reamostradas para 250m). 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.

O NDVI é uma relação entre as refletâncias ( $\rho$ ) das bandas do infravermelho próximo (IVP) e do vermelho (V) e visa eliminar diferenças sazonais do ângulo de elevação solar e minimizar os efeitos de atenuação atmosférica em imagens multitemporais. Segundo Moreira (2005), o NDVI é o índice mais utilizado em diferentes estudos, sobre vegetação, que envolvem o uso dos dados de sensoriamento remoto. Este índice é obtido através da Equação 1, sendo que seus valores variam de -1 a 1

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V} \quad (1)$$

O EVI foi desenvolvido para aperfeiçoar a resposta da vegetação, melhorando a sensibilidade às condições de alta biomassa e estrutura do dossel, através da redução da influência do fundo (solo e restos vegetais) e de interferências atmosféricas (Huete et al., 1999). O EVI é calculado através da Equação 2:

$$EVI = G \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{(L + \rho_{IVP} + c_1 \rho_V + c_2 \rho_{AZUL})} \quad (2)$$

Sendo:  $\rho_{IVP}$  a reflectância na banda do infravermelho próximo,  $\rho_V$  a reflectância na banda do vermelho,  $\rho_{AZUL}$  a reflectância na banda do azul, G o fator de ganho do solo (G=2,5), L o fator de ajuste para o solo (L=1),  $c_1$  o coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera no vermelho ( $c_1=6,0$ ) e  $c_2$  o coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera no azul ( $c_2=7,5$ ).

No caso específico da cultura do arroz irrigado, onde parte do ciclo desta cultura está sob condições de inundação, sendo a resposta espectral neste período principalmente da água, o uso de produtos de novos sensores como os índices de vegetação (IVs) do sensor MODIS, podem ser de grande valia para estimativa da área ocupada por esta cultura, bem como para monitoramento das lavouras durante todo ciclo da cultura (D'arco et al., 2005).

## **3. MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1. Região de estudo**

A área de estudo é a região orizícola do Estado do Rio Grande do Sul, que se localiza entre as latitudes 28°00' e 33°45' Sul e longitudes de 49°43' e 57°39' Oeste, tendo uma área total de, aproximadamente, 165.408km<sup>2</sup>. Esta região é dividida da seguinte forma: Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos, Planície Costeira Externa à Lagoa dos Patos e Zona Sul (Figura 10). Essas regiões apresentam diferenças quanto à topografia, clima, solos, disponibilidade de água para irrigação, tamanho de lavoura, etc, determinando variações em termos de produção e rendimento médio.

O clima da região orizícola do Estado do Rio Grande do Sul é classificado, segundo Köppen (Moreno, 1961), na zona fundamental temperada “C”, tipo úmido “Cf”, variedade “Cfa” (subtropical).

A normal climatológica anual (1961-1990) da precipitação pluvial da região de estudo é de 1.425mm, com pequena variação entre os meses do ano. Durante a safra do arroz (de outubro a março) o total de precipitação pluvial é, em média, de 723mm. Na insolação e na temperatura mínima verifica-se uma grande variação ao longo do ano, com menores valores no inverno e os maiores valores no verão, sendo o último o que coincide com o período em que a cultura do arroz se desenvolve. A insolação oscila entre 5,1 e 9 horas ao longo do ano, mas durante o período de cultivo do arroz os valores são superiores a 7,5 horas. Já a temperatura mínima mensal oscila de 9 a 19°C, sendo que durante a safra do arroz os valores variam de 13 a 19°C.

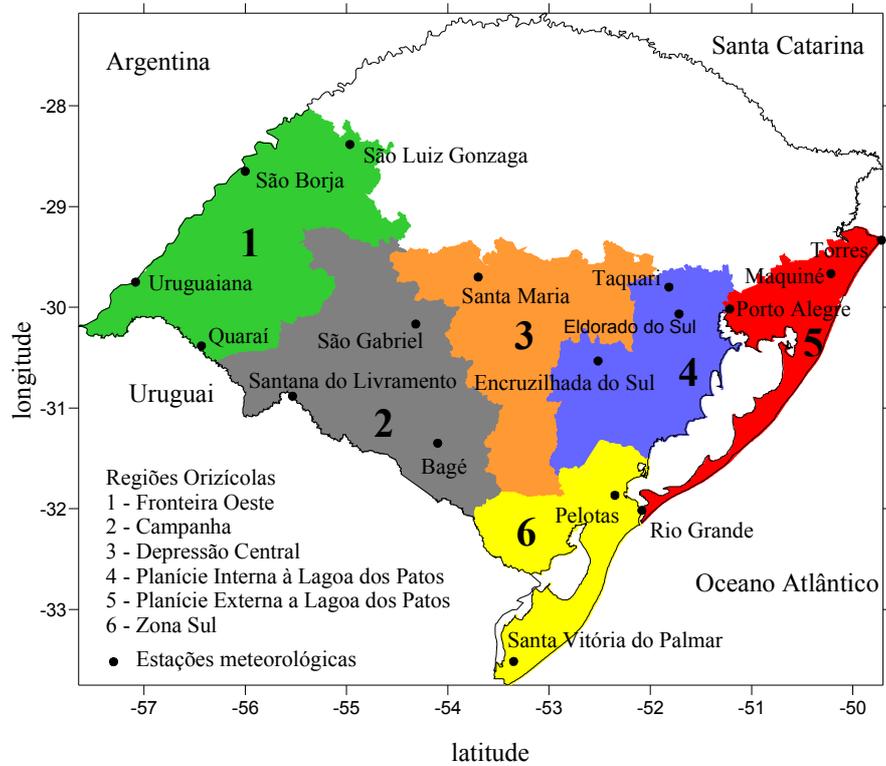


FIGURA 10. Regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul..

### 3.2. Período de estudo

O estudo foi realizado para os anos agrícolas de 1982/1983 até 2005/2006, estendendo-se de outubro até março, compreendendo o período de relevância do desenvolvimento da cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

### 3.3. Dados

#### 3.3.1. Rendimento e área cultivada

Foram utilizados dados de rendimento e área cultivada com a cultura do arroz irrigado, obtidos do *site* do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default.shtm>).

#### 3.3.2. Dados meteorológicos

Foram utilizados dados meteorológicos diários e mensais de radiação solar global e temperatura mínima do ar, de 17 estações meteorológicas incluídas dentro da região de estudo (Tabela 3).

TABELA 3. Regiões orizícolas, estações meteorológicas, coordenadas geográficas e Instituição.

Região	Localidade	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Fonte
1	Quaraí	30°23'S	56°26'W	100	FEPAGRO
	São Borja	28°39'S	56°00'W	99	FEPAGRO
	São Luiz Gonzaga	28°23'S	54°58'W	245	8°DISME/INMET
	Uruguaiana	29°45'S	57°05'W	62	8°DISME/INMET
2	Bagé	31°21'S	54°06'W	241	8°DISME/INMET
	Santana do Livramento	30°53'S	55°32'W	234	8°DISME/INMET
	São Gabriel	30°10'S	54°19'W	124	8°DISME/INMET
3	Santa Maria	29°42'S	53°42'W	95	8°DISME/INMET
4	Eldorado do Sul	30°04'S	51°43'W	46	UFRGS
	Encruzilhada do Sul	30°32'S	52°31'W	427	8°DISME/INMET
	Taquari	29°48'S	51°49'W	76	FEPAGRO
5	Maquiné	29°40'S	50°13'W	32	FEPAGRO
	Porto Alegre	30°01'S	51°13'W	46	8°DISME/INMET
	Torres	29°20'S	49°43'W	30	8°DISME/INMET
6	Pelotas	31°52'S	52°21'W	13	8°DISME/INMET
	Rio Grande	32°01'S	52°05'W	2	8°DISME/INMET
	Santa Vitória do Palmar	33°31'S	53°21'W	24	8°DISME/INMET

1- Fronteira Oeste; 2- Campanha; 3- Depressão Central; 4- Planície Interna à Lagoa dos Patos; 5- Planície Externa à Lagoa dos Patos 6-Zona Sul

O instrumento usado para medição da radiação solar é o piranômetro, geralmente disponível nas estações agrometeorológicas da Fundação Estadual de Pesquisa

Agropecuária/Secretaria Estadual da Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul (FEPAGRO/SCT-RS). Na inexistência desses dados, o que ocorre na maior parte das estações do 8º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (8º DISME/INMET), usou-se o heliógrafo, que mede a insolação (horas de sol.dia<sup>-1</sup>).

Neste caso, para estimar a radiação solar global foi utilizada a equação de Ångstrom (Equação 3).

$$\frac{Rg}{Ra} = \beta_0 + \beta_1 \frac{n}{N} \quad (3)$$

Onde:  $Rg$  é o fluxo de radiação solar global (cal.cm<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>);  $Ra$  é a radiação solar incidente numa superfície horizontal paralela à superfície do solo no topo da atmosfera (cal.cm<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>);  $n$  é o número de horas de sol ocorrido;  $N$  o número de horas de sol astronomicamente possível de ocorrer;  $\beta_0$  e  $\beta_1$  são os coeficientes empíricos, obtidos por análise de regressão para determinada localidade ou região.

Os coeficientes  $\beta_0$  e  $\beta_1$  utilizados na equação foram os definidos por Fontana e Oliveira (1996), conforme a Tabela 4.

A temperatura mínima foi medida pelo termômetro de álcool dentro do abrigo meteorológico.

TABELA 4. Coeficientes da equação de Ångstrom ( $\beta_0$  e  $\beta_1$ ), utilizados para as estações meteorológicas em estudo (Fonte: Fontana e Oliveira, 1996).

Região	Localidade	$\beta_0$	$\beta_1$
1	São Luiz Gonzaga	0,25	0,46
	Uruguaiana	0,24	0,41
2	Bagé	0,15	0,47
	Santana do Livramento	0,15	0,47
3	Santa Maria	0,24	0,41
4	Encruzilhada do Sul	0,15	0,47
5	Porto Alegre	0,15	0,47
	Torres	0,17	0,60
6	Pelotas	0,27	0,32
	Rio Grande	0,27	0,32
	Santa Vitória do Palmar	0,27	0,32

1- Fronteira Oeste; 2- Campanha; 3- Depressão Central; 4- Planície Interna à Lagoa dos Patos; 5- Planície Externa à Lagoa dos Patos 6-Zona Sul.

### 3.3.3. Imagens MODIS

Foram utilizadas imagens provenientes do produto MODIS MOD13Q1 coleção 4 que contém composições de imagens de 16 dias sob a forma dos índices de vegetação NDVI e EVI, com resolução espacial de 250m. Este produto foi obtido de forma gratuita, mediante cadastro antecipado, através do site do Programa EOS da NASA (<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome>) para o período de janeiro de 2000 até março de 2006.

## 3.4. Análise com dados de rendimento

### 3.4.1. Análise da tendência temporal dos dados de rendimento

Considerando todo o conjunto de dados de rendimento, foi feita uma análise para a verificação da existência de tendência temporal, ou seja, existência ou não de tendência de incremento dos rendimentos da cultura do arroz devido à incorporação de novas tecnologias (cultivares, práticas de manejo etc) ao longo do período de estudo. A equação ajustada foi uma regressão linear simples (Equação 4).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (4)$$

Onde:  $Y_i$  é o rendimento de grãos de arroz irrigado;  $\beta_0$  é o coeficiente linear (intercepto);  $\beta_1$  é o coeficiente de regressão da variável independente e  $x_i$  é o período observado.

Para constatar-se a existência de tendência temporal foi feito o teste de hipótese para o coeficiente de regressão  $\beta_1$ , tendo as seguintes hipóteses:  $\beta_1 = 0$ , não existe tendência e  $\beta_1 \neq 0$ , existe tendência. O teste de *Student* (t - teste) foi aplicado para verificar a tendência nos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade.

### 3.4.2. Retirada da tendência tecnológica dos dados de rendimento

As séries históricas de rendimento, das seis regiões orizícolas do Estado, foram corrigidas através da retirada da tendência tecnológica, invertendo a equação 1 e aplicando parâmetros gerados no ajuste da equação para cada região orizícola (Equação 5):

$$Y_{ci} = Y_i - \beta_1 x_i \quad (5)$$

Sendo:  $Y_{ci}$  o rendimento corrigido do ano  $i$ ;  $Y_i$  o rendimento original do ano  $i$ ;  $\beta_1$  o coeficiente de regressão linear e  $x_i$  o ano  $i$ .

## 3.5. Análise com dados meteorológicos

### 3.5.1. Teste do Modelo de Carmona (2001)

Para os anos agrícolas de 2000/2001 até 2005/2006 foram testados os modelos propostos por Carmona (2001). Estes modelos, parametrizados usando dados do período de 1980 a 2000, baseiam-se na regressão linear múltipla entre o rendimento corrigido de arroz irrigado ( $Y_c$ ), a insolação relativa ( $n/N$ ) e o número de dias com temperatura mínima igual ou inferior a 15° C ( $N^{\circ}tm$ ) (Tabela 5).

Para verificar a relação entre os rendimentos estimados pelos modelos de Carmona (2001) e os rendimentos oficiais foram feitas análises de correlação e confeccionados gráficos de dispersão.

### 3.5.2. Correlação entre os dados meteorológicos e o rendimento

Foram analisadas as correlações entre os elementos meteorológicos radiação solar global mensal e número de dias com temperatura mínima menor ou igual a 15°C e o rendimento corrigido, nas seis regiões orizícolas, para as safras de 1982/1983 até 2005/2006. As significâncias das correlações foram testadas através do teste  $t$  (1%, 5% e 10%).

TABELA 5. Regressão linear múltipla entre rendimento corrigido ( $Y_c$ ), insolação relativa ( $n/N$ ) e número de dias com temperatura mínima do ar igual ou menor que  $15^\circ\text{C}$  ( $N^\circ\text{tm}$ ), para as regiões orizícolas e para o Estado do Rio Grande do Sul.

Região	Regressão
1	$Y_c = 1,135 + 4,198 n/N$ (jan/fev) – $0,051 N^\circ\text{tm}$ (dez a mar)
2	$Y_c = -2,051 + 8,839 n/N$ (todo ciclo)
3	$Y_c = 0,472 + 3,69 n/N$ (out/nov/dez) – $0,062 N^\circ\text{tm}$ (mar)
4	$Y_c = 2,82 + 0,848 n/N$ (fev) – $0,048 N^\circ\text{tm}$ (mar)
5	$Y_c = 1,462 + 2,448 n/N$ (fev) – $0,147 N^\circ\text{tm}$ (mar)
6	$Y_c = -1,168 + 6,642 n/N$ (nov/dez)

1- Fronteira Oeste 2-Campanha 3-Depressão Central 4-Planície Costeira Interna a Lagoa dos Patos 5-Planície Costeira Externa a Lagoa dos Patos 6-Zona Sul.

(Fonte: Carmona, 2001).

### 3.6. Análise com dados espectrais

#### 3.6.1. Processamento de imagens

Para cobrir todo o Estado são necessárias duas cenas correspondentes aos *tiles* h13v11 (parte norte) e h13v12 (parte sul). Após o *download* das imagens correspondentes às cenas de interesse, e ao período de estudo, as mesmas passaram pelo processo de mosaicagem. A partir dos mosaicos das duas cenas, foram recortadas as áreas de interesse (Estado do Rio Grande do Sul).

Posteriormente, as imagens tiveram sua projeção alterada do formato original (*sinusoidal*) para a projeção Cônica Equivalente de Albers, devido ao interesse em quantificação de área. Os parâmetros usados na projeção Cônica Equivalente de Albers foram: Datum SAD69/Brasil com longitude do meridiano central de  $-54^\circ$ , e latitudes dos paralelos padrões de  $-33^\circ$  e  $-27^\circ$ .

As imagens correspondentes à segunda composição do mês de novembro de 2003 e a segunda composição do mês de fevereiro de 2001 não foram utilizadas devido a ruídos presentes nas mesmas.

Todas as etapas que envolveram o processamento de imagens foram feitas utilizando o software *Envi 4.2*.

### **3.6.2. Determinação da área ocupada com arroz**

Usando as imagens de índice de vegetação (NDVI e EVI), obtido a partir das imagens MODIS, foi testada uma metodologia simples para a determinação das áreas ocupadas com arroz irrigado, nas seis regiões orizícolas e nas seis safras analisadas. A partir das imagens do período de outubro a março, foram elaboradas composições de máximo valor, de mínimo valor e imagens de diferença entre o máximo e mínimo.

As composições de máximo valor foram feitas a partir das imagens de janeiro e fevereiro, que correspondem, segundo análises preliminares, ao período de ocorrência dos maiores valores de índice de vegetação, relacionados aos períodos de floração e enchimento de grãos (calendário agrícola médio da cultura no Rio Grande do Sul – Figura 11).

Já na obtenção das composições de mínimo valor utilizaram-se a segunda imagem de outubro, as imagens de novembro e a primeira imagem de dezembro. Estas imagens coincidem com o período de implantação da cultura e início do desenvolvimento vegetativo e, portanto, período de ocorrência de valores baixos de índice de vegetação.

As imagens diferenças foram obtidas através da subtração entre as composições de máximo e de mínimo valor em cada ano. A pressuposição foi de que os *pixels* com maiores diferenças possivelmente estejam associados à ocupação com culturas agrícolas anuais, no caso o arroz irrigado, devido grande variação temporal das mesmas.

Para estabelecer as áreas de cultivo de arroz foi usada a imagem diferença, sendo testados alguns limiares (valores limites) de diferença. Para o NDVI foram testados os limiares de 0,40 até 0,60 com intervalos de 0,02 e para o EVI foram testados os valores de 0,32 a 0,52, também com intervalos de 0,02. O limiar escolhido, para cada região, foi aquele que gerou a área de cultivo mais próxima da área fornecida pelo IBGE nas seis safras analisadas.

### **3.6.3. Perfis temporais das áreas de arroz**

Definidas as áreas de cultivo, a próxima etapa foi a extração dos dados de NDVI e EVI das imagens MODIS, destas áreas em cada uma das regiões orizícolas e nas seis safras analisadas. Estes dados foram usados para o traçado de gráficos com o

transcurso dos índices de vegetação no período de outubro a março nas seis safras estudadas, denominados perfis temporais.

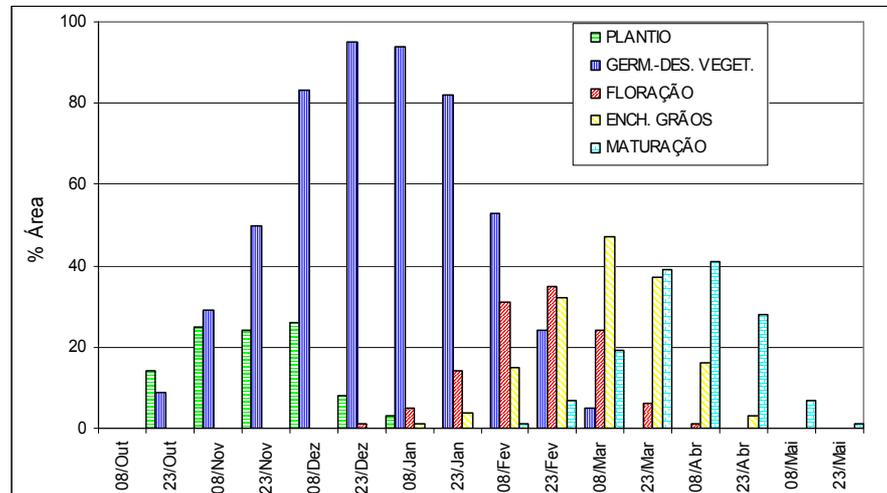


FIGURA 11. Calendário agrícola médio do arroz irrigado, safras 1994-1999, para o Estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Carmona (2001).

### 3.6.4. Correlação entre os dados espectrais e o rendimento

Para as seis regiões orizícolas e seis safras estudadas (2000/2001 até 2005/2006), foram realizadas as análises de correlações entre os índices NDVI e EVI e o rendimento corrigido de arroz irrigado (após a retirada da tendência tecnológica). As correlações foram estabelecidas para os dados originais (períodos de 16 dias), para os dados médios mensais ao longo de todo o ciclo da cultura, e, também, para os períodos de mínimo, de máximo e para a integração do NDVI e do EVI ao longo de todo o período. A significância das correlações foi verificada através do teste t (1%, 5% e 10%).

## 3.7. Modelagem de rendimento

### 3.7.1. Ajuste do modelo agrometeorológico

Foram ajustados modelos agrometeorológicos de estimativa de rendimento de arroz irrigado para as diferentes regiões orizícolas individualmente e para o conjunto delas

(metade sul do Estado do Rio Grande do Sul), sendo este último considerado como sendo o modelo para o Estado. Esses modelos foram ajustados através de regressão linear múltipla com  $k$  variáveis independentes (Equação 6):

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ij} + \varepsilon_j \quad (6)$$

Onde:  $Y_i$  é o valor corrigido do rendimento de grãos,  $\beta_0$  é o coeficiente linear,  $\beta_i$  é o coeficiente de regressão das variáveis independentes,  $X_i$ ,  $X_{ij}$  são as variáveis independentes  $X_i$  na observação  $j$  e  $\varepsilon_j$  é o erro associado à variável  $Y$  na observação  $j$ .

Nesta equação, se pressupõe que a variável  $Y$  é função linear das variáveis independentes, os valores das variáveis independentes são fixos, os erros têm médias zero, são homocedásticos, independentes e de distribuição normal (Draper e Smith, 1996; Neter et al., 1997; Hoffmann e Vieira, 1998; Souza, 1998). Os parâmetros do modelo das equações de regressão linear múltipla foram estimados pelo método passo a passo (*stepwise*) com 10% de significância para entrada e saída de variáveis, tendo como variável dependente o rendimento corrigido (após a retirada da tendência tecnológica) de arroz irrigado como variáveis independentes as citadas a seguir:

- Número de dias com temperatura igual ou inferior a 15°C nos períodos mensais (dezembro, janeiro, fevereiro e março); bimestrais (dezembro a janeiro, janeiro a fevereiro e fevereiro a março); trimestrais (dezembro a fevereiro e março e janeiro a março).
- Radiação solar global nos períodos mensais (outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março); bimestrais (outubro e novembro, novembro e dezembro, dezembro e janeiro, janeiro e fevereiro e fevereiro e março); trimestrais (outubro a dezembro, novembro a janeiro, dezembro a fevereiro, janeiro a março); quadrimestrais (outubro a janeiro, novembro a fevereiro e dezembro a março).

O período utilizado para o ajuste foi de 1982/1983 a 2005/2006, excetuando quatro safras (1992/1993 até 1995/1996) as quais foram utilizadas para teste de aplicação dos modelos. As significâncias dos coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre os

rendimentos estimados pelos diferentes modelos e os rendimentos oficiais foram verificadas através do teste t.

### 3.7.2. Ajuste do modelo agrometeorológico-espectral

O modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de arroz irrigado foi ajustado somente para o Estado do Rio Grande do Sul como um todo, ou seja, para o conjunto das regiões orizícolas (metade sul do Estado do Rio Grande do Sul). Neste caso o rendimento utilizado foi o oficial, sem a retirada da tendência tecnológica. O período utilizado para o ajuste foram as seis últimas safras de 2000/2001 a 2005/2006, período com disponibilidade de imagens MODIS.

O modelo foi ajustado através de regressão linear múltipla com  $k$  variáveis independentes (Equação 6). Os parâmetros do modelo das equações de regressão linear múltipla foram estimados pelo método passo a passo (*stepwise*) com 10% de significância para entrada e saída de variáveis. A variável dependente foi o rendimento corrigido (após a retirada da tendência tecnológica) de arroz irrigado e as variáveis independentes foram:

- Número de dias com temperatura igual ou inferior a 15°C nos períodos mensais (dezembro, janeiro, fevereiro e março); bimestrais (dezembro a janeiro, janeiro a fevereiro e fevereiro a março); trimestrais (dezembro a fevereiro e março e janeiro a março).
- Radiação solar global nos períodos mensais (outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março); bimestrais (outubro e novembro, novembro e dezembro, dezembro e janeiro, janeiro e fevereiro e fevereiro e março); trimestrais (outubro a dezembro, novembro a janeiro, dezembro a fevereiro, janeiro a março); quadrimestrais (outubro a janeiro, novembro a fevereiro e dezembro a março).
- Imagens de NDVI do sensor MODIS dos períodos de outubro (1ª imagem), outubro (2ª imagem), novembro (1ª imagem), novembro (2ª imagem), dezembro (1ª imagem), dezembro (2ª imagem), janeiro (1ª imagem), janeiro (2ª imagem), fevereiro (1ª imagem), fevereiro (2ª imagem), março (1ª imagem); março (2ª

imagem), imagem média de outubro, imagem média de novembro, imagem média de dezembro e imagem média de janeiro.

Os dados de rendimento de grãos e as variáveis espectrais, dos seis anos de observação, formaram 6 matrizes (6 regiões) de  $6 \times 7$  (6 observações e 7 variáveis).

Em função do reduzido número de anos da série o ajuste não foi feito para as regiões separadamente, e, também, não foi realizado teste de aplicação do modelo em anos independentes.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Retirada da tendência tecnológica da série de rendimento

Para a modelagem do rendimento, busca-se identificar indicadores que expliquem a variabilidade do rendimento, sendo, em geral, necessária a retirada da tendência tecnológica o que nada mais é que o estudo de tendência temporal, pois os incrementos de produção por unidade de área (rendimento) estão atrelados ao uso de novas tecnologias como o uso de variedades mais produtivas, insumos modernos e novas técnicas de manejo de planta, solo e água (Carmona, 2001). Esta foi a primeira etapa deste trabalho.

Todas as regiões orizícolas e também o Estado, no período de 1982 a 2006 tiveram confirmadas a existência de tendência tecnológica embutidas no rendimento (coeficiente de regressão linear significativo a 1%).

Através da análise da Figura 12, nota-se que as regiões da Planície Interna ( $\beta_1=0,0591t.ha^{-1}$ ), Planície Externa à Lagoa dos Patos ( $\beta_1=0,0393t.ha^{-1}$ ) e Zona Sul ( $\beta_1=0,0422t.ha^{-1}$ ) foram as que apresentaram os menores incrementos, as regiões da Depressão Central ( $\beta_1=0,0643t.ha^{-1}$ ) e Campanha ( $\beta_1=0,0825t.ha^{-1}$ ) apresentaram níveis intermediários e a região que apresentou o maior nível tecnológico foi a Fronteira Oeste ( $\beta_1=0,1081t.ha^{-1}$ ). Estes resultados diferem dos encontrados por Carmona (2001), pois o autor ao analisar a tendência tecnológica do rendimento de arroz irrigado, para estas regiões orizícolas, encontrou uma tendência semelhante em todas as regiões, embora as análises tenham sido feitas para um período de estudo maior (1944-2000).

A tendência temporal para o rendimento de arroz irrigado no Estado (Figura 13) mostra um aumento de  $0,0659t.ha^{-1}$  a cada ano nos rendimentos durante o período avaliado,

fato que pode ser explicado pela adoção de novas tecnologias no sistema de produção da cultura como: o uso de novas cultivares, insumos e manejos mais eficientes, entre outros.

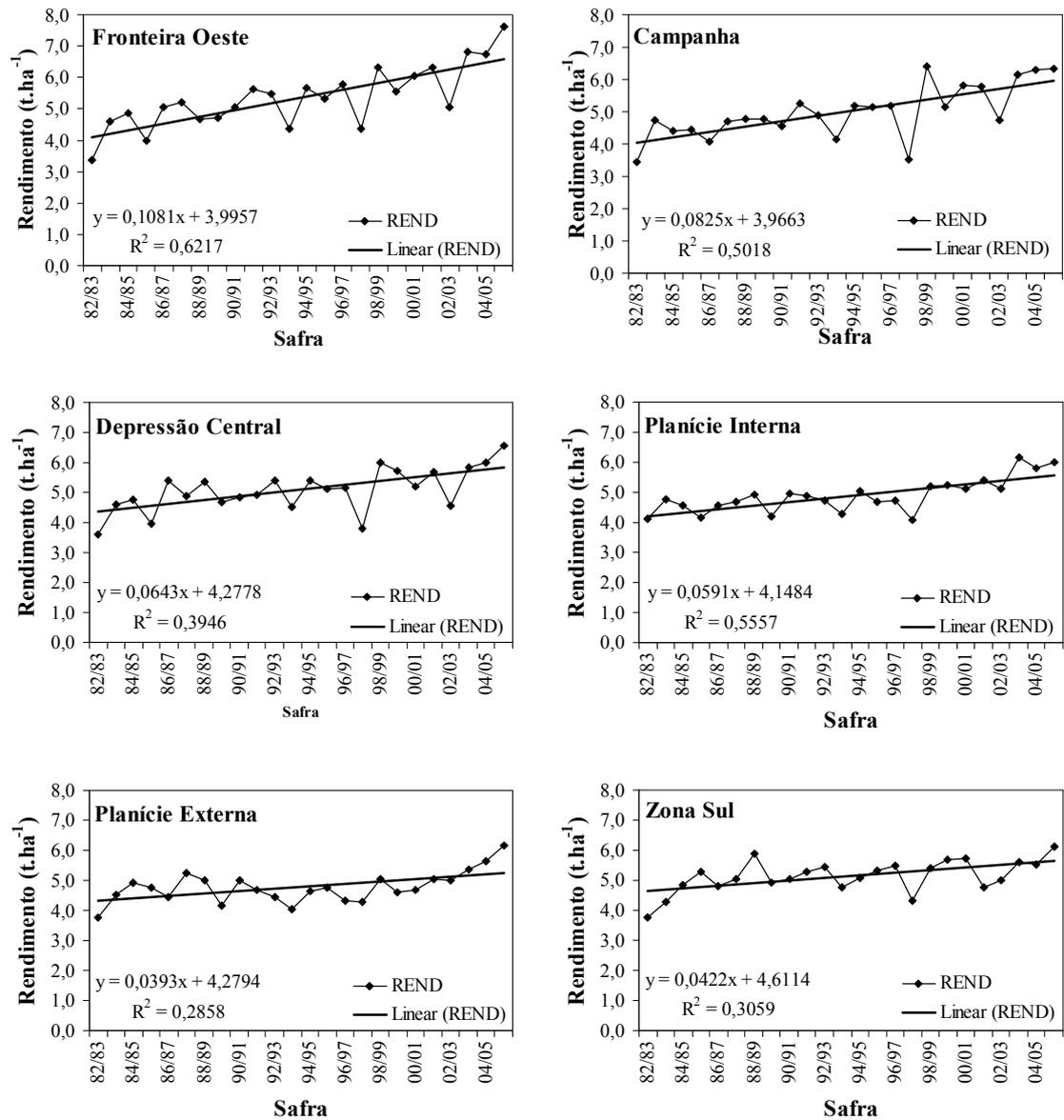


FIGURA 12. Tendência tecnológica do rendimento de arroz irrigado no período 1982-2006, para as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul.

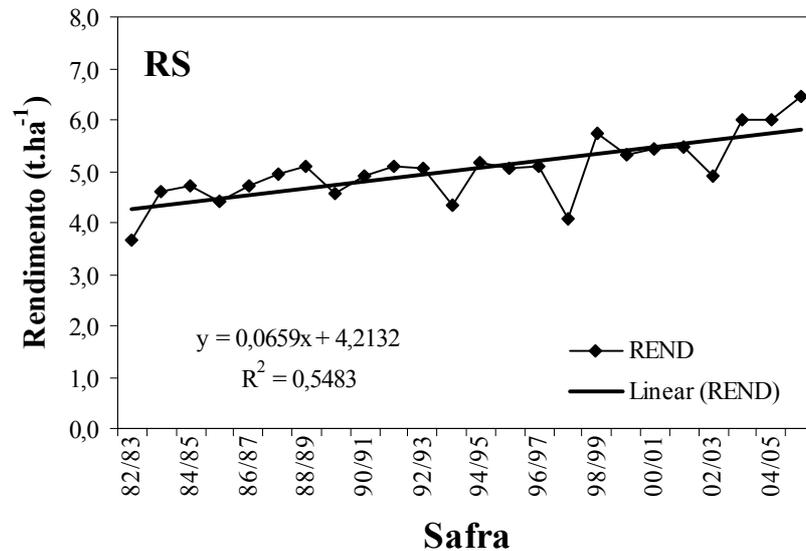


FIGURA 13. Tendência tecnológica do rendimento de arroz irrigado no período 1982-2006, o Estado do Rio Grande do Sul (RS).

Na Figuras 14 e 15 são mostrados as séries de rendimento do arroz irrigado para as diferentes regiões orizícolas e para o Rio Grande do Sul após a retirada da tendência tecnológica. Observa-se de forma mais evidente que, em geral, houve coincidência no desempenho (rendimento) da cultura num dado ano entre as regiões. Em alguns anos agrícolas como os de 1988/1989, 1998/1999 e 2005/2006 foram observados rendimentos acima da média em todas as regiões. Em contraste, 1982/1983, 1997/1998 e 2002/2003 foram anos agrícolas de baixos rendimentos também em todas as regiões. Este comportamento evidencia que o rendimento do arroz irrigado no Rio Grande do Sul (Figura 15) está altamente associado a eventos de abrangência regional, ou seja, nestas séries de dados a variabilidade interanual está expressando a influência de fatores não controláveis pelo agricultor, especialmente àqueles associados aos elementos meteorológicos. Um bom exemplo da influência dos elementos meteorológicos no rendimento de arroz irrigado para o Estado são as ocorrências dos eventos ENOS (El Niño Oscilação Sul). Berlatto e Fontana (2003) mostram que há tendência de eventos El Niño prejudicarem o rendimento e eventos La Niña serem favoráveis, como pôde ser observado nas safras 1997/1998 (El Niño) e 1998/1999 (La Niña).

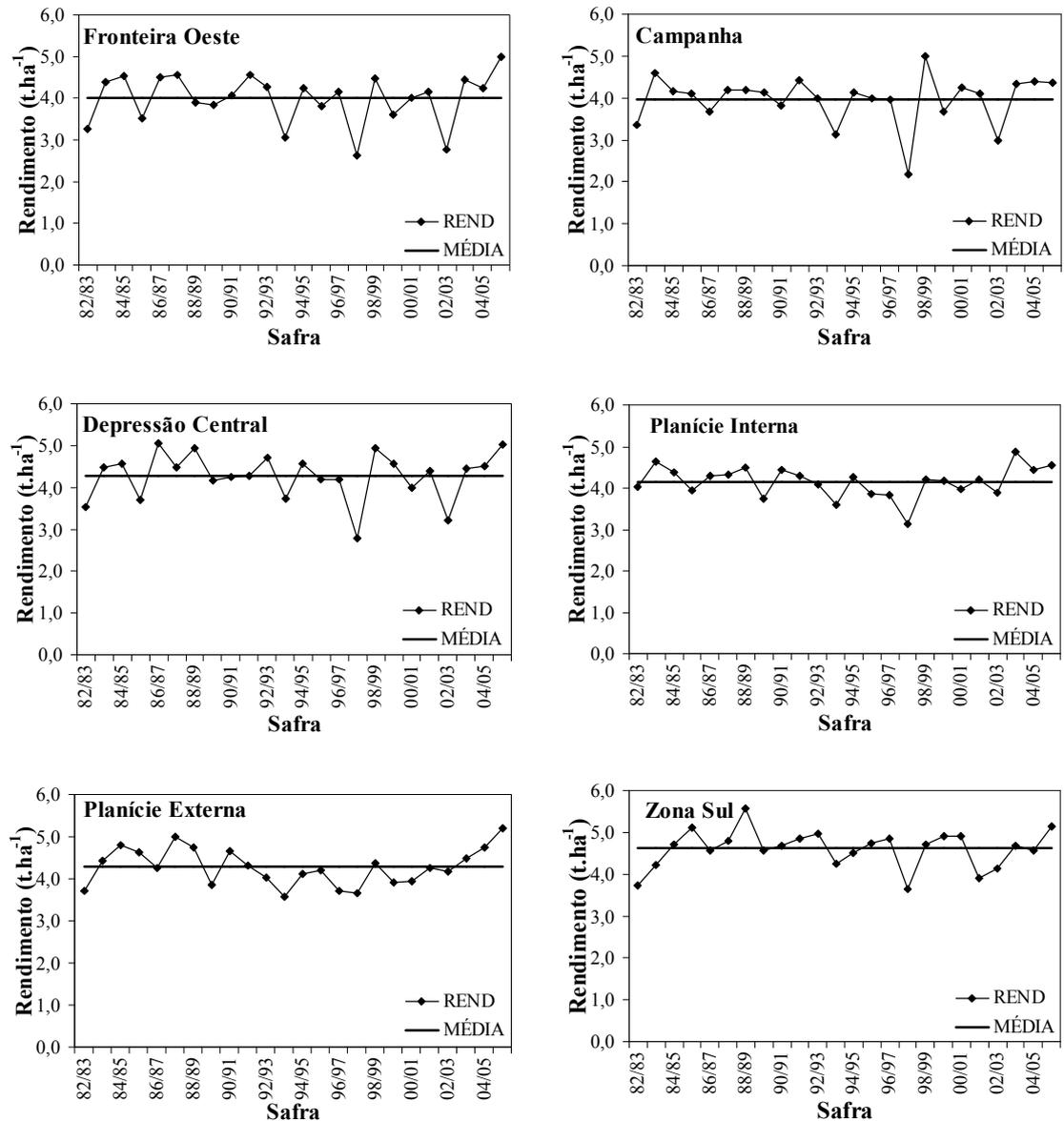


FIGURA 14. Rendimentos corrigidos de arroz irrigado (retirada a tendência tecnológica) no período 1982-2006, para as regiões orizícolas do estado do Rio Grande do Sul.

Nota-se, ainda, que as regiões da Fronteira Oeste e Campanha tiveram as maiores variações no rendimento, fato que pode ser explicado por estas regiões apresentarem a maior probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas prejudiciais ao arroz (Steinmetz et al., 2003b).

Os dados de rendimento oficiais e os corrigidos, para todas as regiões orizícolas do Estado, encontram-se no Apêndice 1.

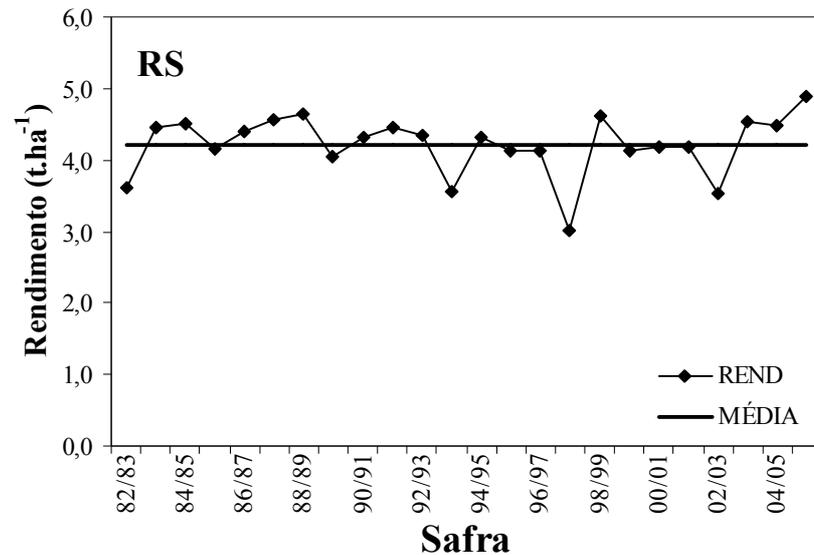


FIGURA 15. Rendimentos corrigidos de arroz irrigado (retirada a tendência tecnológica) no período 1982-2006, para o estado do Rio Grande do Sul (RS).

## 4.2. Análise com dados meteorológicos

Neste item são apresentados os resultados iniciais do trabalho utilizando dados meteorológicos medidos em estações de superfície como indicadores do rendimento do arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

### 4.2.1. Teste do modelo de Carmona (2001)

Carmona (2001) propôs um modelo para estimativa do rendimento do arroz irrigado baseado em somente duas variáveis: insolação relativa ( $n/N$ ) e número de dias com temperatura igual ou inferior a  $15^{\circ}\text{C}$ . O uso dos modelos propostos por Carmona (2001) mostrou resultados diferenciados conforme a região orizícola do Rio Grande do Sul (Figura 16).

As melhores estimativas, obtidas com o modelo de Carmona (2001), foram observadas nas regiões da Campanha e Depressão Central, sendo que os coeficientes de correlação obtidos entre valores oficiais e modelados foram, respectivamente, de 0,81 e 0,75. A distribuição dos pontos em torno da linha 1:1 nestas duas regiões foram as que se mostram mais uniformes, com desvios que variaram de 273 a  $1.357\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  para a Campanha e de 209 a  $1.107\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  para a Depressão Central.

Para as regiões da Planície Externa à Lagoa dos Patos e Zona Sul observaram-se desempenhos intermediários. Apesar dos coeficientes de correlação terem sido baixos (-0,40 e 0,52 respectivamente), a distribuição dos pontos foram bastante próximas à linha 1:1. As diferenças entre os rendimentos oficiais e modelados variaram de 28 a 1.423kg.ha<sup>-1</sup> na Planície Externa e de 26 a 1.144 kg.ha<sup>-1</sup> na Zona Sul.

Os piores desempenhos dos modelos foram observados para as regiões da Planície Interna à Lagoa dos Patos e da Fronteira Oeste. Nestas regiões foram observadas as maiores diferenças entre as estimativas (149 a 1.347kg.ha<sup>-1</sup> na Planície Interna e 917 a 3.349kg.ha<sup>-1</sup> na Fronteira Oeste). Os coeficientes de correlação entre os dados oficiais e modelados foram de -0,03 e 0,24, respectivamente. A distribuição dos pontos em torno da linha 1:1 teve maior dispersão, mostrando que os valores modelados não condizem com os valores oficiais de rendimento.

No presente trabalho, os modelos de Carmona (2001) foram aplicados em uma série de dados independentes, não apresentando resultados semelhantes aos obtidos na parametrização dos mesmos. Na parametrização, feita para série de dados de 1980 a 2000, houve uma boa relação entre os rendimentos oficiais e os modelados para todas as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, com uma distribuição dos pontos em torno da linha 1:1 razoavelmente uniforme. Este comportamento deve-se, em parte, ao fato do modelo ter sido aplicado à própria série de ajuste.

Apesar das estimativas geradas pelo modelo para o período de 2000 a 2006 terem apresentado variações em comparação aos dados do IBGE, os rendimentos estimados de arroz neste período foram próximos à média histórica no Estado do Rio Grande do Sul. Por outro lado, os desvios nas estimativas indicam a necessidade de desenvolver novos modelos.

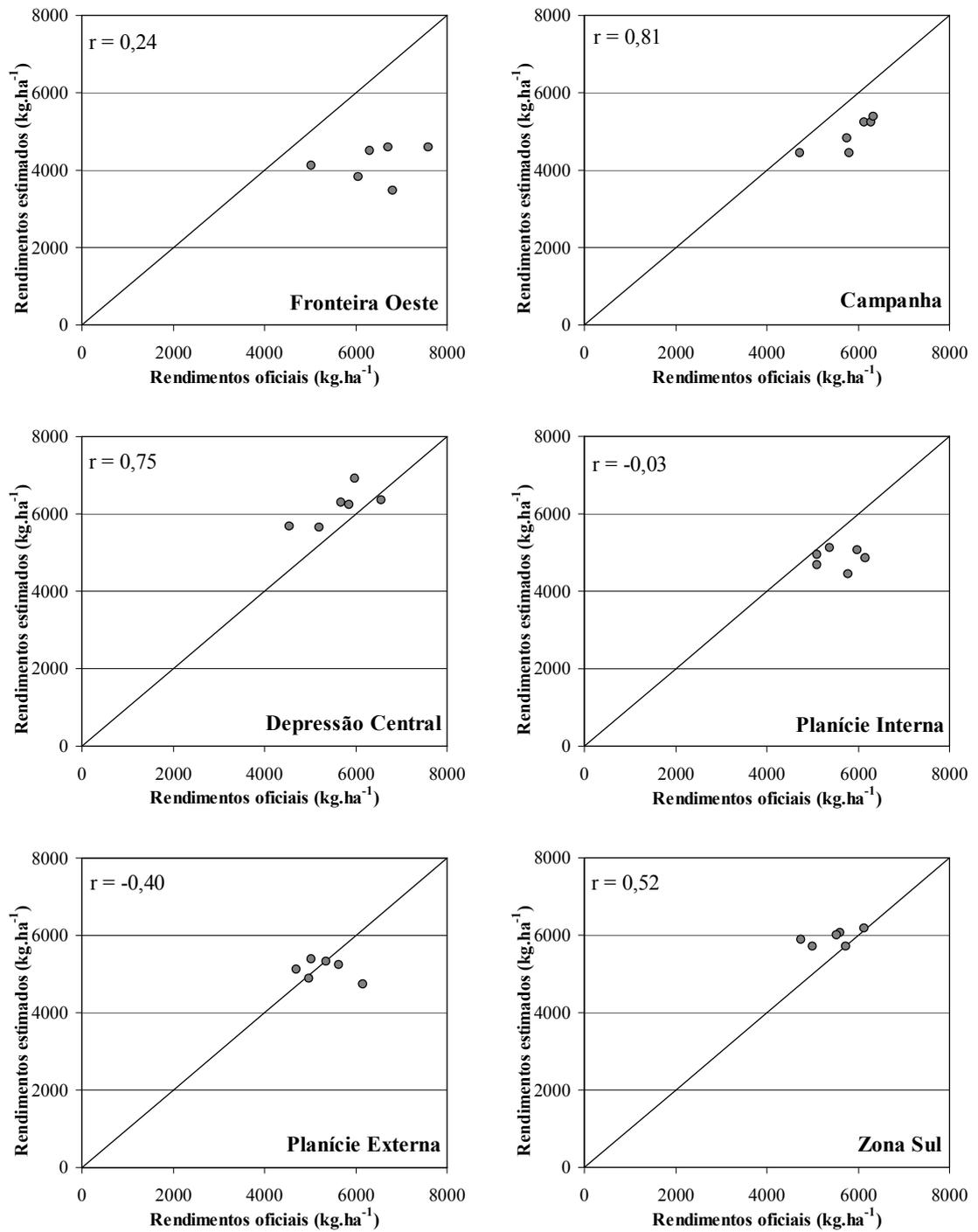


FIGURA 16. Teste dos modelos propostos por Carmona (2001), para o período de 2000 até 2006, nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul.

#### **4.2.2. Correlação entre os dados meteorológicos e o rendimento**

A primeira etapa na busca de um modelo mais robusto para a estimativa do rendimento do arroz irrigado no Rio Grande do Sul foi a identificação das variáveis de entrada do mesmo. Inicialmente, foram testados neste trabalho os elementos meteorológicos radiação solar, ao invés da insolação relativa usada por Carmona (2001), e temperatura mínima do ar, ambos para o período de 1982 até 2006.

##### **4.2.2.1 Radiação solar global**

Através da análise das correlações apresentadas na Tabela 6, nota-se que a radiação solar global e o rendimento de grãos de arroz irrigado apresentam associação nas regiões da Campanha (Região 2), Planície Interna à Lagoa dos Patos (Região 4) e Zona Sul (Região 6). Os coeficientes de correlação apresentados nestas regiões, durante o período reprodutivo, que segundo o calendário médio da cultura para o Rio Grande do Sul (Figura 11) vai de janeiro a março, foram, respectivamente de 0,365, 0,380 e 0,556. Fato que indica que este elemento meteorológico pode ser limitante ao rendimento nestas regiões. As demais regiões, com exceção da Depressão Central (Região 3), apresentam pelo menos um período com correlação significativa.

Para o Estado como um todo as correlações foram significativas em praticamente todo o período, ou seja, esta variável assume importância para a definição do rendimento em todo o ciclo da cultura. As correlações positivas indicam que nos anos com maiores disponibilidades de radiação solar são obtidos os maiores rendimentos. Segundo Yoshida e Parao (1976), o decréscimo nos rendimentos pode chegar a 70% caso as plantas de arroz sejam submetidas a baixos níveis de radiação solar.

Cabe ressaltar também as correlações positivas significativas observadas nos meses de outubro e novembro, o que pode ser explicado pelo fato da radiação solar apresentar correlação negativa com a precipitação pluvial, indicando que bons níveis de radiação solar, neste período, possibilitam a semeadura da cultura dentro da época recomendada, além de favorecer o adequado estabelecimento da cultura (Carmona, 2001).

TABELA 6. Coeficiente de correlação entre a radiação solar global e o rendimento de grãos (corrigido) da cultura do arroz irrigado nas diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, período 1982-2006.

MESES	REGIÕES ORIZÍCOLAS						
	1	2	3	4	5	6	RS
OUT	0,208 <sup>ns</sup>	0,372**	0,206 <sup>ns</sup>	0,487**	0,189 <sup>ns</sup>	0,306*	0,410**
NOV	0,037 <sup>ns</sup>	0,532***	0,227 <sup>ns</sup>	0,382**	0,155 <sup>ns</sup>	0,594***	0,426**
DEZ	0,173 <sup>ns</sup>	0,379**	0,285 <sup>ns</sup>	0,442**	-0,070 <sup>ns</sup>	0,319*	0,524***
JAN	-0,156 <sup>ns</sup>	0,028 <sup>ns</sup>	-0,042 <sup>ns</sup>	0,312*	0,051 <sup>ns</sup>	0,201 <sup>ns</sup>	0,060 <sup>ns</sup>
FEV	0,315*	0,441**	0,114 <sup>ns</sup>	0,489**	0,298 <sup>ns</sup>	0,487**	0,474**
MAR	0,316*	0,226 <sup>ns</sup>	0,142 <sup>ns</sup>	0,182 <sup>ns</sup>	-0,446**	0,367*	0,075 <sup>ns</sup>
OUT-NOV	0,151 <sup>ns</sup>	0,515***	0,258 <sup>ns</sup>	0,465**	0,206 <sup>ns</sup>	0,536***	0,512***
NOV-DEZ	0,114 <sup>ns</sup>	0,548***	0,286 <sup>ns</sup>	0,431**	0,072 <sup>ns</sup>	0,537***	0,543***
DEZ-JAN	-0,018 <sup>ns</sup>	0,219 <sup>ns</sup>	0,113 <sup>ns</sup>	0,412**	-0,002 <sup>ns</sup>	0,351*	0,326*
JAN-FEV	0,111 <sup>ns</sup>	0,334*	0,050 <sup>ns</sup>	0,432**	0,225 <sup>ns</sup>	0,483**	0,361*
FEV-MAR	0,408**	0,434**	0,149 <sup>ns</sup>	0,390**	-0,172 <sup>ns</sup>	0,543***	0,398**
OUT-NOV-DEZ	0,181 <sup>ns</sup>	0,557***	0,293 <sup>ns</sup>	0,477**	0,134 <sup>ns</sup>	0,510***	0,569***
NOV-DEZ-JAN	0,006 <sup>ns</sup>	0,408**	0,182 <sup>ns</sup>	0,416**	0,084 <sup>ns</sup>	0,554***	0,436**
DEZ-JAN-FEV	0,161 <sup>ns</sup>	0,397**	0,135 <sup>ns</sup>	0,472**	0,191 <sup>ns</sup>	0,534***	0,497**
JAN-FEV-MAR	0,238 <sup>ns</sup>	0,365*	0,088 <sup>ns</sup>	0,380**	-0,127 <sup>ns</sup>	0,556***	0,329*
OUT-NOV-DEZ-JAN	0,073 <sup>ns</sup>	0,495**	0,219 <sup>ns</sup>	0,455**	0,138 <sup>ns</sup>	0,550***	0,503**
NOV-DEZ-JAN-FEV	0,134 <sup>ns</sup>	0,495**	0,180 <sup>ns</sup>	0,461**	0,212 <sup>ns</sup>	0,621***	0,534***
DEZ-JAN-FEV-MAR	0,266 <sup>ns</sup>	0,418**	0,154 <sup>ns</sup>	0,421**	-0,148 <sup>ns</sup>	0,582***	0,456**

1- Fronteira Oeste; 2- Campanha; 3- Depressão Central; 4- Planície Interna à Lagoa dos Patos; 5- Planície Externa à Lagoa dos Patos 6-Zona Sul; RS- Rio Grande do Sul. Pelo teste t: ns - valores não significativos; \*\*\* - valores significativos a  $P < 0,01$ ; \*\* - valores significativos a  $P < 0,05$ ; \* - valores significativos a  $P < 0,1$ .

#### 4.2.2.2 Temperatura mínima do ar

As correlações entre o número de dias com temperatura mínima igual ou inferior a 15°C e o rendimento (Tabela 7), com exceção das regiões da Depressão Central (Região 3) e Zona Sul (Região 6), apresentaram valores negativos em todas as regiões orizícolas e também para o Estado do Rio Grande do Sul. Isto demonstra que uma maior ocorrência de dias com temperaturas mínimas baixas é um fator que pode penalizar o rendimento, também apontado por Carmona (2001). O mês mais crítico foi março, visto que neste mês foram observados os maiores valores de correlação na maior parte das regiões orizícolas e, também, para o Estado como um todo. Em outras combinações temporais foram observados coeficientes de correlação significativos, mas sempre envolvendo o mês de março. Estes resultados, especialmente para as regiões da Fronteira Oeste (Região 1), Campanha (Região 2) e Planície Interna (Região 4) mostram

concordância com o Zoneamento Agrícola do arroz irrigado proposto por Steinmetz e Braga. (2001). Os critérios utilizados foram temperatura do solo no período de semeadura, probabilidade de frio nos períodos de microesporogênese e floração e também máxima disponibilidade de radiação solar no período de enchimento do grão, o que é de fundamental importância para que as perdas sejam minimizadas, devido, principalmente, a esterilidade das espiguetas.

O fato da Zona Sul (Região 6) não ter apresentado correlações significativas entre a temperatura mínima e o rendimento nos períodos analisados é intrigante, pois o mapeamento das probabilidades de ocorrência de temperaturas mínimas do ar, durante o período reprodutivo do arroz irrigado (Steinmetz et al., 2003b) indica que esta Região está entre as que apresentam maior probabilidade de ocorrência destas temperaturas.

Já no caso da Depressão Central (Região 3), as correlações não significativas (tanto com a radiação solar, quanto com a temperatura mínima), pode estar relacionado com o fato de que as variáveis meteorológicas dessa região serem provenientes apenas de uma estação meteorológica (Santa Maria) e os rendimentos usados serem os médios de toda a região.

TABELA 7. Coeficiente de correlação entre o número de dias com temperatura igual ou inferior a 15°C e o rendimento (corrigido) de grãos da cultura do arroz irrigado nas diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, período 1982-2006.

MESES	REGIÕES ORIZÍCOLAS						
	1	2	3	4	5	6	RS
DEZ	0,194 <sup>ns</sup>	-0,052 <sup>ns</sup>	0,226 <sup>ns</sup>	0,133 <sup>ns</sup>	0,171 <sup>ns</sup>	-0,188 <sup>ns</sup>	0,150 <sup>ns</sup>
JAN	-0,038 <sup>ns</sup>	-0,202 <sup>ns</sup>	0,101 <sup>ns</sup>	-0,204 <sup>ns</sup>	0,175 <sup>ns</sup>	-0,169 <sup>ns</sup>	-0,183 <sup>ns</sup>
FEV	0,069 <sup>ns</sup>	-0,002 <sup>ns</sup>	0,211 <sup>ns</sup>	-0,033 <sup>ns</sup>	0,174 <sup>ns</sup>	0,052 <sup>ns</sup>	0,060 <sup>ns</sup>
MAR	-0,565***	-0,562***	-0,172 <sup>ns</sup>	-0,533***	-0,465**	-0,145 <sup>ns</sup>	-0,579***
DEZ-JAN	0,166 <sup>ns</sup>	-0,131 <sup>ns</sup>	0,236 <sup>ns</sup>	0,011 <sup>ns</sup>	0,222 <sup>ns</sup>	-0,218 <sup>ns</sup>	0,129 <sup>ns</sup>
JAN-FEV	0,031 <sup>ns</sup>	-0,110 <sup>ns</sup>	0,193 <sup>ns</sup>	-0,133 <sup>ns</sup>	0,196 <sup>ns</sup>	-0,077 <sup>ns</sup>	-0,062 <sup>ns</sup>
FEV-MAR	-0,461**	-0,431**	-0,038 <sup>ns</sup>	-0,466**	-0,243 <sup>ns</sup>	-0,098 <sup>ns</sup>	-0,470**
DEZ-JAN-FEV	0,165 <sup>ns</sup>	-0,103 <sup>ns</sup>	0,278 <sup>ns</sup>	-0,003 <sup>ns</sup>	0,248 <sup>ns</sup>	-0,182 <sup>ns</sup>	0,121 <sup>ns</sup>
JAN-FEV-MAR	-0,427**	-0,425**	0,002 <sup>ns</sup>	-0,433**	-0,129 <sup>ns</sup>	-0,153 <sup>ns</sup>	-0,462**

1- Fronteira Oeste; 2- Campanha; 3- Depressão Central; 4- Planície Interna à Lagoa dos Patos; 5- Planície Externa à Lagoa dos Patos 6-Zona Sul; RS- Rio Grande do Sul. Pelo teste t: ns - valores não significativos; \*\*\* - valores significativos a  $P < 0,01$ ; \*\* - valores significativos a  $P < 0,05$ ; \* - valores significativos a  $P < 0,1$ .

### **4.3. Análise dos dados espectrais em áreas de arroz irrigado**

Neste item são apresentados os testes realizados buscando a introdução de dados espectrais como variável de entrada do modelo de estimativa do rendimento do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. A idéia central é que dados oriundos de imagens do sensor MODIS podem introduzir no modelo indicadores de outros fatores (que não os agrometeorológicos) que determinam o rendimento, especialmente as práticas de manejo (cultivar, época de semeadura, adubação, etc...), o que tem sido evidenciado em trabalhos anteriores como os de Rudorff (1985), Fontana e Berlato (1998), Melo (2003) e Rizzi (2005), entre outros.

#### **4.3.1. Seqüência temporal**

As Figuras 17 e 18 mostram as séries temporais médias de NDVI e EVI, referentes as safras agrícolas 2000/2001 até 2005/2006, para o Estado do Rio Grande do Sul. Nas figuras é possível observar a evolução temporal média das principais áreas utilizadas com culturas anuais de primavera-verão no Estado. Nestas áreas, os IVs foram baixos nos períodos de implementação das culturas (outubro e novembro), crescentes durante os períodos de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo (dezembro e janeiro), atingindo o máximo valor durante o estágio de enchimento do grão (fevereiro) e voltado a decrescer durante a maturação (março).

Na porção norte do Rio Grande do Sul a cultura predominante é a soja, a qual tem sido intensamente estudada nos trabalhos desenvolvidos no âmbito do projeto GeoSafras (Bianchi et al., 2005; Melo et al., 2007; Wagner et al. 2007). A área cultivada é de cerca de 3,5 milhões de hectares (IBGE, 2007) e apresenta uma distribuição espacial compacta, como pode ser observada especialmente nos meses de novembro e fevereiro (Figuras 17 e 18).

As áreas de cultivo de arroz irrigado estão localizadas na metade sul do Estado e apresentam uma distribuição espacial distinta da cultura da soja. O padrão observado é de lavouras de arroz irrigado distribuídas de forma dispersa, o que é conseqüência das características de manejo desta cultura. As áreas de cultivo predominam na Fronteira oeste, Campanha, Depressão Central e próximo à Lagoa dos Patos.

Observa-se, ainda, que ambos índices, NDVI e EVI, mantiveram o mesmo padrão de evolução temporal, embora o EVI sempre tenha apresentado valores mais baixos.

As séries temporais de NDVI e EVI, referentes às safras agrícolas 2000/2001 até 2005/2006, do Estado do Rio Grande do Sul encontram-se nos Apêndices 2 a 13.

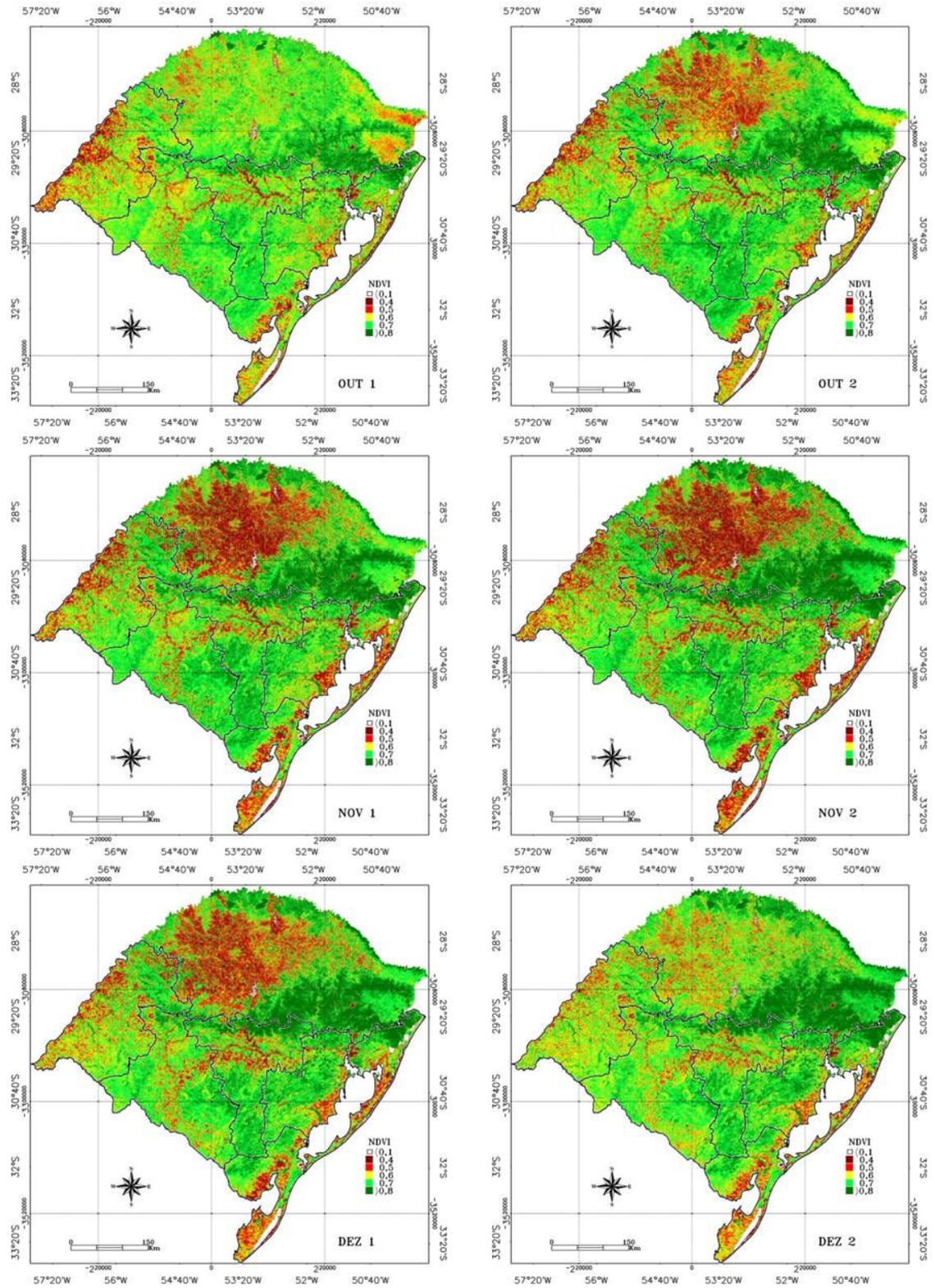


FIGURA 17. Série temporal média de NDVI para o Rio Grande do Sul referente às safras 2000/2001 até 2005/2006 (outubro a março).

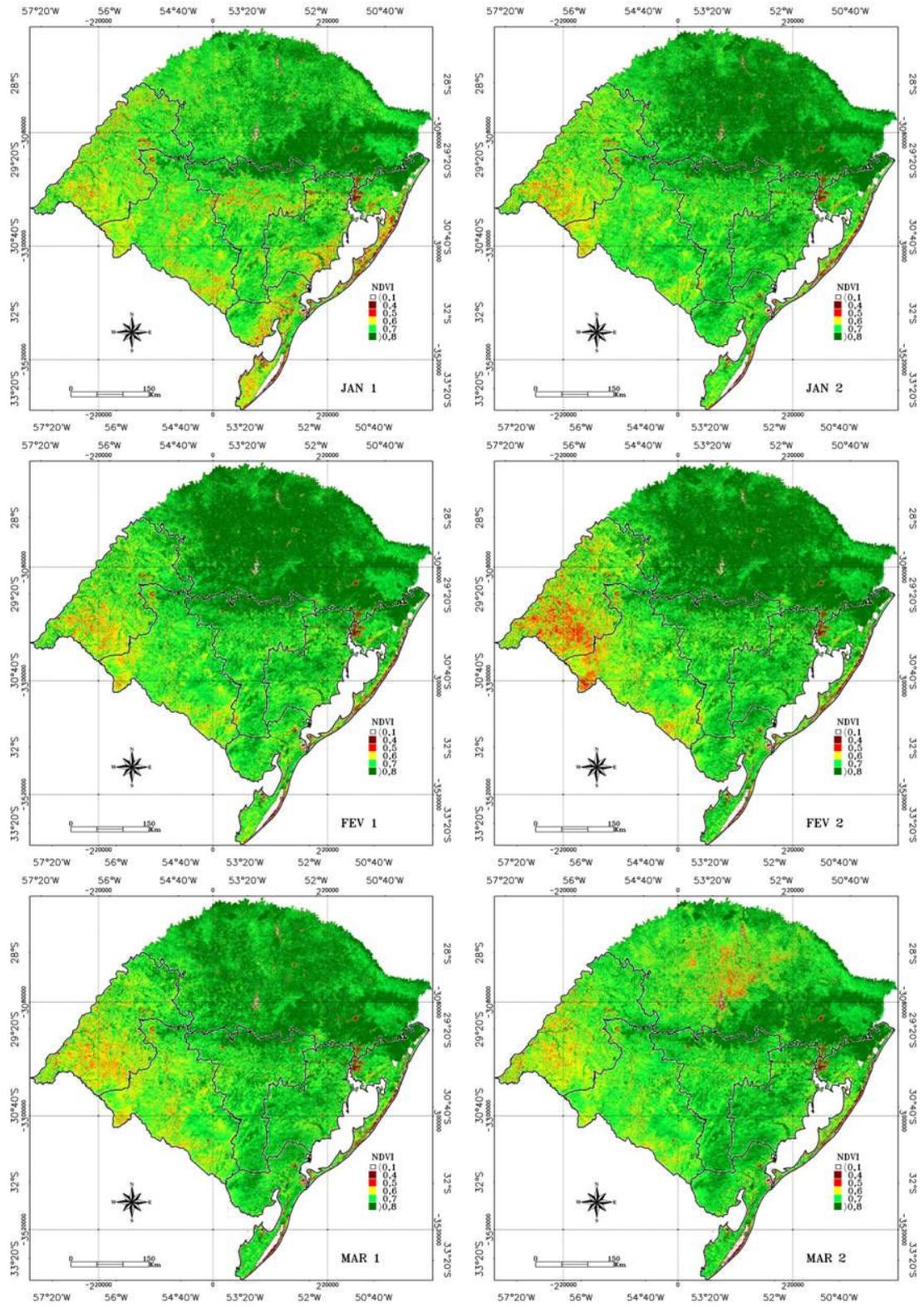


FIGURA 17. Continuação...

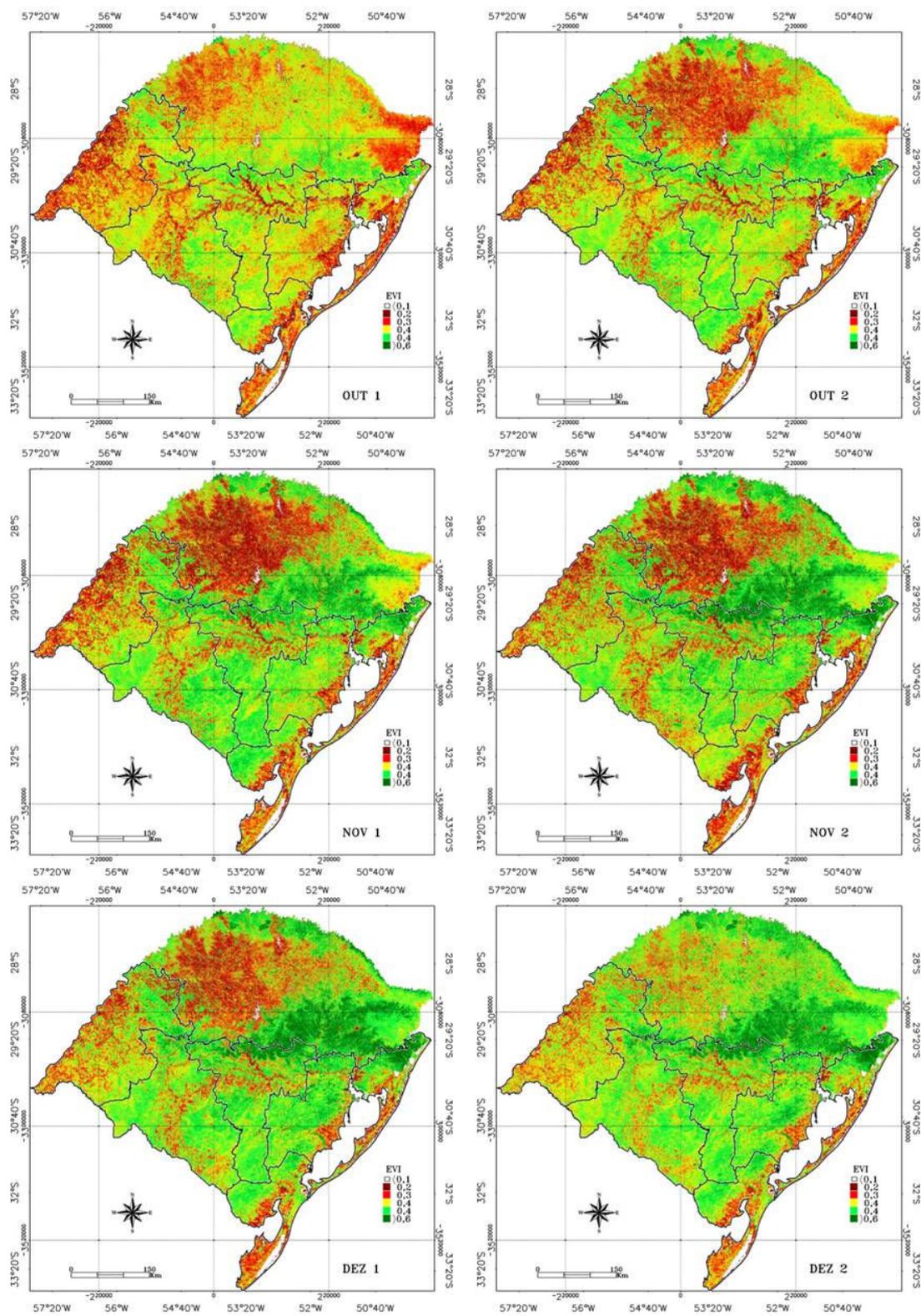


FIGURA 18. Série temporal média de EVI para o Rio Grande do Sul referente às safras 2000/2001 até 2005/2006 (outubro a março).

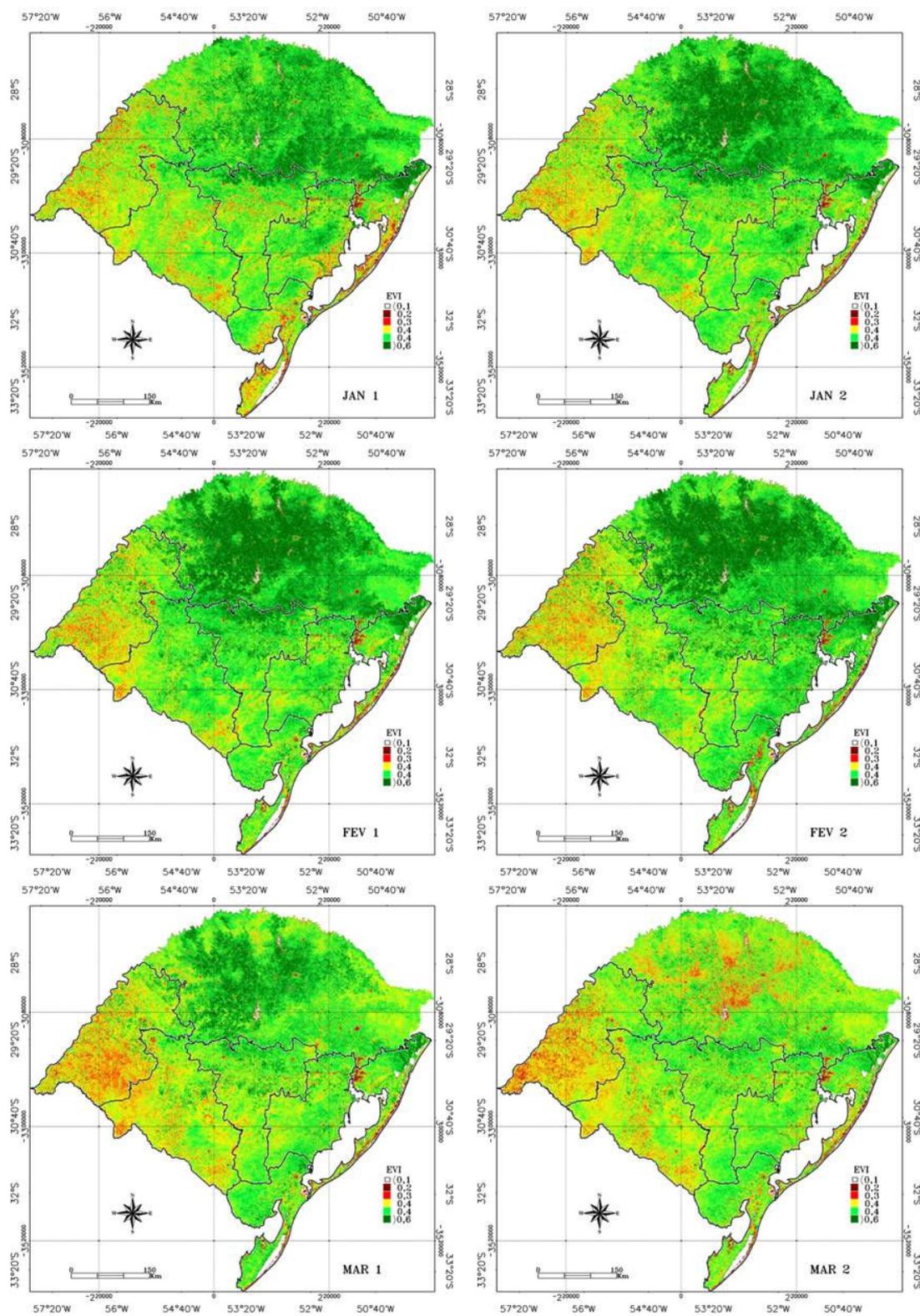


FIGURA 18. Continuação...

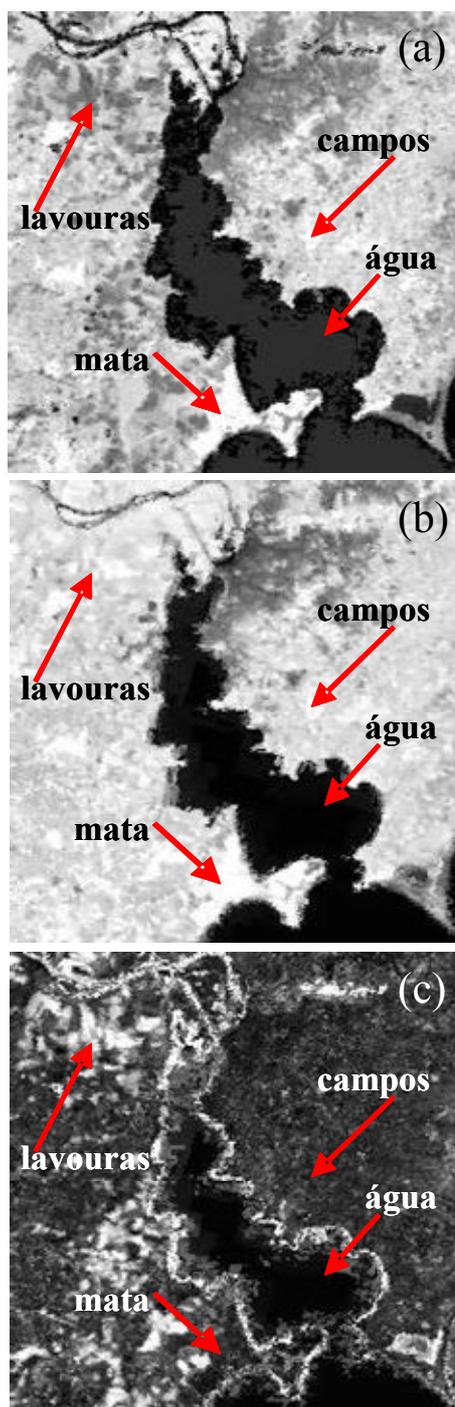
### 4.3.2. Determinação da área ocupada com arroz irrigado

A definição da área de cultivo, ou seja, da área a ser utilizada para a extração dos valores espectrais (indicadores do rendimento) da cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul é um ponto importante deste trabalho.

Em estudo com a cultura soja, Melo (2003) utilizou o NDVI de imagens NOAA/AVHRR extraído de grandes áreas abrangendo um grupo grande de municípios. Já Rizzi (2005), também para a cultura da soja, utilizou uma máscara construída a partir de imagens *Landsat* e aplicou esta máscara para a extração dos valores de EVI e NDVI de imagens MODIS. Ambos autores obtiveram resultados muito bons utilizando abordagens distintas, o que possivelmente está associado ao padrão de distribuição espacial da cultura da soja, como mencionado anteriormente (Figura 17). Já para a cultura do arroz irrigado, dado o padrão distinto, foi necessário o teste de uma metodologia muito simples para limitar a análise de dados espectrais às áreas onde a cobertura mais provavelmente era “arroz”.

Um exemplo dos testes feitos para definição das máscaras de cultura é apresentado nas Figuras 19 e 20. As áreas de cultivo apresentam grande variação temporal, ou seja, baixos IVs na composição de mínimo (Figura 19.a) e altos na composição de máximo (Figura 19.b). Já as áreas de campos, matas e água apresentam uma variação muito pequena entre as composições. Assim, na imagem diferença (Figura 19.c) as áreas de lavouras apresentaram os maiores valores, enquanto que as outras áreas apresentaram valores bem menores.

Para se definir as áreas de cultivo testaram-se alguns limiares sobre a imagem diferença. Observa-se que valores pequenos de limiares superestimam as áreas cultivadas com arroz irrigado (Figura 20.a), enquanto que valores altos subestimam as áreas cultivadas (Figura 20.b). Para a área do exemplo apresentado o limiar que melhor representou as áreas de cultivo de arroz irrigado, foi o de 0,42 (Figura 20.c). Metodologia semelhante foi utilizada por Fontana et al. (2007) para definir a área de cultivo em região produtora de trigo da Austrália, com resultados bastante bons.



Menor  
NDVI



Maior  
NDVI

FIGURA 19. Recorte de uma imagem MODIS no Rio Grande do Sul: (a) composição de mínimo NDVI; (b) composição de máximo NDVI, (c) imagem diferença.

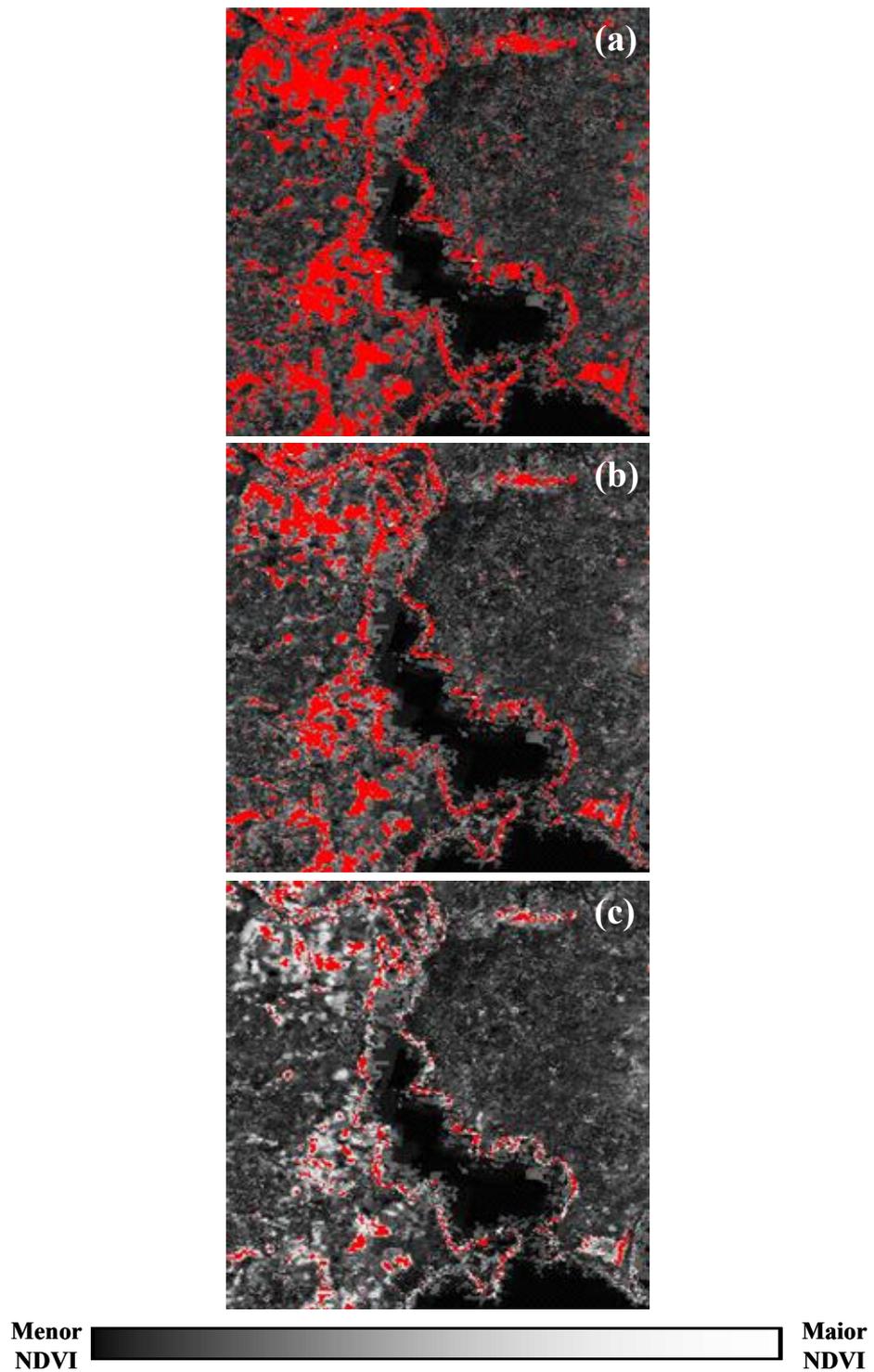


FIGURA 20. Recorte de uma imagem MODIS no Rio Grande do Sul: (a) imagem diferença com aplicação de limiar 0,30, (b) imagem diferença com aplicação de limiar 0,42, (c) imagem diferença com aplicação de limiar 0,60.

#### 4.3.2.1. Determinação da área ocupada com arroz irrigado através do NDVI e EVI

Nas Figuras 21 e 22 são apresentadas as áreas de cultivo determinadas a partir dos limiares escolhidos e aplicados nas imagens de NDVI e EVI para cada região orizícola do Estado. Verifica-se que em todos os anos e regiões, os valores de área estimada através das imagens foram superiores aos dados oficiais. Este comportamento foi consequência da metodologia proposta, visto que a intenção foi de reduzir nas análises a resposta espectral oriunda de áreas não agrícolas, sem, entretanto, eliminar *pixels* de lavouras com crescimento abaixo do normal. As respostas destes *pixels* são importantes para geração das estimativas de rendimento. Outro aspecto importante que suporta o argumento de utilizar uma área superior àquela estimada pelo IBGE, é o trabalho de Weber et al. (2007), que mostra que mapeamentos feitos com imagens *Landsat* tendem, especialmente na Fronteira Oeste, a apresentar uma área de cultivo de arroz no Rio Grande do Sul maior do que a apontada pelo IBGE. Neste caso, trabalhos de campo atestam a confiabilidade do mapeamento através de imagens.

Cabe ressaltar que, os limiares escolhidos para determinar a área cultivada com arroz irrigado através do EVI foram menores que os limiares escolhidos para se estimar a área através do NDVI, em todas as regiões orizícolas, com exceção da Planície Interna onde o limiar escolhido foi o mesmo. Isto se deve ao fato, de o EVI normalmente apresentar valores menores que o NDVI, sobre uma determinada área e sobre uma mesma cultura agrícola.

Nas Tabelas 8 e 9 nota-se que os maiores desvios médios das áreas estimadas através dos IVs em relação as áreas fornecidas pelo IBGE ocorreram nas regiões da Fronteira Oeste (25%), Planície Externa (26,5%) e Zona Sul (47,5%) para o NDVI e nas regiões da Fronteira Oeste (72,6%), Campanha (24,3%) e Planície Externa (23,5%) para o EVI. Especialmente na Fronteira Oeste pode-se esperar que as áreas oficiais estejam subestimadas. Apesar de ousada a afirmação, ela tem suporte no fato de que a CONAB, baseada nos trabalhos de Weber et al. (2007), está revisando para cima a área cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul nas últimas três safras, o que representa um acréscimo de cerca de 21 mil ha na Fronteira Oeste (Correio do Povo, 02/06 2007).

Os menores desvios, para ambos IVs, ocorreram nas regiões da Depressão Central e da Planície Interna, sendo de, respectivamente 12,8% e 16,6% para o NDVI e 20,9% e 19,9% para o EVI.

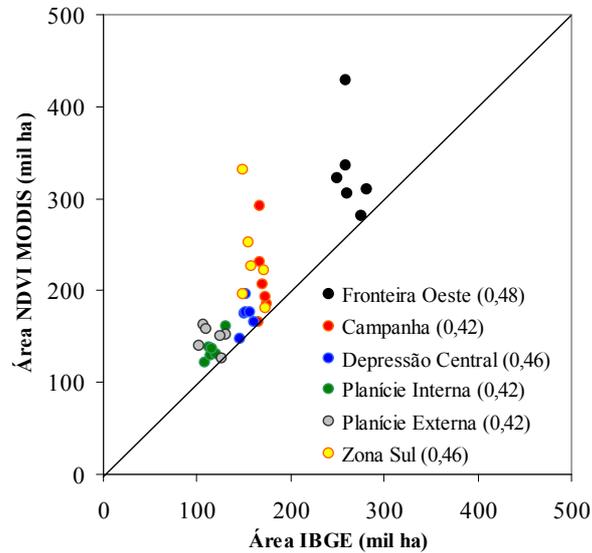


FIGURA 21. Relação entre a área cultivada com arroz irrigado nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, estimada através dos limiares aplicados ao NDVI e a área oficial fornecida pelo IBGE. Entre parênteses estão indicados os limiares utilizados em cada região orizícola.

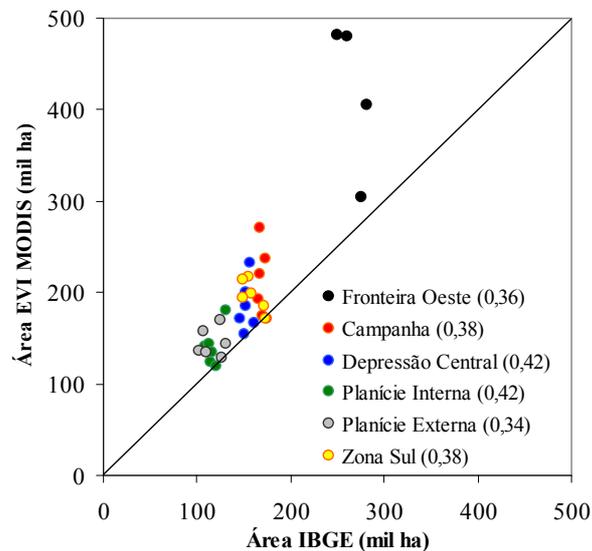


FIGURA 22. Relação entre a área cultivada com arroz irrigado nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, estimada através dos limiares aplicados ao EVI e a área oficial fornecida pelo IBGE. Entre parênteses estão indicados os limiares utilizados em cada região orizícola.

Embora tenham sido testados valores menores de limiares para o EVI, este IV foi o que apresentou o maior desvio médio (36%) entre a área estimada e a oficial quando se considerou todo Estado.

TABELA 8. Área média da cultura do arroz irrigado (mil ha) no Rio Grande do Sul estimada com imagens NDVI/MODIS e dados oficiais (IBGE). Período 2000/2001 a 2005/2006.

REGIÃO	NDVI	IBGE	DESVIOS (%)
Fronteira Oeste	330,4	264,4	25,0
Campanha	211,9	169,8	24,8
Depressão Central	172,8	153,2	12,8
Planície Interna	136,5	116,9	16,7
Planície Externa	148,1	117,0	26,5
Zona Sul	235,1	159,4	47,5
RS	1234,8	980,7	25,9

TABELA 9. Área média da cultura do arroz irrigado (mil ha) no Rio Grande do Sul estimada com imagens EVI/MODIS e dados oficiais (IBGE). Período 2000/2001 a 2005/2006.

REGIÃO	EVI	IBGE	DESVIOS (%)
Fronteira Oeste	456,4	264,4	72,6
Campanha	211,0	169,8	24,3
Depressão Central	185,1	153,2	20,9
Planície Interna	140,1	116,9	19,9
Planície Externa	144,6	117,0	23,5
Zona Sul	196,7	159,4	23,4
RS	1334,0	980,7	36,0

A área estimada de cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul usando NDVI foi 1.234,8 mil ha e de 1.334 mil ha para o EVI (Tabelas 8 e 9), ambas superiores aos 980,7 mil ha estimados pelo IBGE.

As Tabelas completas com os resultados dos mapeamentos de área, com NDVI e EVI, das seis regiões orizícolas para os anos agrícolas de 2000 até 2006 encontram-se descritas nos Apêndices 14 e 15.

### 4.3.3. Relação entre NDVI e EVI

A relação entre o NDVI e EVI extraídos das áreas cultivadas com arroz irrigado nas seis regiões orizícolas e nas seis safras analisadas é mostrada na Figura 23. Nota-se que o NDVI apresenta valores sempre superiores ao do EVI e que existe uma relação curvilínea entre os dois índices de vegetação, com o NDVI tendendo a saturar em altos valores. Diversos estudos vêm demonstrando que em altas densidades de cobertura vegetal o NDVI perde a capacidade de distinguir variações de biomassa (Huete et al., 2002; Fonseca et al., 2006; Wardlow et al, 2007).

Padrão semelhante de comportamento entre NDVI e EVI observado neste trabalho foi encontrado por Huete et al. (2002), demonstrando que, portanto, o EVI parece ter uma melhor sensibilidade para detectar as variações de biomassa em condições de alta densidade da mesma. Esta é uma característica desejável ao indicador espectral de rendimento, que será analisada nos itens seguintes.

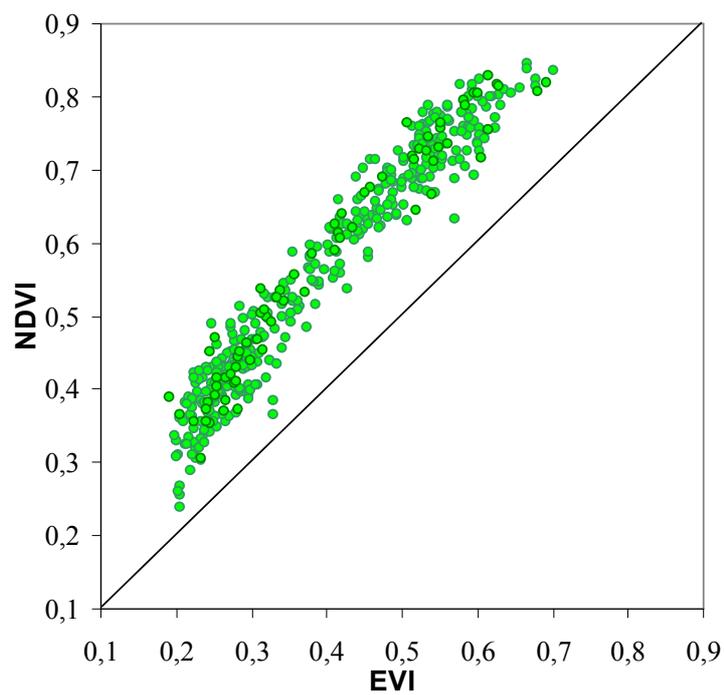


FIGURA 23. Relação entre NDVI e EVI das áreas ocupadas com arroz irrigado, em todas as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, para o período de 2000/2001 a 2005/2006.

#### **4.3.4. Perfis temporais das áreas de arroz irrigado**

Os perfis temporais dos IVs tendem a expressar as condições de crescimento e desenvolvimento da biomassa de uma dada região e têm sido apontados como importantes componentes de sistemas de monitoramento agrometeorológico (Melo, 2003; Rizzi 2005; Fontana, 2007). Tanto nas imagens NDVI como nas imagens EVI foi evidente a influência das condições meteorológicas sobre o padrão de comportamento dos perfis temporais.

Através das análises dos perfis temporais de NDVI (Figuras 24), notou-se um padrão típico de cultivos em todas as regiões e anos, semelhante ao verificado por Jacobsen et al. (2003). Estes autores, estudando a alteração do padrão de evolução temporal do NDVI sobre as diferentes regiões do Estado do Rio Grande do Sul em anos de eventos ENOS (El Niño Oscilação Sul), mostraram que as diferentes regiões possuem padrões específicos e distintos entre si. Numa dada região, as variações entre os anos dos perfis temporais de NDVI são determinadas pela disponibilidade de radiação solar e condições térmicas, porém alteradas pela disponibilidade hídrica, ou seja, as alterações nos perfis espectrais têm associação com as condições meteorológicas.

Os valores de NDVI nas áreas de arroz irrigado no Rio Grande do Sul foram menores nos estágios de implementação da cultura e entrada de água na lavoura, que segundo o calendário agrícola médio da cultura corresponde aos meses de outubro e novembro. Os períodos de máximo NDVI ocorreram em fevereiro e corresponderam aos estágios de floração, enchimento do grão e maturação. Observou-se, entretanto, que houve variação entre os perfis nas diferentes safras e regiões produtoras, o que esteve relacionado às diferenças das condições de crescimento e desenvolvimento da cultura.

Através da análise da Figuras 25, nota-se que os perfis temporais, das áreas de arroz irrigado, de EVI apresentaram o mesmo padrão de comportamento observado no NDVI, embora os valores de NDVI sempre tenham sido superiores aos do EVI. Resultado semelhante foi observado por Rizzi (2005), sobre a cultura da soja no Rio Grande do Sul.

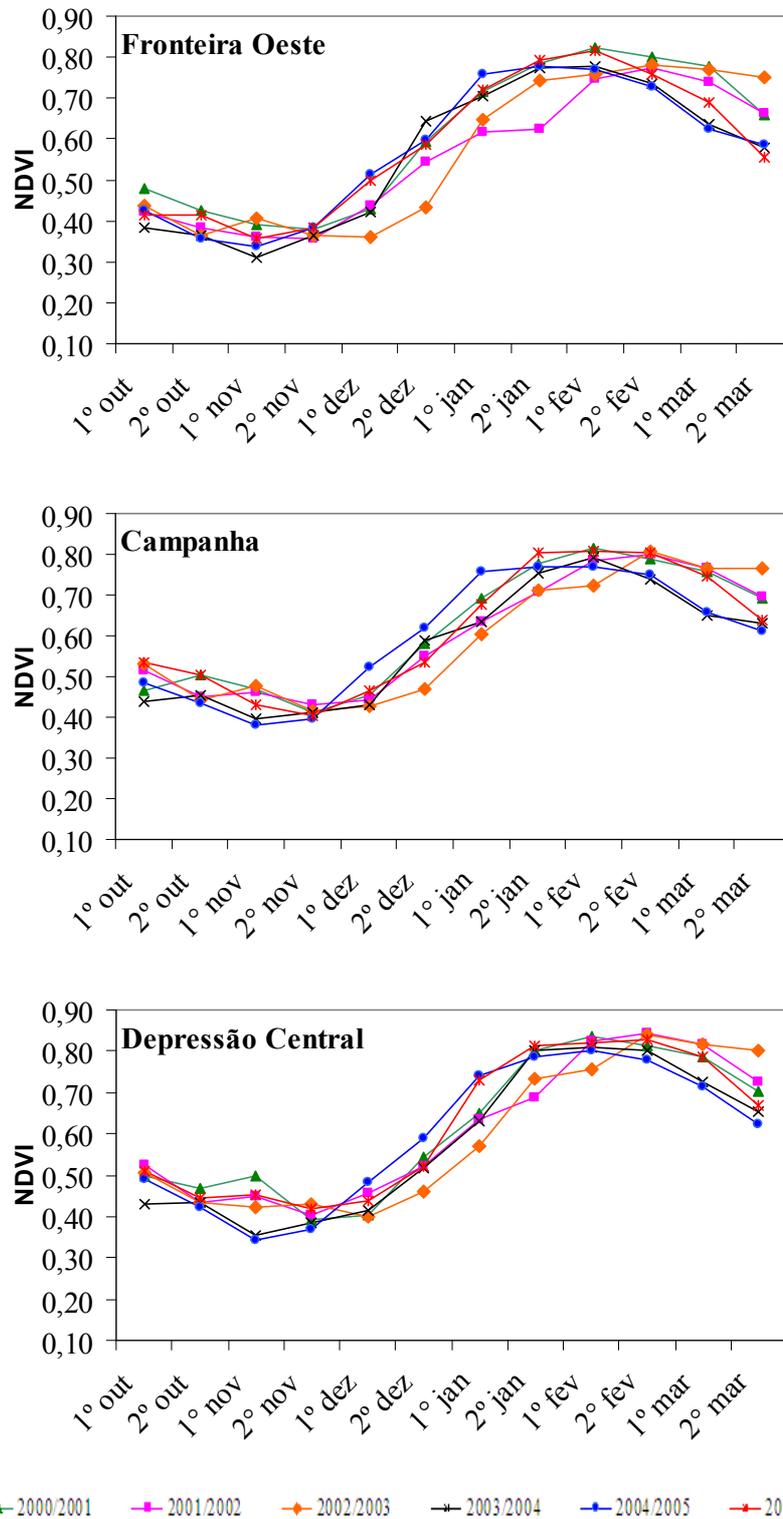


FIGURA 24. Perfis temporais de NDVI referentes às safras agrícolas de 2000/2001 a 2005/2005, para as diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul.

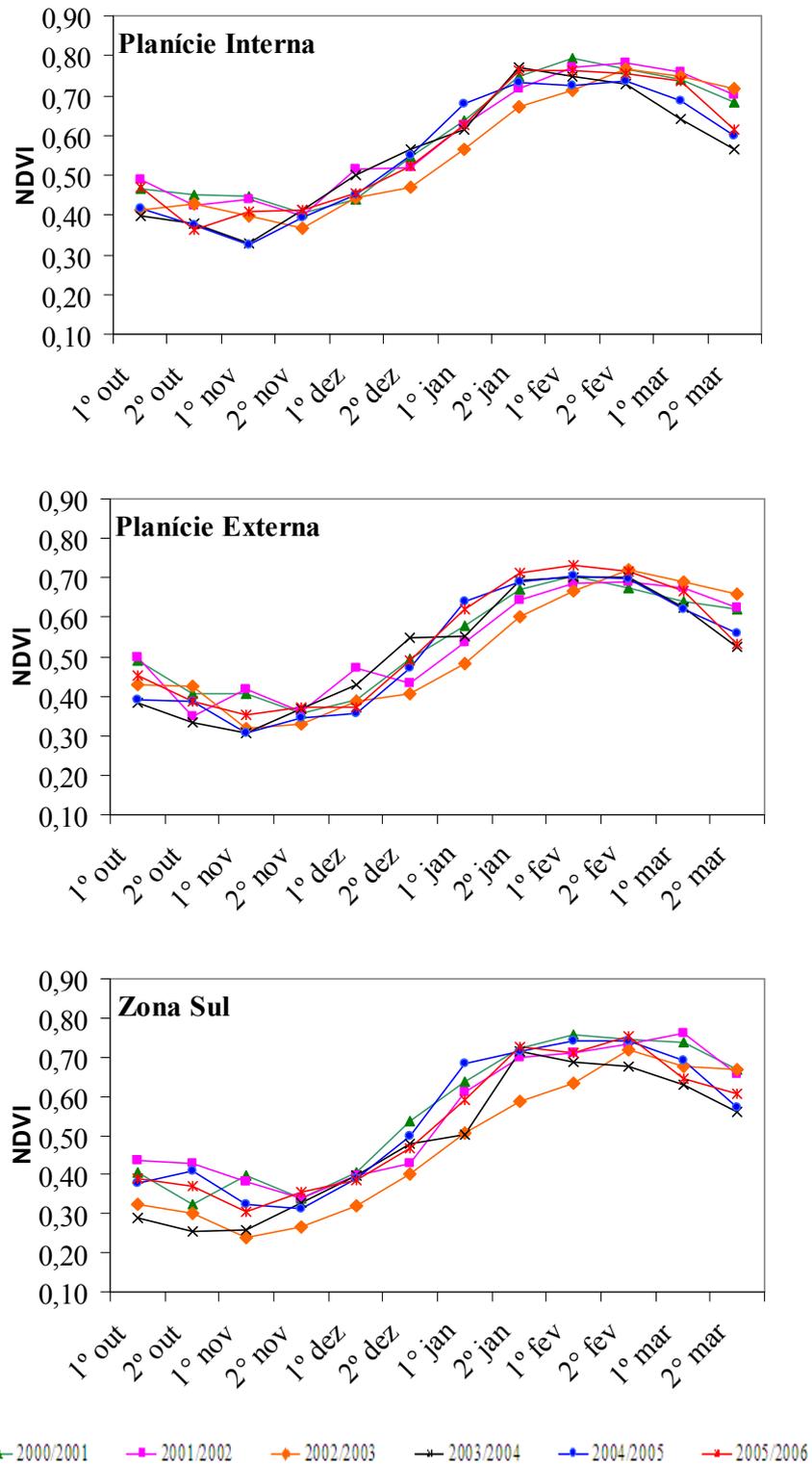


FIGURA 24. Continuação ...

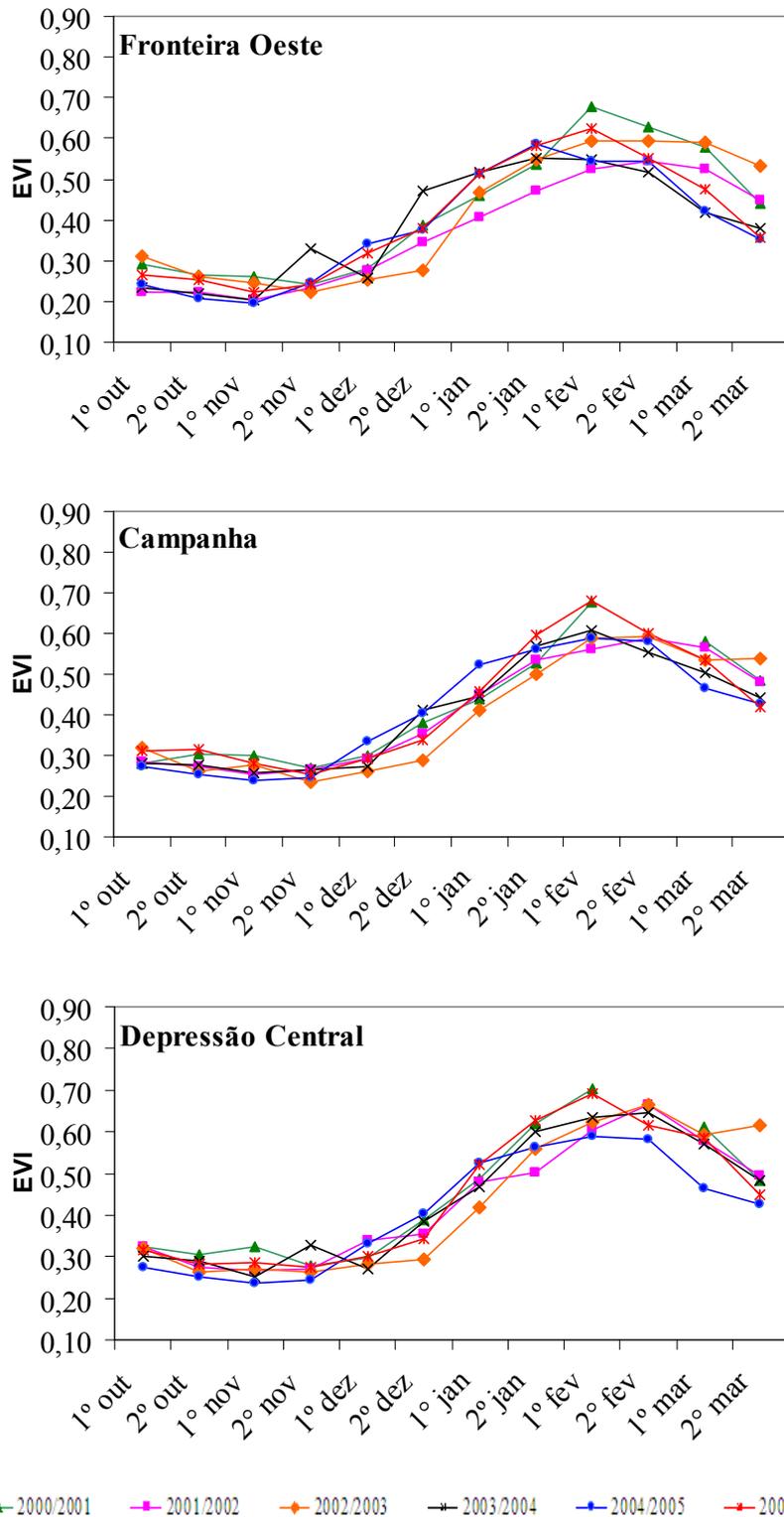


FIGURA 25. Perfis temporais de EVI referentes às safras agrícolas de 2000/2001 a 2005/2005, para as diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul.

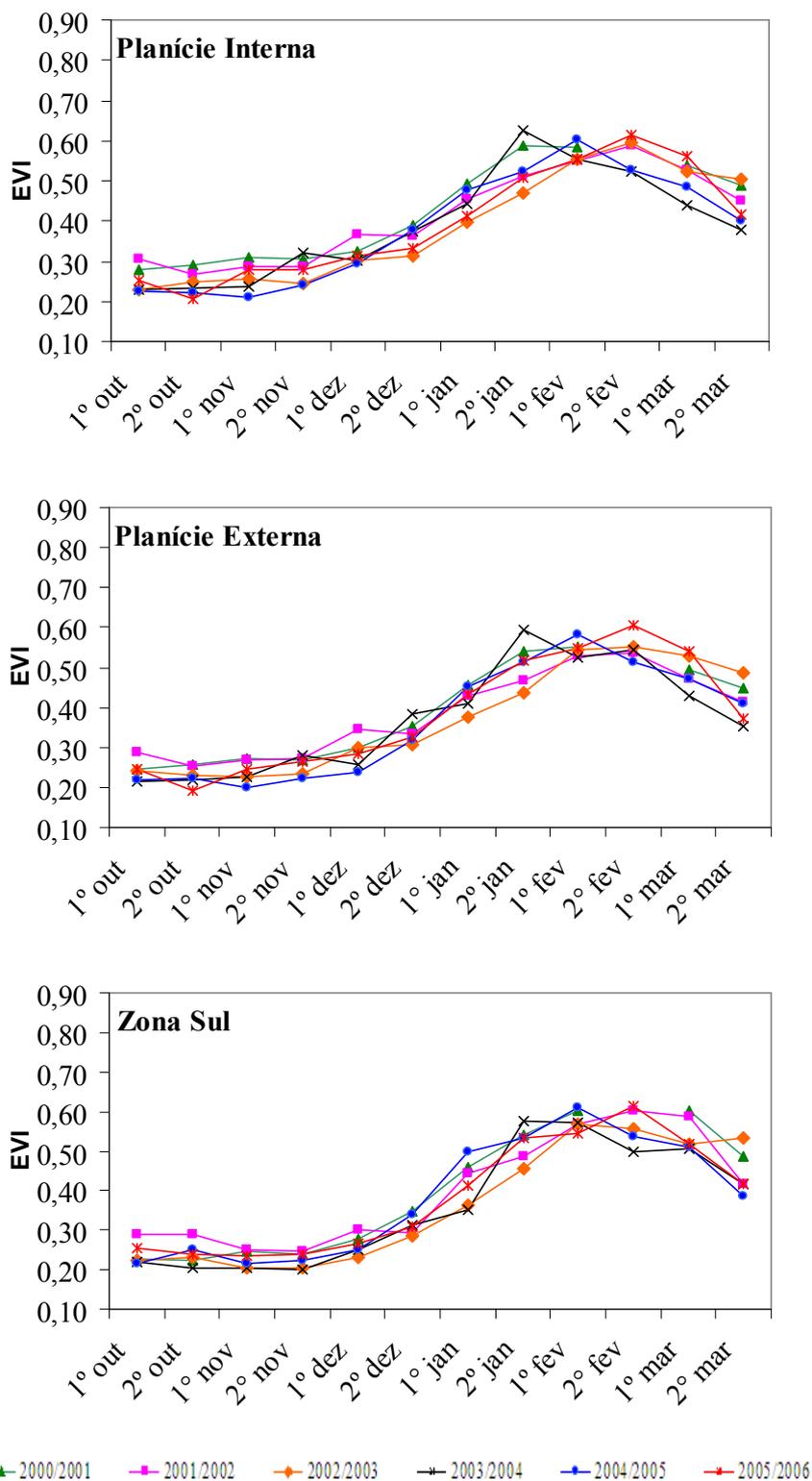


FIGURA 25. Continuação...

#### **4.3.4.1. Perfis temporais médios de NDVI e EVI das áreas de arroz irrigado**

A Figura 26 apresenta os perfis temporais médios de NDVI e EVI das áreas ocupadas com arroz irrigado, em cada região orizícola, utilizando as médias dos anos agrícolas de 2000/2001 até 2005/2006. A comparação visual entre os perfis temporais médios de NDVI e EVI mostra que ambos índices apresentam praticamente o mesmo comportamento, só que em escalas diferentes. O NDVI manteve valores maiores do que o EVI durante todo o período. Também Huete et al. (2002) e Wardlow et al. (2007) mostram que NDVI e EVI sobre a mesma área e cultura, apresentam uma evolução temporal muito semelhante, só que com valores de NDVI mais elevados.

As comparações apresentadas (Figura 26) foram feitas usando a informação média dos seis anos analisados e, portanto, existe a tendência de suavizar as curvas. O esperado é que efetivamente o EVI apresente melhor poder de discriminação da biomassa em condições de altas densidades, dada a relação curvilínea obtida na Figura 23.

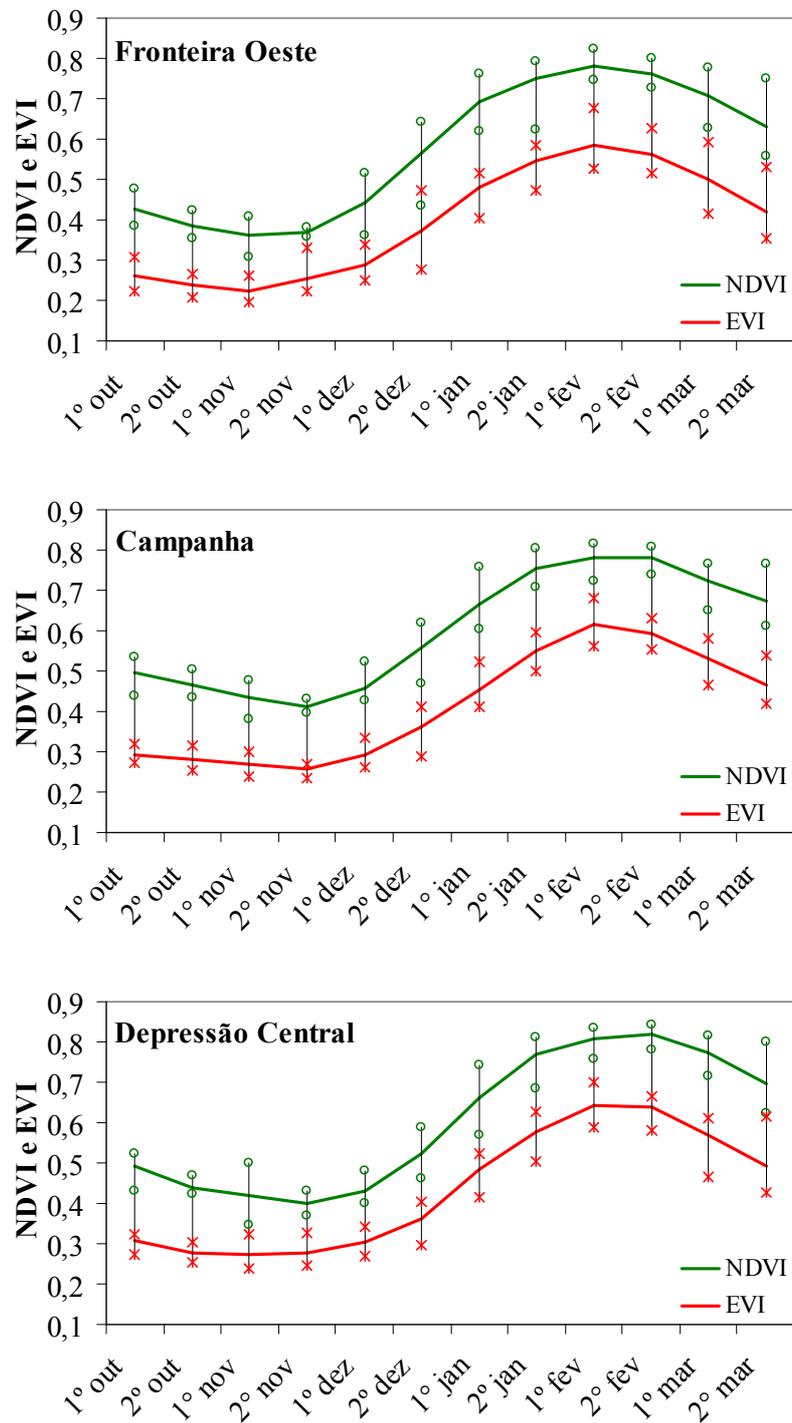


FIGURA 26. Perfis temporais médios de NDVI e EVI referentes às safras agrícolas de 2000/2001 a 2005/2005, para as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. As barras representam os valores máximos e mínimos de NDVI e EVI.

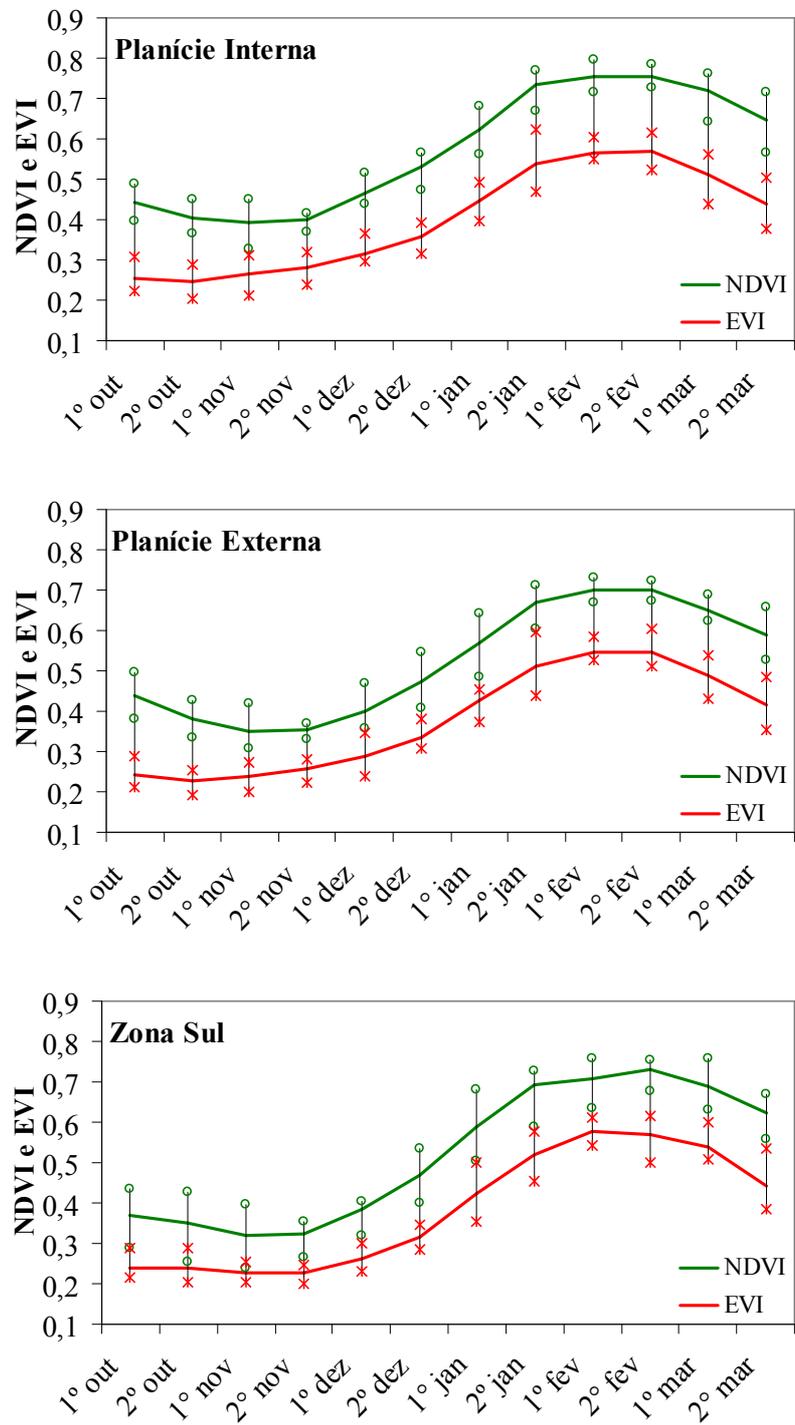


FIGURA 26. Continuação...

#### **4.3.5. Correlação entre os dados espectrais e o rendimento**

As análises feitas neste item tiveram como objetivo estabelecer a relação entre os dados espectrais e o rendimento, de forma a definir os melhores indicadores espectrais para comporem o modelo de estimativa do rendimento da cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

As correlações entre os IVs e o rendimento de arroz irrigado são mostradas nas Figuras 27 e 28. Através da análise destas figuras nota-se que, tanto nas análises de períodos de 16 dias como para os valores mensais, os padrões de correlações obtidos, para ambos IVs, refletem adequadamente a relação entre biomassa e rendimento de grãos ao longo do ciclo da cultura.

Observou-se que a maior parte das correlações foram negativas no período de implementação (outubro e novembro), positivas durante o período de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo até a maturação fisiológica (dezembro, janeiro até meados de fevereiro) e, por fim novamente negativa (final de fevereiro e março).

Considerando somente o período de correlações significativas (tanto positivas como negativas), verifica-se que os maiores valores ocorrem nas três regiões que apresentam os maiores rendimentos que são, respectivamente, a Fronteira Oeste, Campanha e Depressão Central.

Dezembro e janeiro foram os meses com maior frequência de correlações positivas e significativas, indicando que quanto maior for o desenvolvimento da biomassa das plantas (maior NDVI ou EVI) nestes meses, maior é a chance de obterem-se altos rendimentos de grãos.

Encontraram-se, valores significativos de correlações, pelo menos a 10%, para as composições de máximo nas regiões da Campanha (NDVI e EVI), Depressão Central (NDVI) e Planície Externa (NDVI e EVI), para as composições de mínimo na Campanha (EVI) e também para os IVs máximos na Planície Interna (EVI) e Externa (NDVI e EVI).

As demais correlações, incluindo dos IVs integrados de todo o período de cultivo não apresentaram valores significativos em região alguma.

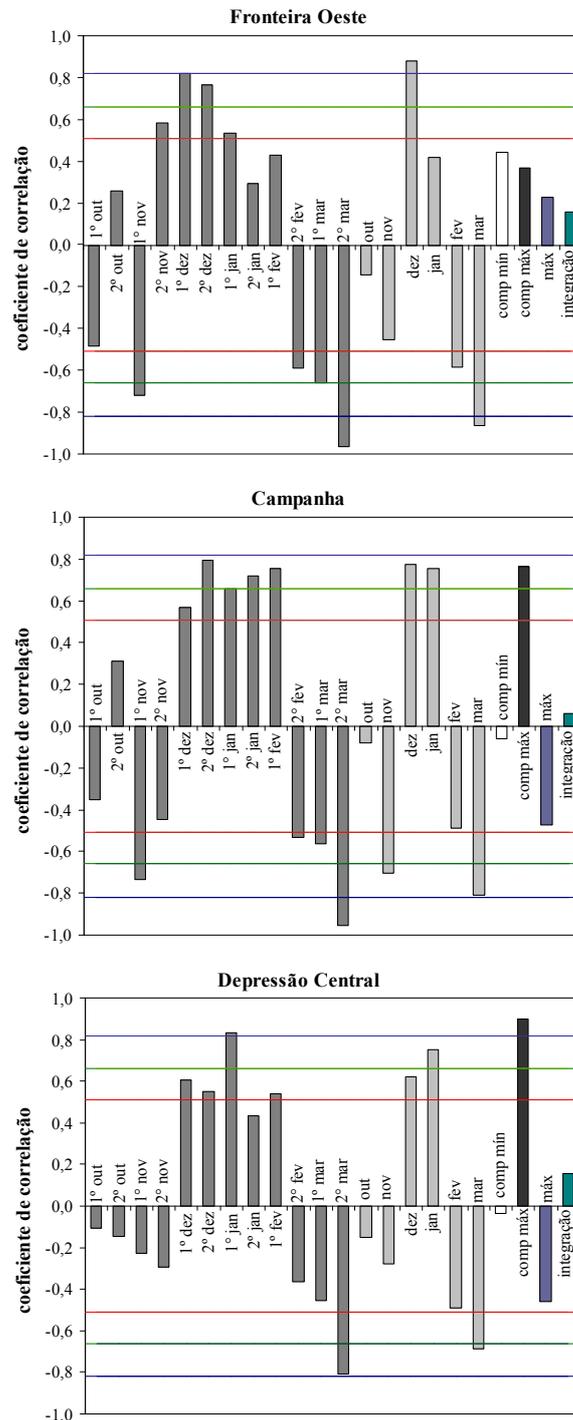


FIGURA 27. Correlações entre o rendimento e o NDVI/MODIS, nos diferentes períodos do ciclo da cultura do arroz irrigado, para as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. As linhas azuis representam significância de 1%, as linhas verdes significância de 5% e as vermelhas de 10%.

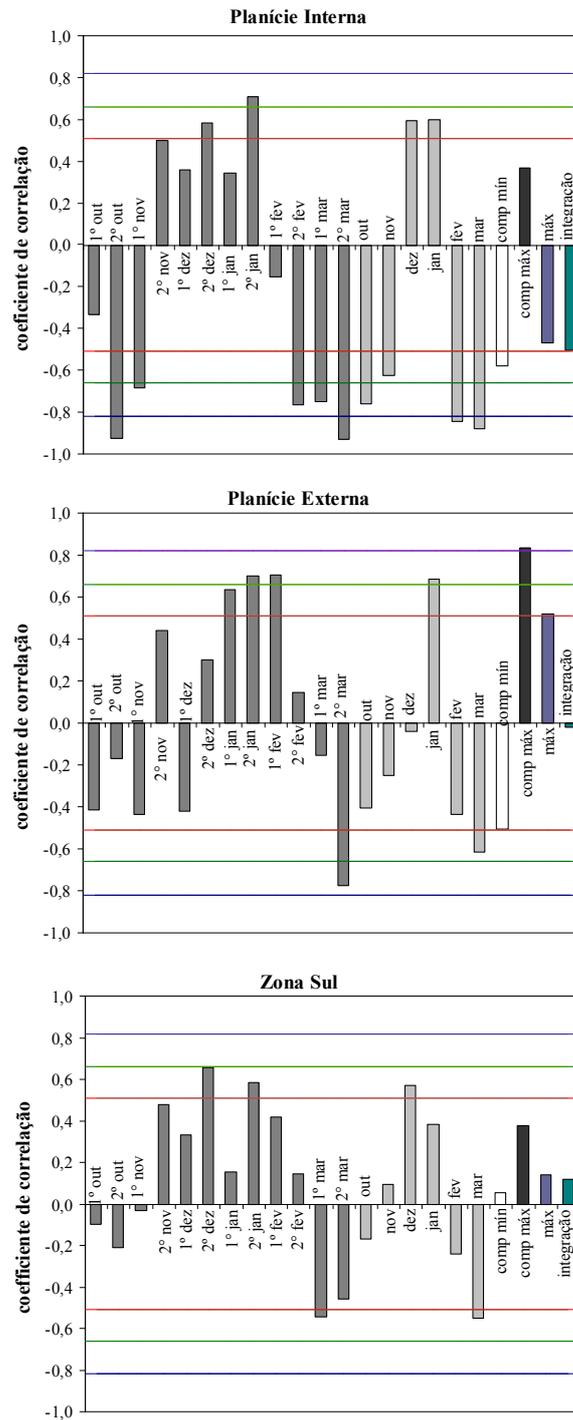


FIGURA 27. Continuação...

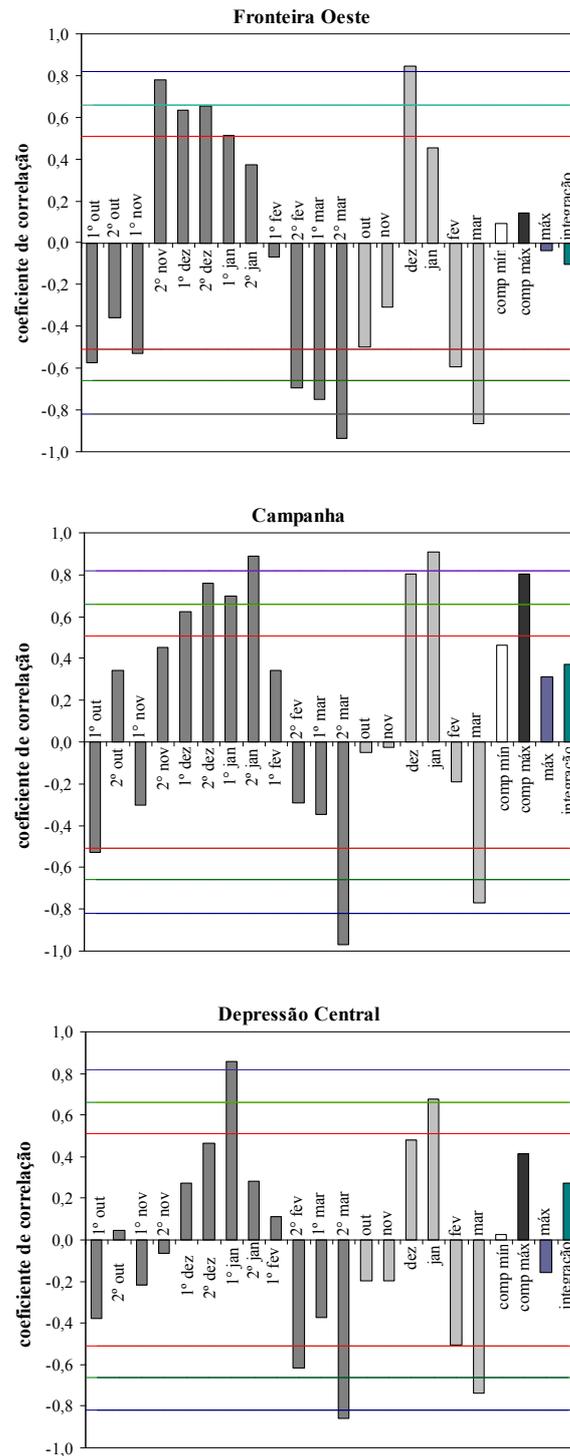


FIGURA 28. Correlações entre o rendimento e o EVI/MODIS, nos diferentes períodos do ciclo da cultura do arroz irrigado, para as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. As linhas azuis representam significância de 1%, as linhas verdes significância de 5% e as vermelhas de 10%.

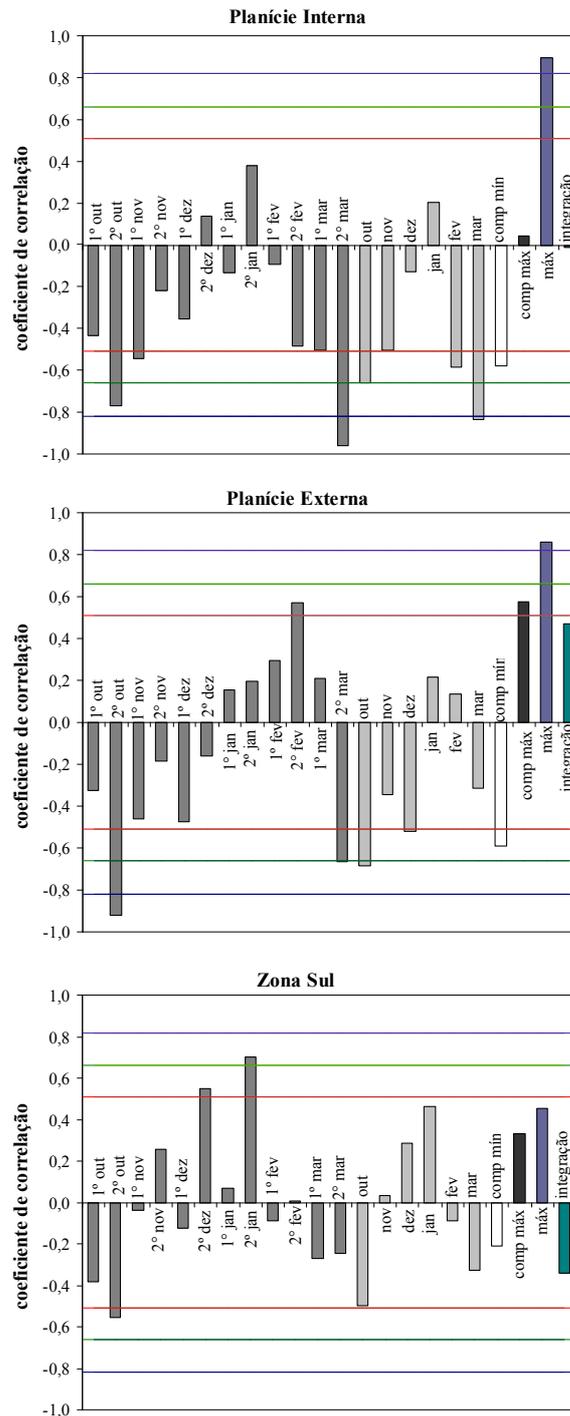


FIGURA 28. Continuação...

Nas Figuras 29 e 30 são mostradas as correlações obtidas para a média de todo o Estado, as quais apresentam tendência semelhante à observada para as regiões individualmente. Neste caso, entretanto, visivelmente o NDVI apresentou maior associação com o rendimento de arroz irrigado do que o EVI, tendo valores significativos, pelo menos a 5%, e maiores do que 0,6 desde a segunda composição de novembro (2º nov) até a primeira composição de fevereiro (1º fev).

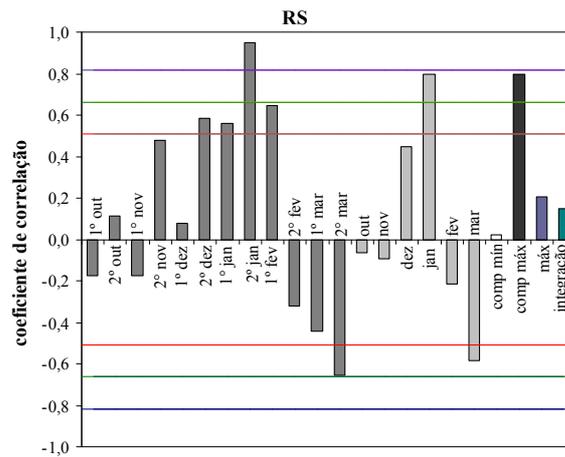


FIGURA 29. Correlações entre o rendimento e o NDVI nos diferentes períodos do ciclo da cultura do arroz irrigado, para o Estado do Rio Grande do Sul. As linhas azuis representam significância de 1%, as linhas verdes significância de 5% e as vermelhas de 10%.

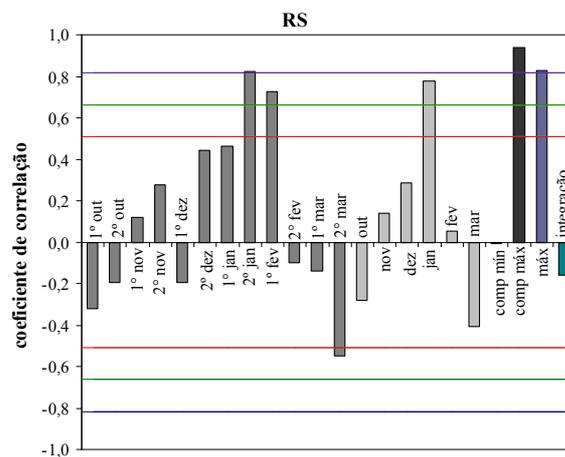


FIGURA 30. Correlações entre o rendimento e o EVI nos diferentes períodos do ciclo da cultura do arroz irrigado, para o Estado do Rio Grande do Sul. As linhas azuis representam significância de 1%, as linhas verdes significância de 5% e as vermelhas de 10%.

#### 4.4. Modelagem de rendimento

##### 4.4.1. Modelagem agrometeorológica

##### 4.4.1.1. Ajuste dos modelos agrometeorológicos

As equações dos modelos agrometeorológicos ajustados para cada região orizícola e para o Estado como um todo são mostradas na Tabela 10. Verifica-se que as variáveis meteorológicas incluídas no modelo foram diferentes em cada região.

TABELA 10. Modelos agrometeorológicos, para as regiões orizícolas e para o Estado do Rio Grande do Sul, período 1982-2006.

Região	Modelo	R <sup>2</sup>
Fronteira Oeste	$Y = 0,108i + [4,590 - 0,102(rajan) + 0,134(ramar) - 0,151(dim ar)]$	0,58
Campanha	$Y = 0,082i + [1,024i + 0,183(ranov) - 0,082(dimar)]$	0,58
Depressão Central	$Y = 0,064i + [-0,533 + 0,274(raoutdez)]$	0,39
Planície Interna à Lagoa dos Patos	$Y = 0,059i + [3,141 + 0,094(rafev) - 0,105(dijanmar)]$	0,46
Planície Externa à Lagoa dos Patos	$Y = 0,039i + [4,546 - 0,154(dim ar)]$	0,24
Zona Sul	$Y = 0,042i + [-3,808 + 0,561(ranovmar)]$	0,41
RS	$Y = 0,066i + [2,9962 + 0,079(rafev) - 0,038(dimar)]$	0,24

$Y$  é o rendimento de arroz irrigado ( $t \cdot ha^{-1}$ ),  $i$  é o ano (o ano 1 corresponde a safra agrícola de 1982/1983), as duas primeiras letras,  $ra$  e  $di$ , correspondem a radiação solar global e aos dias com temperatura mínima inferior a 15°C. As letras seguintes correspondem ao período da análise (meses).

Em todos os modelos, exceto no ajustado para a Planície Externa à Lagoa dos Patos, a variável radiação solar global foi incluída de alguma forma. Em alguns modelos a variável selecionada foi apenas a radiação de um mês isolado, enquanto que em outros foi selecionada a média dos valores de radiação obtidos em um determinado período que variou de 2 a 5 meses.

A exceção dos modelos ajustados para as regiões da Depressão Central e Zona Sul, os modelos também selecionaram alguma expressão relacionada à temperatura do ar, na forma de número de dias em que a temperatura mínima foi igual ou inferior a 15°C. O mês de março foi considerado em todos os modelos, o que é coerente, pois pelo calendário agrícola médio da cultura do arroz, é neste mês que a maioria das lavouras encontram-se no

final do período de floração. Isto era esperado por que este mês apresentou as maiores correlações com o rendimento em todas as regiões, como mostrado anteriormente.

O gráfico de dispersão entre os dados oficiais e estimados para o Estado como um todo e para as diferentes regiões orizícolas, nos períodos de ajuste dos mesmos, são apresentados nas Figuras 31 e 32. Os melhores modelos são aqueles que apresentam os menores desvios e as melhores estimativas de valores extremos, isto é, não apresentam tendência de sub ou super estimativa, tanto de altos como de baixos valores de rendimento. Um exemplo desse bom ajuste pode ser verificado no modelo para as regiões da Fronteira Oeste, Campanha e Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos e também para o Estado.

As significâncias dos coeficientes de correlação entre os rendimentos oficial e estimado nos períodos de ajuste (Figuras 31 e 32) foram de 1% em todas as regiões, e também no Estado.

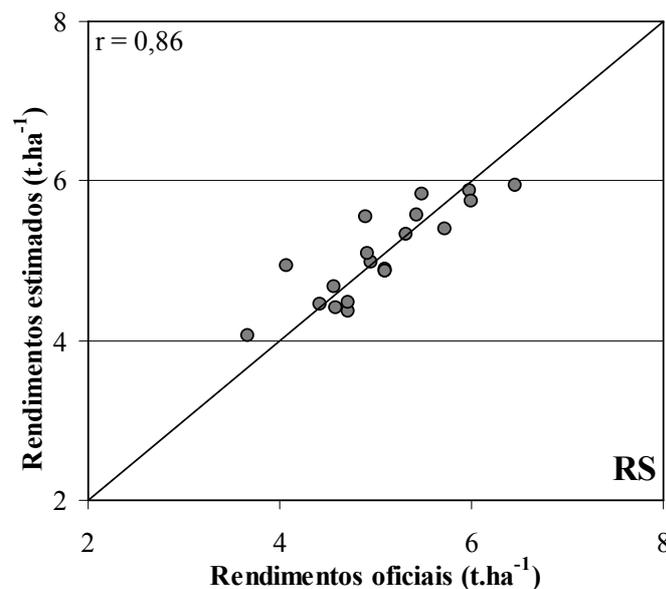


FIGURA 31. Rendimentos oficiais e estimados pelo modelo agrometeorológico ajustado para o Rio Grande do Sul, no período de ajuste do modelo.

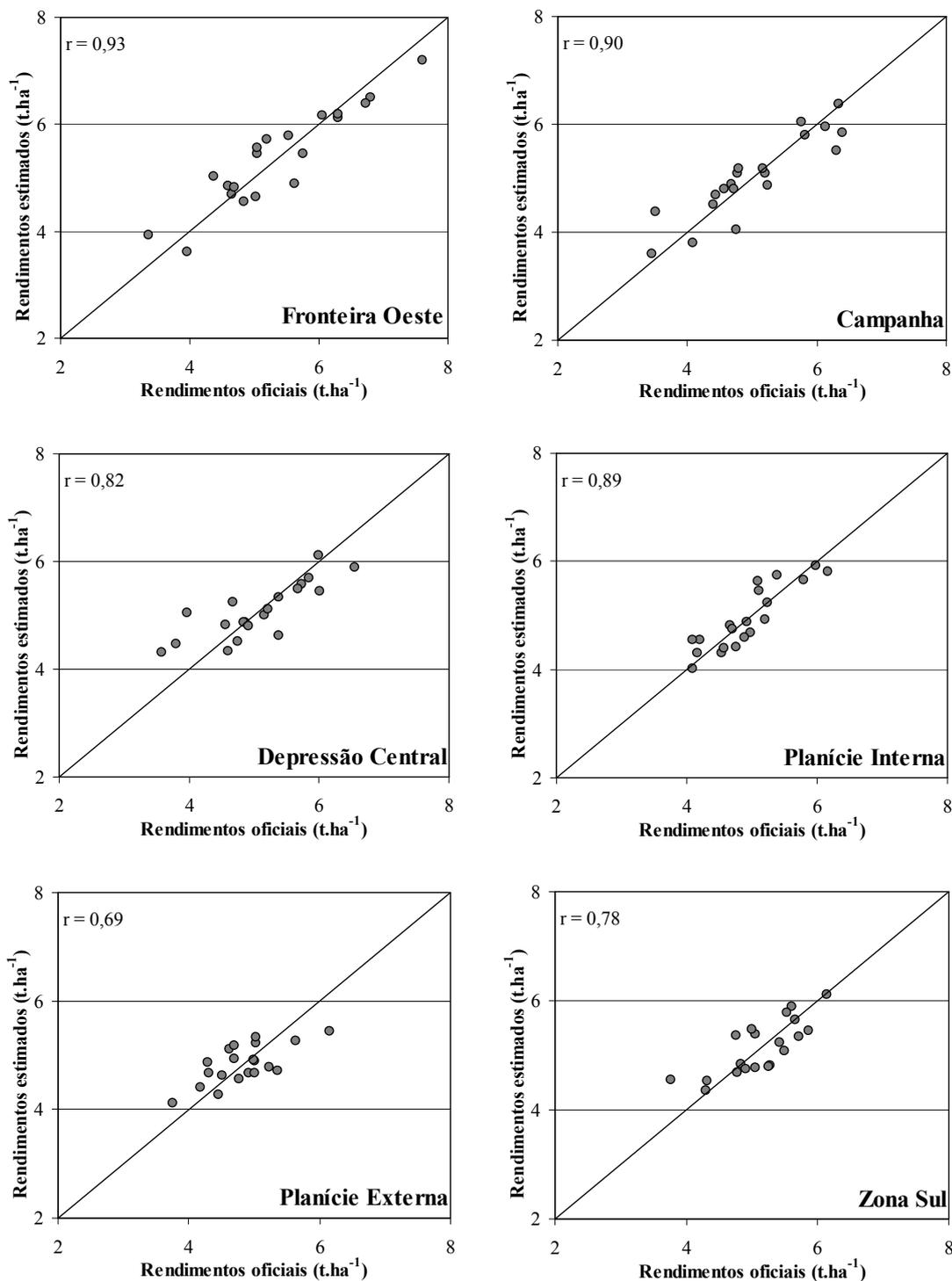


FIGURA 32. Rendimentos oficiais e estimados pelos modelos agrometeorológicos ajustados para cada região orizícola do Estado do Rio Grande do Sul, no período de ajuste do modelo.

#### 4.4.1.2. Teste dos modelos agrometeorológicos

No período de teste (Figuras 33 e 34), o Estado e as regiões da Campanha e Zona Sul apresentaram significância a 5%, e a região da Planície Externa apresentou significância a 10%. As demais regiões não apresentaram significância, o que em parte é decorrência do reduzido número de observações consideradas. A Região da Campanha chama a atenção, pois apesar de ter apresentado um coeficiente de correlação de 0,80 no ajuste do modelo e de apresentar o maior coeficiente de correlação entre valores oficiais e estimados (0,99), houve uma evidente tendência de super estimativa dos rendimentos nos quatro anos utilizados para teste do modelo.

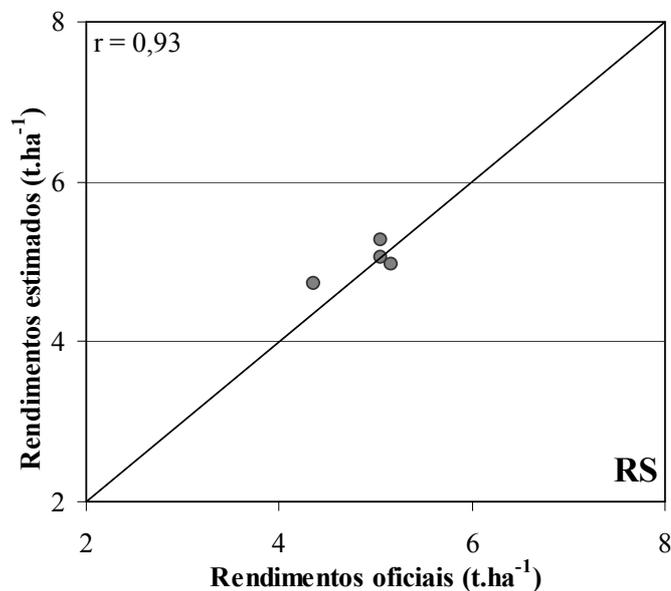


FIGURA 33. Rendimentos oficiais e estimados pelo modelo agrometeorológico ajustado para do Rio Grande do Sul no período de teste do modelo.

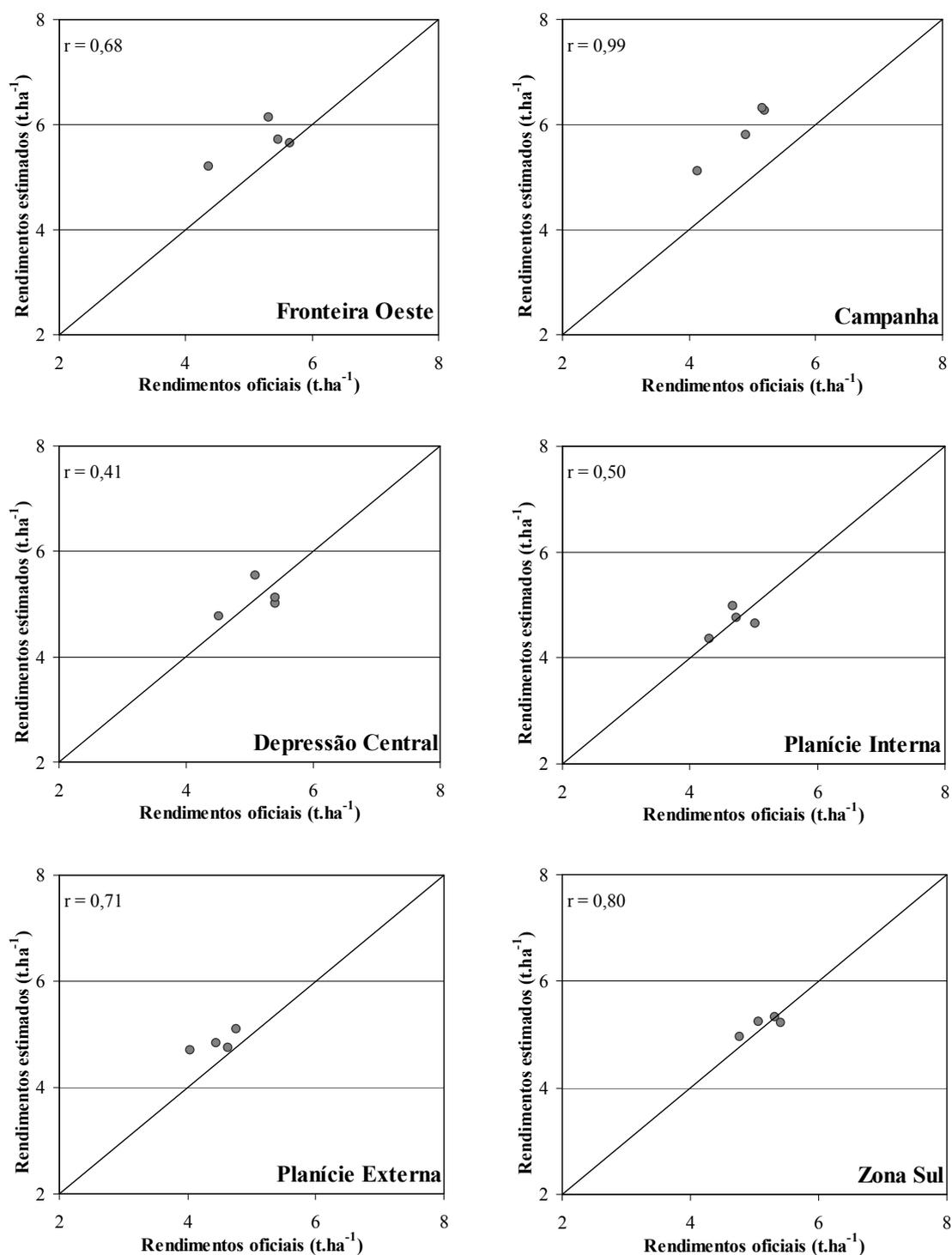


FIGURA 34. Rendimentos oficiais e estimados pelos modelos agrometeorológicos ajustados para cada região orizícola do Estado do Rio Grande do Sul no período de teste do modelo.

#### 4.4.2. Modelagem agrometeorológica-espectral

##### 4.4.2.1. Definição da componente espectral

Embora diversas pesquisas sobre os IVs provenientes do sensor MODIS tenham mostrado que o EVI é mais sensível às alterações de biomassa vegetal do que o NDVI (Huete et al., 1999, 2002), percebeu-se um comportamento praticamente idêntico dos perfis temporais de ambos IVs (Figuras 24 e 25) e também um padrão semelhante de correlações entre estes índices e o rendimento corrigido de arroz irrigado (Figuras 27 e 28). Dessa forma, optou-se pela inclusão do NDVI como componente espectral do modelo de estimativa de rendimento, por tratar-se de um índice cujas relações com parâmetros biofísicos de culturas agrícolas já estarem definidas na literatura.

##### 4.4.2.2. Ajuste do modelo agrometeorológico-espectral

Devido ao grande número de variáveis e o pequeno período de dados espectrais utilizados (somente seis anos de disponibilidade das imagens MODIS) não foi possível ajustar modelos agrometeorológicos-espectrais para cada região orizícola individualmente. Ajustou-se somente um modelo abrangendo todas as regiões orizícolas (Rio Grande do Sul), o qual explica o rendimento em função da radiação solar global média de novembro e dos NDVI médio das áreas de arroz nos meses de dezembro, fevereiro e março (Equação 7) tendo um coeficiente de determinação de 0,87.

$$Y = 1,671 + 0,170(ranov) + 3,079(imdez) + 11,168(imfev) - 12,711(immar) \quad (7)$$

Onde:  $Y$  é o rendimento de arroz irrigado ( $t \cdot ha^{-1}$ );  $ranov$  é a média da radiação solar global média de novembro;  $imdez$  é o NDVI médio do mês de dezembro extraído das imagens MODIS;  $imfev$  é o NDVI médio do mês de fevereiro extraído das imagens MODIS e  $immar$  é o NDVI médio do mês de março extraído das imagens MODIS.

O modelo agrometeorológico-espectral ajustado para o Estado apresentou desempenho satisfatório na produção das estimativas de rendimento, sendo significativo a 1% (Figura 35). Salienta-se que a dispersão de pontos apresentada na Figura 35 é para a mesma série de dados utilizada no ajuste do modelo e, portanto, uma melhor verificação da

qualidade do desempenho do mesmo deve ser realizada com dados independentes, isto é, com os dados de uma safra que não foi incluída na série de ajuste.

O resultado obtido na aplicação do modelo agrometeorológico-espectral, embora a série de anos avaliada seja de tamanho reduzido, indica a possibilidade de melhoria nas estimativas de rendimento de arroz irrigado, quando comparadas com as estimativas obtidas através da aplicação do modelo agrometeorológico.

Tomando como base esses resultados, recomenda-se que na medida em que novas imagens estejam disponíveis elas sejam utilizadas num novo ajuste do modelo.

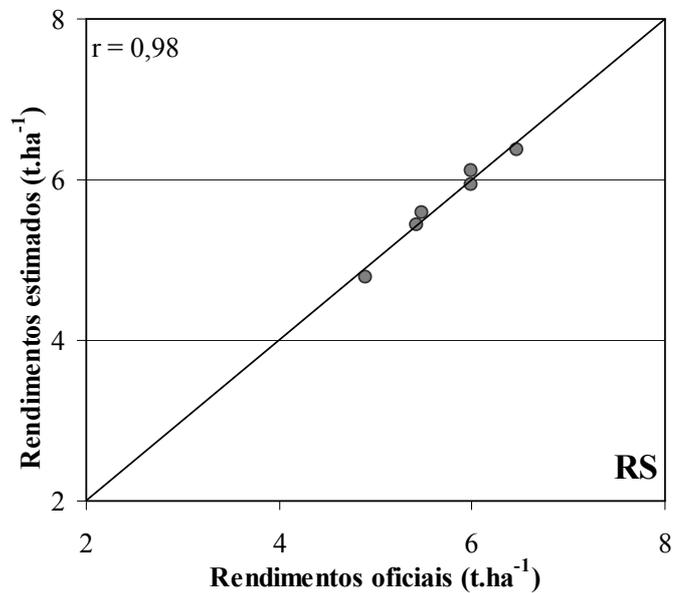


FIGURA 35. Rendimentos oficiais e estimados pelo modelo agrometeorológico-espectral ajustado para o Rio Grande do Sul.

## 5. CONCLUSÕES

A partir das análises feitas neste trabalho conclui-se que:

Existe tendência tecnológica de incremento nos rendimentos de arroz irrigado, tanto no Estado como um todo, quanto nas seis regiões orizícolas.

Os modelos agrometeorológicos propostos por Carmona (2001), apesar de serem muito simples podem fornecer uma estimativa razoável de rendimento de arroz irrigado para todas as regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul, com exceção da Fronteira Oeste.

A metodologia proposta para extrair dados espectrais das áreas de arroz irrigado, baseada em limiares aplicados às imagens MODIS de diferença, é eficiente e tem características de fácil implementação e baixo custo.

Os perfis espectrais (NDVI e EVI) das áreas de arroz irrigado são típicos de áreas cultivadas. Apresentam valores baixos no período de implementação da cultura, crescentes durante o desenvolvimento vegetativo, atingindo os valores máximos durante o enchimento de grão e decrescentes a partir da maturação fisiológica dos grãos. A variabilidade interanual desses perfis é devida, principalmente, às variações das condições meteorológicas.

Existe uma relação curvilínea entre NDVI e EVI. Entretanto, ambos índices de vegetação extraídos das áreas de arroz irrigado apresentam um comportamento similar, com o NDVI apresentando valores maiores do que o EVI.

As variáveis meteorológicas radiação solar global e dias com temperatura mínima do ar menor que 15°C podem ser usadas como indicadores agrometeorológicos na estimativa de rendimento de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul.

Em termos de indicadores espectrais, pode-se usar as imagens de NDVI e EVI provenientes do sensor MODIS na estimativa de rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

Os modelos agrometeorológicos e agrometeorológicos-espectrais de estimativa de rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul, parametrizados neste trabalho, apresentam características de precisão, fácil implementação e baixo custo, podendo, portanto, serem introduzidos ao programa nacional de previsão de safras.

Embora o período de dados ainda seja reduzido para resultados conclusivos, existe a tendência de melhora nas estimativas de rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul a partir da incorporação de dados provenientes de imagens MODIS.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, T.S., FONTANA, D.C., MARTORANO, L.G., BERGAMASCHI, H. Índices de vegetação para a cultura da soja em diferentes condições hídricas e de sistema de manejo do solo In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais**. São José dos Campos: INPE / SELPER, 2005. v.1. p.17 – 24.

**Arroz Irrigado: Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, XXVI REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO. Santa Maria: SOSBAI, 2005.

AZAMBUJA, I.H.V.; VERNETTI Jr,F.J.; MAGALHÃES Jr. **Aspectos econômicos da produção do arroz**. In: GOMES e MAGALHÃES Jr. (Organizadores) Arroz irrigado no Sul do Brasil. Brasília, DF. Embrapa Informações Tecnológicas, 2004. 899p

BAIER, W. Note on the terminology of crop-weather models. **Agricultural Meteorology**, v. 20, n. 2, p. 137-145, Apr. 1979.

BARNI, N.A. **Modelos de crescimento, desenvolvimento e rendimento do girassol em função da radiação solar, temperatura e disponibilidade hídrica**. Porto Alegre, 1994. Tese (Doutorado em Fitotecnia), Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1994. 249p.

BERLATO, M.A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul**. São José dos Campos, 1987. Tese (Doutorado em Meteorologia) Pós-Graduação Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1987. 103p.

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. **El Niño e La Nina: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura**.1ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2003, 110p.

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. Variabilidade interanual da precipitação e variabilidade dos rendimentos da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 1, p. 119-125, 1999.

BIANCHI, C.A.M.; FONTANA, D.C.; GUSSO, A. Aplicação do modelo agrometeorológico-espectral para estimativa do rendimento de soja, no Rio Grande do Sul na safra 2003/04. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2005, Campinas. **Anais...** Agrometeorologia, Agroclimatologia e Agronegócio, 2005.

BOARD, J.E.; PETERSON, M.L.; NG, E. Floret sterility in a cool environment. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, May-June, p. 483-487, 1980.

BRAGA, H.J. **Previsão agrícola: uma nova abordagem**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1995. Disponível em: <[www.eps.ufsc.br/teses/braga/index](http://www.eps.ufsc.br/teses/braga/index)>. Acesso em: 22 Jul. 2002.

CARMONA, L.C. **Efeitos associados aos fenômenos El Niño e La Niña no rendimento do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul**. 2001. 75p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

CONAB revisará dados de três safras de arroz no País. **Correio do Povo**, Porto Alegre, 02 de Jun. 2007. Caderno Rural, p. 14.

D'ARCO, E.; RIZZI, R.; RUDORFF, B.F. T. Análise de combinações dos índices de vegetação EVI e NDVI derivadas do sensor MODIS para identificação de áreas de arroz irrigado. **Anais...** XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 91-93. 2005.

DRAPER, N.R.; SMITH, R. **Applied regression analysis**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Wiley, 1996. 706p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979. 193 p. (FAO-Irrigation and Drainage Paper n.33).

Food and agriculture Organization of the United Nations (FAO). **FAOSTAT**. 2007. Disponível em <<http://faostat.fao.org/>> Acesso em: 10 ago. 2007.

FARIAS, J.R.B.; NEPOMUCENO, A.F.; NEUMAIER, N.; OYA, T. Ecofisiologia. In: **A cultura da soja no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2000. 1 CD-ROM.

FIGUEIREDO, D.C. Projeto GeoSafras – aprimoramento metodológico das estimativas de safras. **Anais...** XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 191-195.

FONSECA, E.L. da. **Desenvolvimento de modelo da disponibilidade da fitomassa aérea para formações campestres naturais a partir de dados espectrais orbitais e agrometeorológicos**. São José dos Campos, 2004. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004. 193p.

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

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. Modelo agrometeorológico-espectral para a estimativa do rendimento de soja no Rio Grande do Sul: um estudo preliminar. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9., 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. 1 CD ROM.

FONTANA, D.C.; POTGIETER, A.; APAN, A. Assessing the relationship between shire winter crop yield and seasonal variability of the MODIS NDVI and EVI images. **Applied GIS**, v.3, n.6, p.1-16. June, 2007.

FONTANA, D.C.; OLIVEIRA, D. Relação entre radiação solar global e insolação para o Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.4, p.87-91, 1996.

HOFFMANN, R.; VIEIRA, S. **Análise de regressão: uma introdução à econometria**. 3. ed. São Paulo: Hucitec/Edusp, 1998. 379p.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, Nov. 2002.

HUETE, A.; JUSTICE, C.; LEEUWEN, W. V. **Modis vegetation index (MOD 13) algorithm theoretical basis document**, 1999. Disponível em: <modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\_mod13.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2006.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Levantamento sistemático da produção agrícola**. 2003. Disponível em: <www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/>. Acesso em: 7 nov. 2005.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Levantamento sistemático da produção agrícola**. 2007. Disponível em: <www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/>. Acesso em: 7 ago. 2007.

INFELD, J.A.; SILVEIRA JÚNIOR, P. Esterilidade e baixas temperaturas em duas cultivares e uma linhagem de arroz irrigado. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 12., Porto Alegre, 1983. Anais. Porto Alegre: IRGA, 1983. p.85-86.

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

JENSEN, J.R. Remote sensing of vegetation. In: \_\_\_\_\_. **Remote sensing of the environment, an earth resource perspective**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000. 544 p, cap.10. p. 333-377.

KNIPLING, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance visible and near infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 1, n. 3, p.155-159, Summer 1970.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. 4. ed. Madison : University of Wisconsin, 1999, 750 p.

LIU, W.T.; KOGAN, F. Monitoring Brazilian soybean production using NOAA/AVHRR based vegetation condition indices. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n. 6, p. 1161-1179, May 2002.

MAGALHÃES Jr. A. M. et al. **Aspectos genéticos, morfológicos e de desenvolvimento de plantas de arroz irrigado**. In: GOMES e MAGALHÃES Jr. (Organizadores) Arroz irrigado no Sul do Brasil. Brasília, DF. Embrapa Informações Tecnológicas, 2004. 899p

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; RIBOLDI, J. Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 1, n. 2, p. 225-241, 1995.

MELO, R.W. **Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da soja para o estado do Rio Grande do Sul**. 2003. 88f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) Programa de Pós Graduação em Fitotecnia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2003.

MELO, R.W.; FONTANA, D.C. Estimativa do rendimento de soja usando dados do modelo do ECMWF em um modelo agrometeorológico-espectral no Estado do Rio Grande do Sul. **Anais... XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 279-286.

MELO, R.W.; FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. 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. 2003.

MODIS - **Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer**. Technical specifications, 2003. Disponível em: <modis.gsfc.nasa.gov/about/specs.html> Acesso em: 14 mai. 2005.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3ª ed. Atual. Ampl. Viçosa: Editora UFV, 320p. 2005.

MOREIRA, R. C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. São José dos Campos: INPE, 2000. 181f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), 2000.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. Secretaria da Agricultura. 42p. 1961.

MOTA, F.S. da et al. **Zoneamento Agroclimático do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Pelotas: IPEAS, 1974. 122 p. (IPEAS. Circular Técnica n. 50, v. 2). 1974.

MOTA, F.S. da. Influência da radiação solar e do “frio” no período reprodutivo sobre o rendimento do arroz irrigado em Pelotas e Capão do Leão. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 47, n. 413, p. 22-23, mar./ abr. 1994.

NEDEL. J.L.; ASSIS, F.N.; CARMONA. P.S.A Planta de Arroz: Morfologia e Fisiologia. In: SILMAR T. P.; JORGE L. N., ANTONIO C.S.A. B. **Produção de arroz irrigado**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 1998, p. 45-64.

NETER, J.; KUTNER , M.H.; NACHTSHEIM, C.J.; WASSERMAN, W. **Applied linear regression models**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw Hill, 1997, 532p.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto - princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 308p.

OLDEMAN, L.R.;SESHU; D.V.; CADY, F.B. Response of rice to weather variables. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE IMPACT OF WEATHER PARAMETERS ON GROWTH AND YIELD OF RICE. 1986, Los Baños. **Weather and rice, proceedings...** Los Baños: IRRI (International Rice Research Center), 1986. p. 5-39.

PEDRO JR., M. J. et al. Estimativa da produtividade de arroz irrigado por inundação em função da temperatura do ar e radiação solar na região de Pídamonhangaba - SP. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 52, n. 1. p. 96-100, 1995.

PINO, F.A. **Estatísticas agrícolas para o século XXI**. Agricultura em São Paulo, v. 46, n. 2, p. 71-105, 1999.

PINO, F.A. **Estimação subjetiva de safras agrícolas**. Informações Econômicas, v. 31, n. 6, p. 55-58 São Paulo, Jun. 2001.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Agricultura e Abastecimento. **Macrozoneamento agroecológico e econômico do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SEA, Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1994, v.2.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2005. São José dos Campos: INPE. 121p. Tese (Doutorado) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, SP, 2005.

RUDORFF, B. F. T. **Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar**. 1985. 100p. (INPE-3744-TDL/202). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1985.

RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v.33, p.183-192. 1990.

SANO, E.E.; ASSAD, E.D.; ORIOLI, A.L. Monitoramento da ocupação agrícola. In: Assad, E. D.; Sano, E. E. **Sistemas de informação geográfica: aplicações na agricultura**. 2ªed. Brasília. Embrapa-CPAC, 1998, Cap. 10, p. 179-190.

SATAKE, T. Sterile-type cool injury in paddy rice plants. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Climate and rice**. Los Baños: IRRI, 1976. p. 281-300.

SOARES, J. V. et al. **Histórico e Descrição**. In: RUDORFF, F. T. et al (Organizadores) O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. São José dos Campos, SP. Ed. Parêntese, 2007.

SOUZA, G.S. **Introdução aos modelos de regressão linear e não-linear**. Brasília: Embrapa-SPI/Embrapa-SEA, 1998. 505p.

STEINMETZ, S. **Influência do clima na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. In: GOMES e MAGALHÃES Jr. (Organizadores) Arroz irrigado no Sul do Brasil. Brasília, DF. Embrapa Informações Tecnológicas, 2004. 899p

STEINMETZ, S.; ASSIS, F.N.; BURIOL, G.A.; ESTEFANEL, V.; AMARAL, A.G.; FERREIRA J.S.A. Mapeamento das probabilidades de ocorrência de temperaturas mínimas do ar, durante o período reprodutivo do arroz irrigado, no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 107-121, 2003b.

STEINMETZ, S.; ASSIS, F.N.; BURIOL, G.A.; ESTAFANEL, V.; DIDONÉ, I.A.; OLIVEIRA, H.T.; SIMONÉTI, C. . Probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas do ar durante o período reprodutivo do arroz irrigado, na metade norte do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 107-121, 2003a.

STEINMETZ, S.; BRAGA, H.J. Zoneamento de arroz irrigado por épocas de semeadura agroclimático do arroz irrigado por épocas de semeadura nos estados do Rio grande do Sul e Santa Catarina. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 429-438, 2001.

WAGNER, A.P.L.; WEBER, E.; FONTANA, D.C.; DUCATI, J.R.; KLERING, E.V. Estimativa de área de soja no Rio Grande do Sul utilizando imagens NDVI/MODIS. **Anais... XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 457-464.

WARDLOW, B.D.; EGBERT, S.L.; KASTENS, J.H. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, v.108, p.290–310. 2007.

WEBER, E.; WAGNER, A.P.L.; FONTANA, D.C.; DUCATI, J.R. Estimativa de área cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul na safra 2005/2006 através de imagens Landsat.. **Anais... XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 465-472.

WIEGAND, C.J. et al. Vegetation indices in crop assessment. **Remote Sensing of Environment**, v.35, n.2, p.105-119. 1991.

TERRES, A.L.; GALLI, J. Efeitos do frio em cultivares de arroz irrigado no Rio Grande do Sul - 1984. In: **Fundamentos para a cultura do arroz irrigado**. Campinas, SP: Fundação Cargill, 1985. cap. 6, p. 83-94.

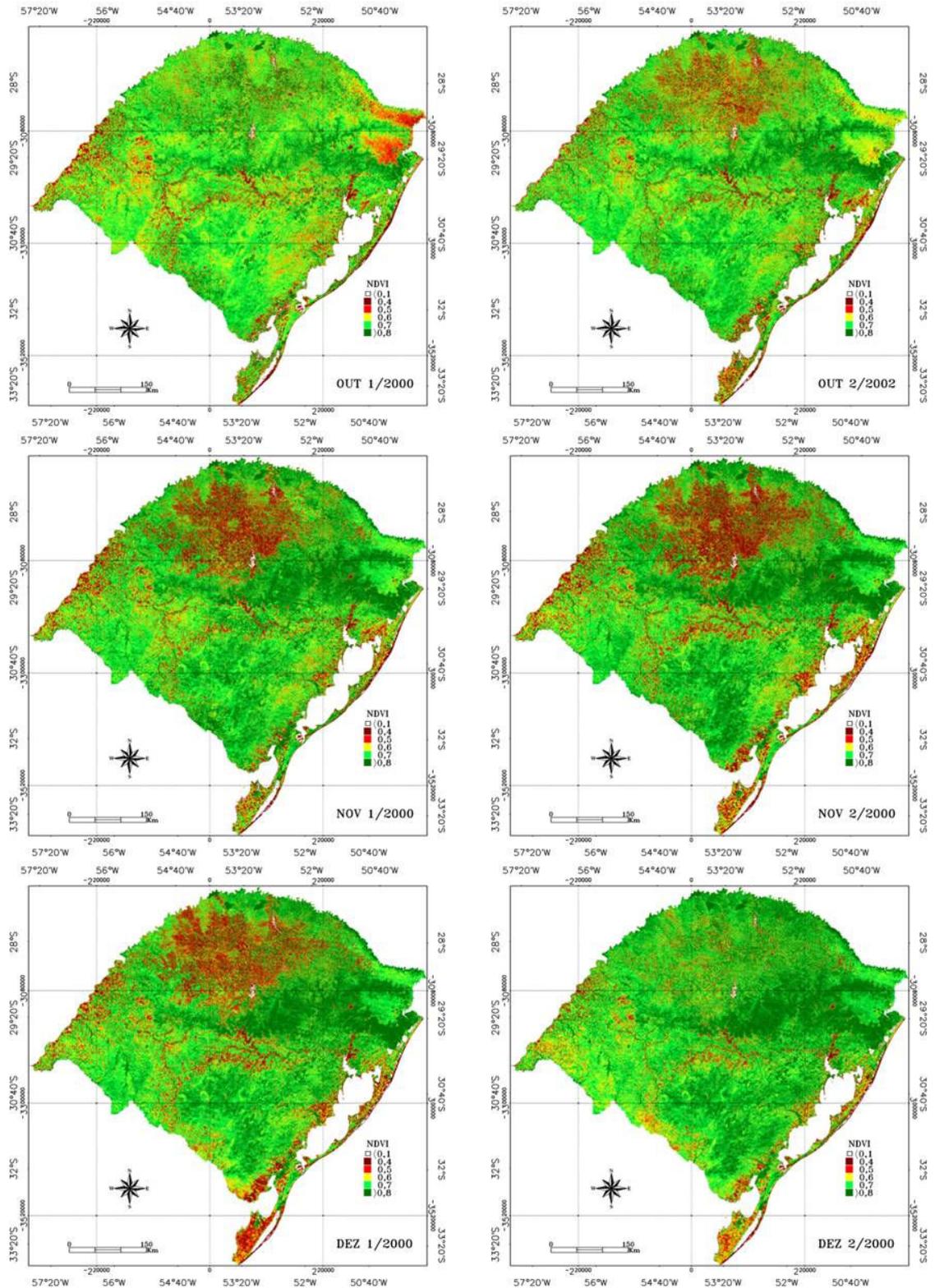
YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Banõs: IRRI (International Rice Research Center), 1981. p. 128-147, 213-235. 1981

YOSHIDA, S.; PARAO, F.T. **Climatic influence on yield and yield components of lowland rice in the tropics**. Philippines: IRRI (International Rice Research Center). 1976. p.471-494. 1976.

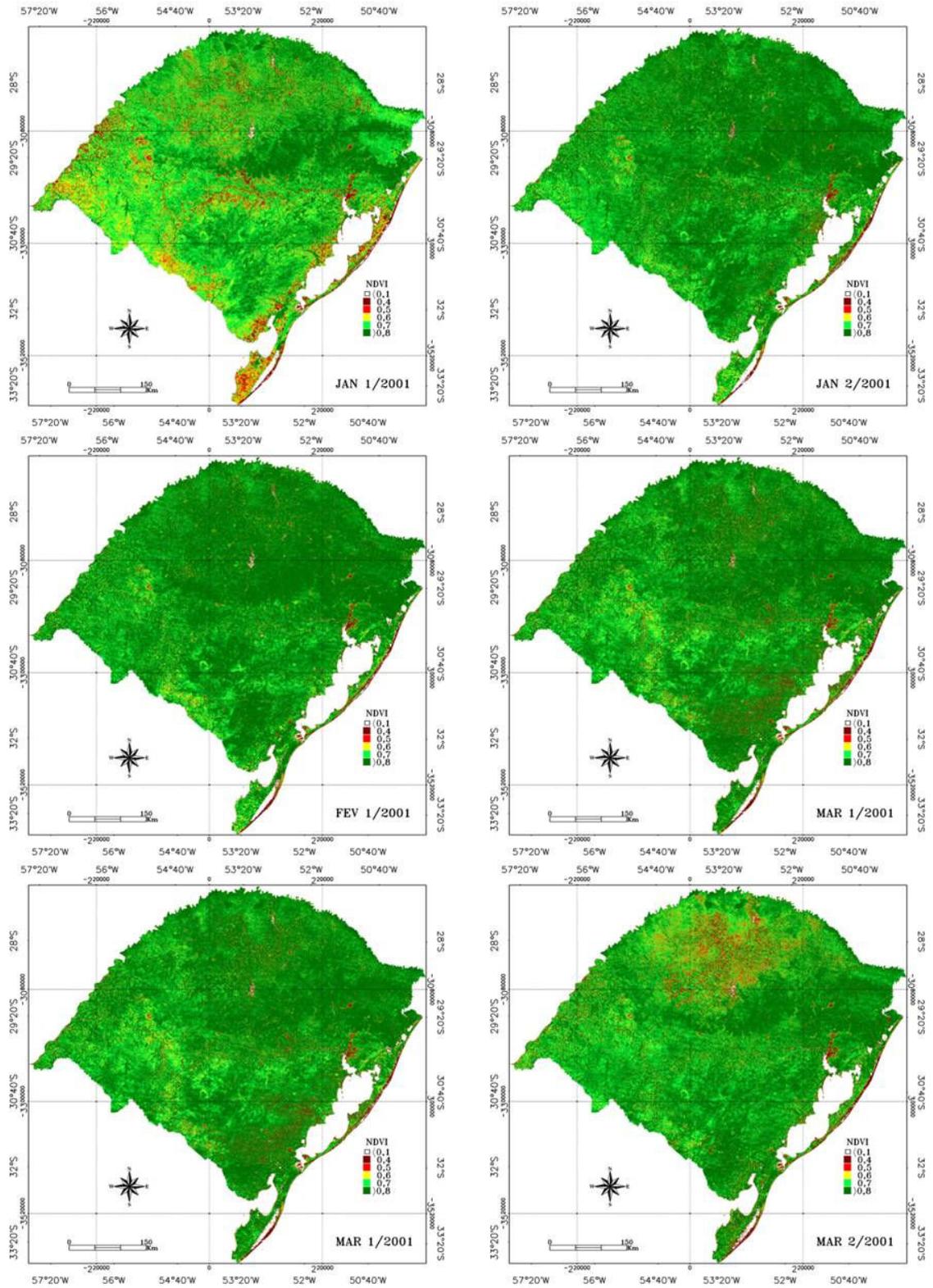
## 7. APÊNDICES

Safr	Fronteira Oeste		Campanha		Depressão Central		Planície Interna		Planície Externa		Zona Sul	
	IBGE	Corr	IBGE	Corr	IBGE	Corr	IBGE	Corr	IBGE	Corr	IBGE	Corr
82/83	3,37	4,21	3,45	4,13	3,58	4,34	4,10	4,21	3,75	4,32	3,77	4,65
83/84	4,60	4,32	4,75	4,21	4,60	4,41	4,75	4,27	4,51	4,36	4,30	4,70
84/85	4,84	4,42	4,40	4,29	4,75	4,47	4,54	4,33	4,92	4,40	4,84	4,74
85/86	3,96	4,52	4,44	4,37	3,96	4,54	4,17	4,38	4,77	4,44	5,27	4,78
86/87	5,04	4,62	4,08	4,45	5,39	4,60	4,58	4,44	4,45	4,48	4,79	4,82
87/88	5,20	4,73	4,69	4,53	4,86	4,66	4,67	4,50	5,23	4,52	5,05	4,86
88/89	5,79	4,83	5,67	4,60	5,38	4,73	4,92	4,56	5,02	4,55	5,87	4,91
89/90	4,70	4,93	4,79	4,68	4,68	4,79	4,20	4,62	4,18	4,59	4,90	4,95
90/91	5,05	5,03	4,57	4,76	4,83	4,86	4,97	4,68	5,00	4,63	5,05	4,99
91/92	5,63	5,14	5,25	4,84	4,91	4,92	4,88	4,74	4,70	4,67	5,26	5,03
92/93	5,47	5,24	4,89	4,92	5,41	4,99	4,73	4,80	4,45	4,71	5,42	5,08
93/94	4,36	5,34	4,13	5,00	4,52	5,05	4,30	4,86	4,05	4,75	4,77	5,12
94/95	5,66	5,45	5,20	5,07	5,41	5,11	5,02	4,92	4,63	4,79	5,07	5,16
95/96	5,31	5,55	5,16	5,15	5,10	5,18	4,68	4,98	4,75	4,83	5,32	5,20
96/97	5,76	5,65	5,20	5,23	5,16	5,24	4,71	5,04	4,30	4,87	5,49	5,24
97/98	4,37	5,75	3,51	5,31	3,81	5,31	4,09	5,09	4,29	4,91	4,33	5,29
98/99	6,30	5,86	6,40	5,39	6,02	5,37	5,20	5,15	5,03	4,95	5,42	5,33
99/00	5,54	5,96	5,16	5,46	5,73	5,44	5,24	5,21	4,62	4,99	5,67	5,37
00/01	6,05	6,06	5,81	5,54	5,22	5,50	5,10	5,27	4,69	5,03	5,72	5,41
01/02	6,31	6,17	5,77	5,62	5,69	5,56	5,39	5,33	5,03	5,07	4,75	5,46
02/03	5,04	6,27	4,72	5,70	4,56	5,63	5,12	5,39	4,98	5,10	5,01	5,50
03/04	6,81	6,37	6,14	5,78	5,85	5,69	6,17	5,45	5,36	5,14	5,60	5,54
04/05	6,73	6,47	6,30	5,86	6,00	5,76	5,80	5,51	5,64	5,18	5,53	5,58
05/06	7,60	6,58	6,34	5,93	6,56	5,82	5,98	5,57	6,15	5,22	6,14	5,62
Média	5,39	5,39	5,03	5,03	5,08	5,08	4,89	4,89	4,77	4,77	5,14	5,14

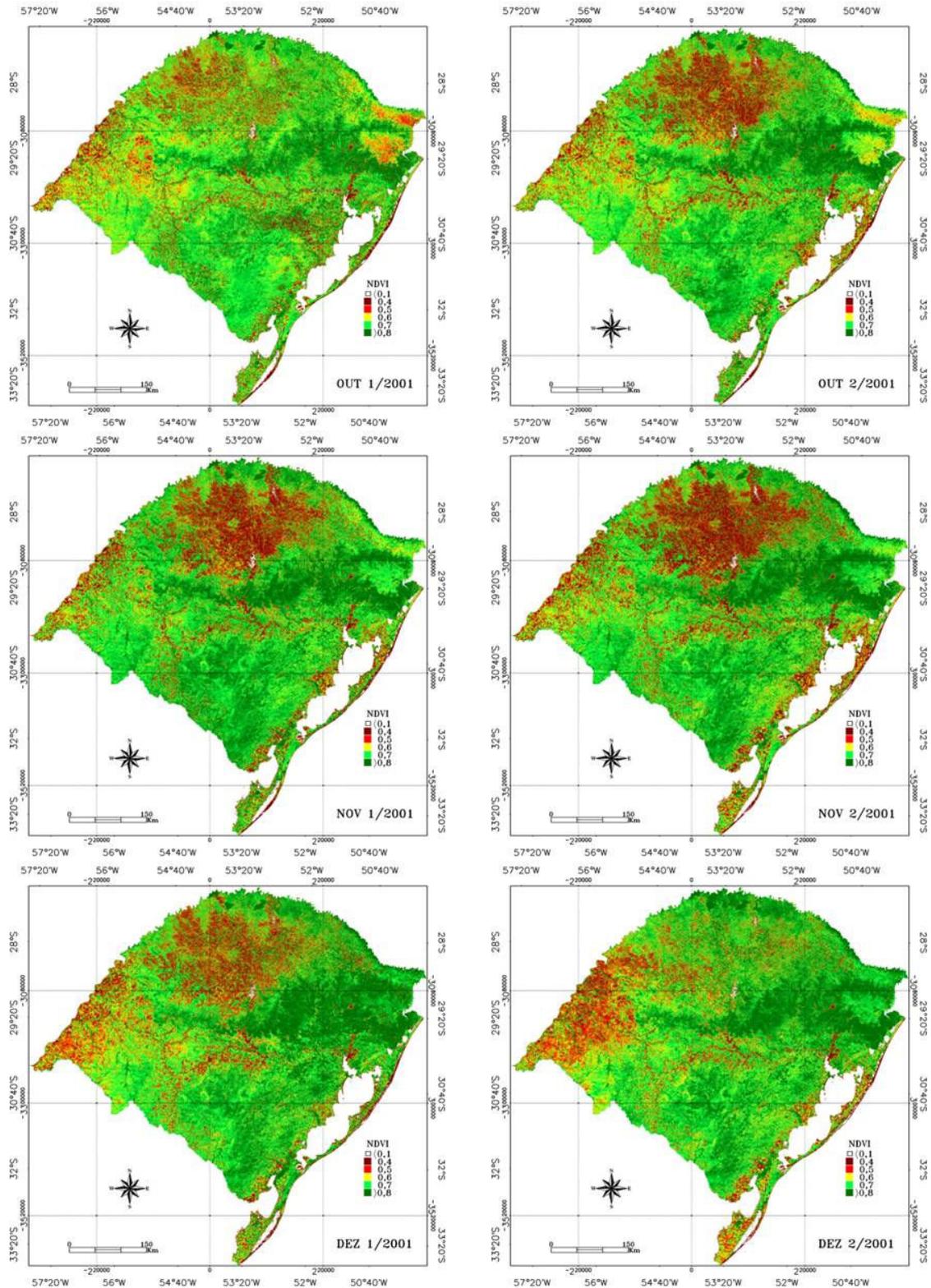
APÊNDICE 1. Rendimentos oficiais (IBGE) e corrigidos (Corr) de arroz irrigado ( $t.ha^{-1}$ ) para as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, período de 1982-2006.



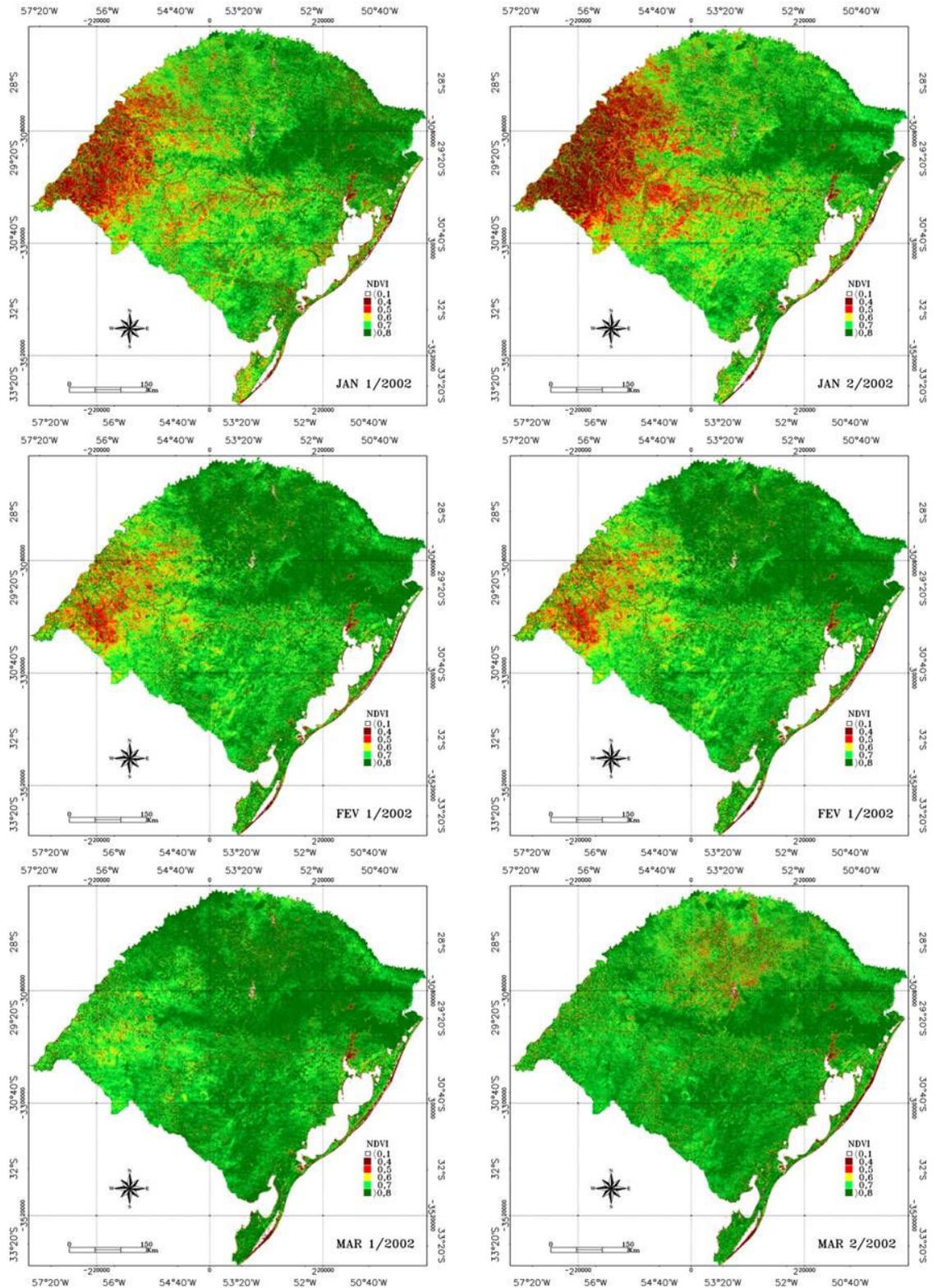
APÊNDICE 2. Série temporal média de NDVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2000/2001 (outubro a março).



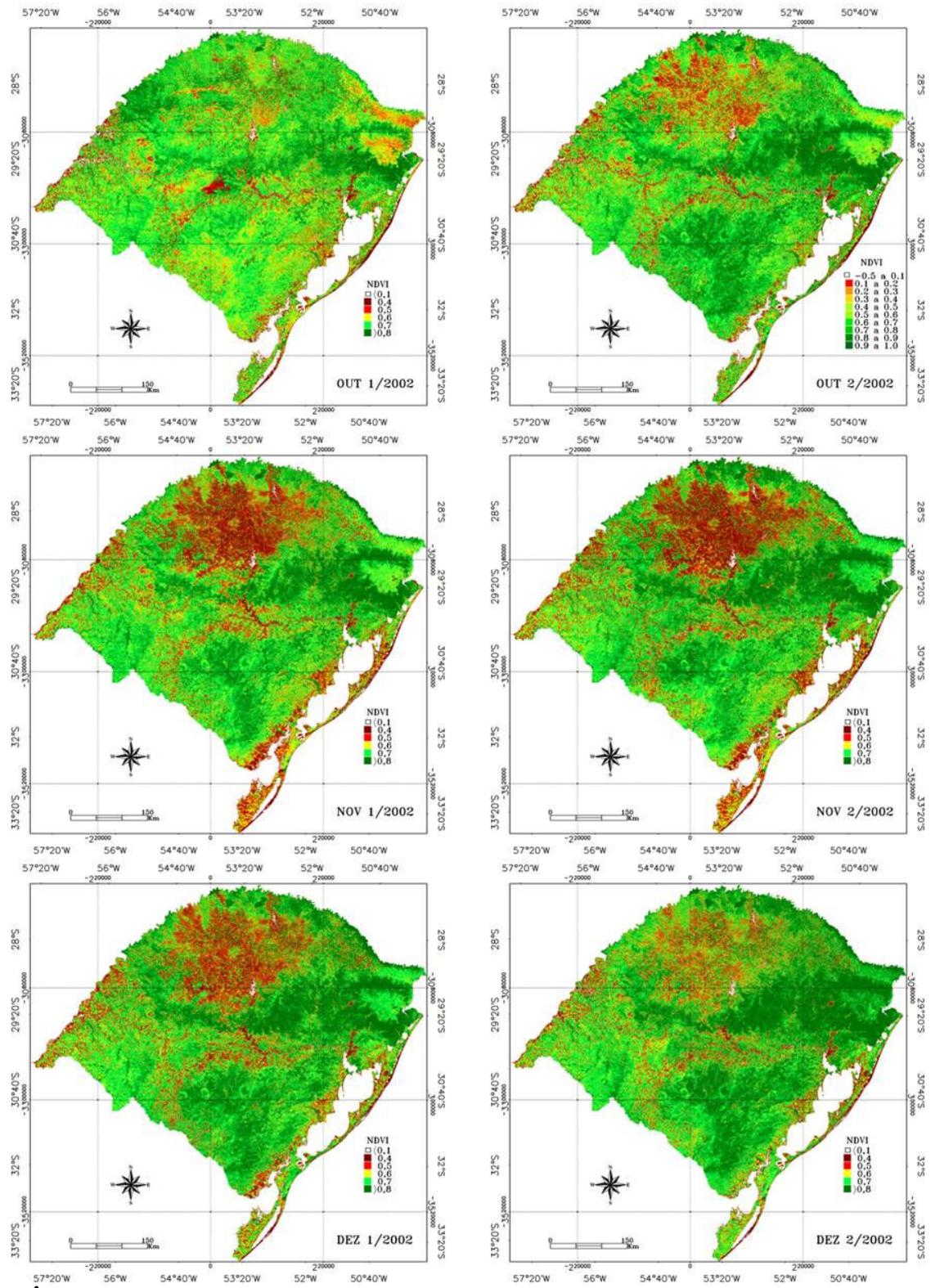
APÊNDICE 2. Continuação...



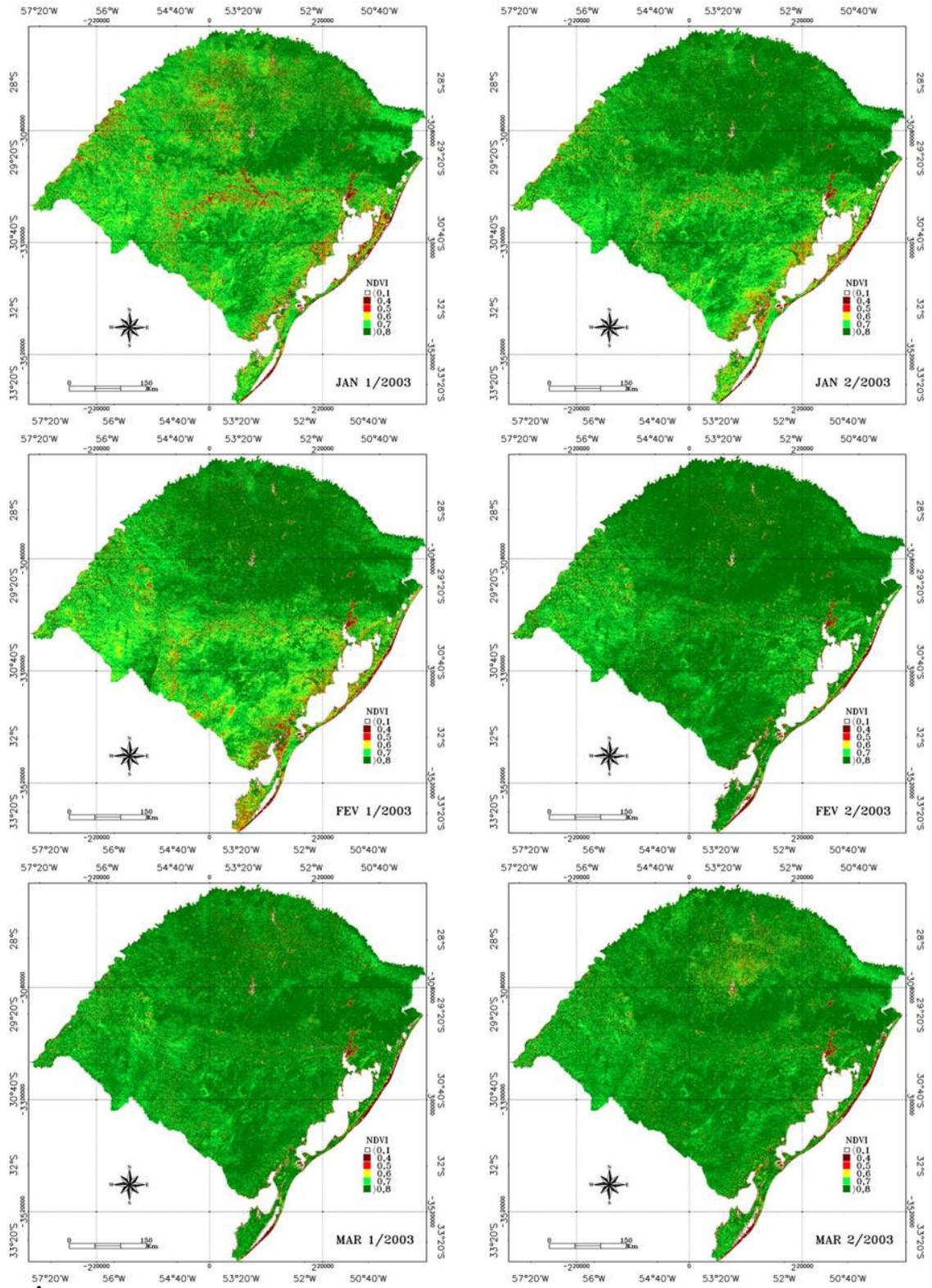
APÊNDICE 3. Série temporal média de NDVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2001/2002 (outubro a março).



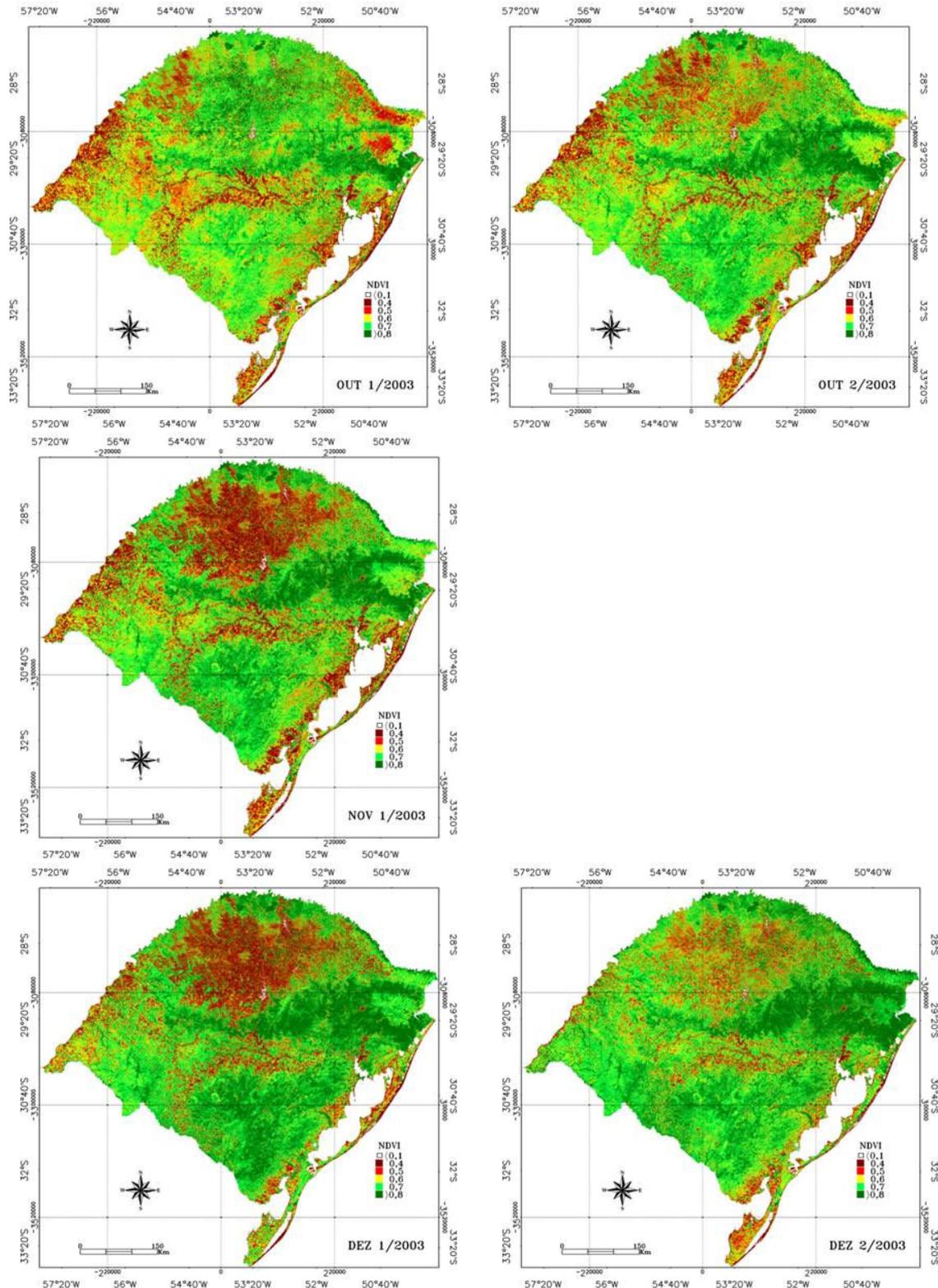
APÊNDICE 3. Continuação...



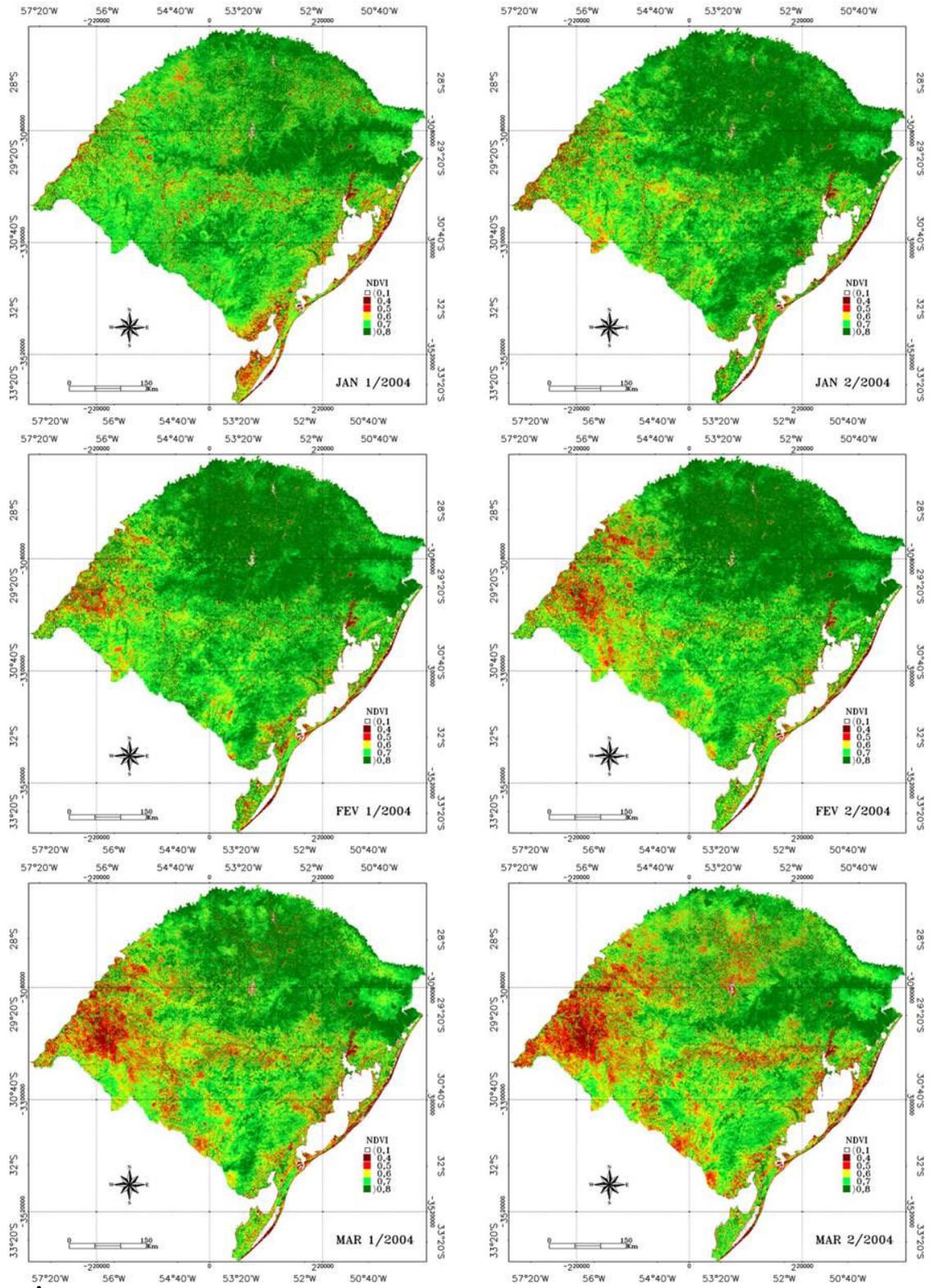
APÊNDICE 4. Série temporal média de NDVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2002/2003 (outubro a março).



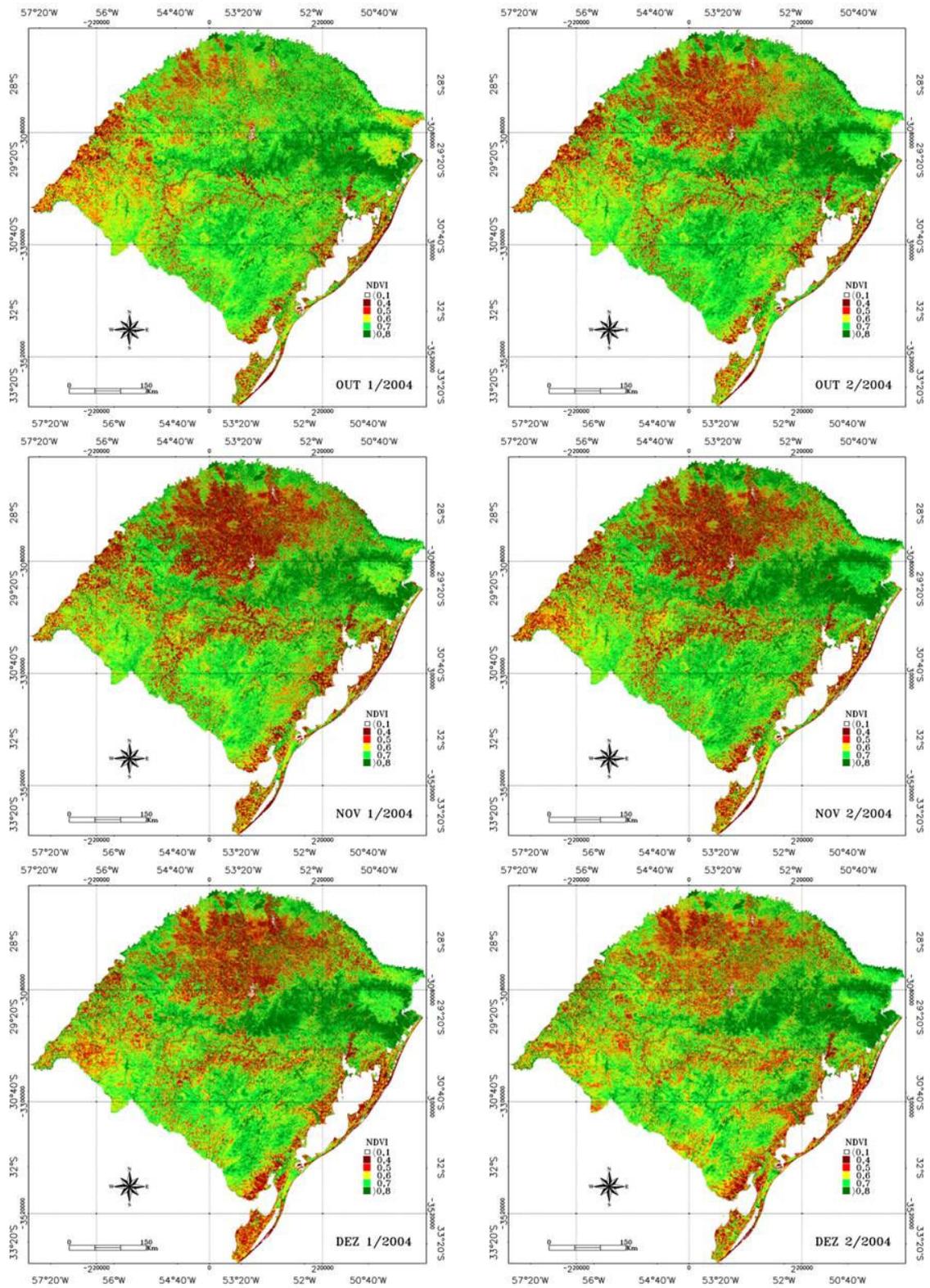
APÊNDICE 4. Continuação...



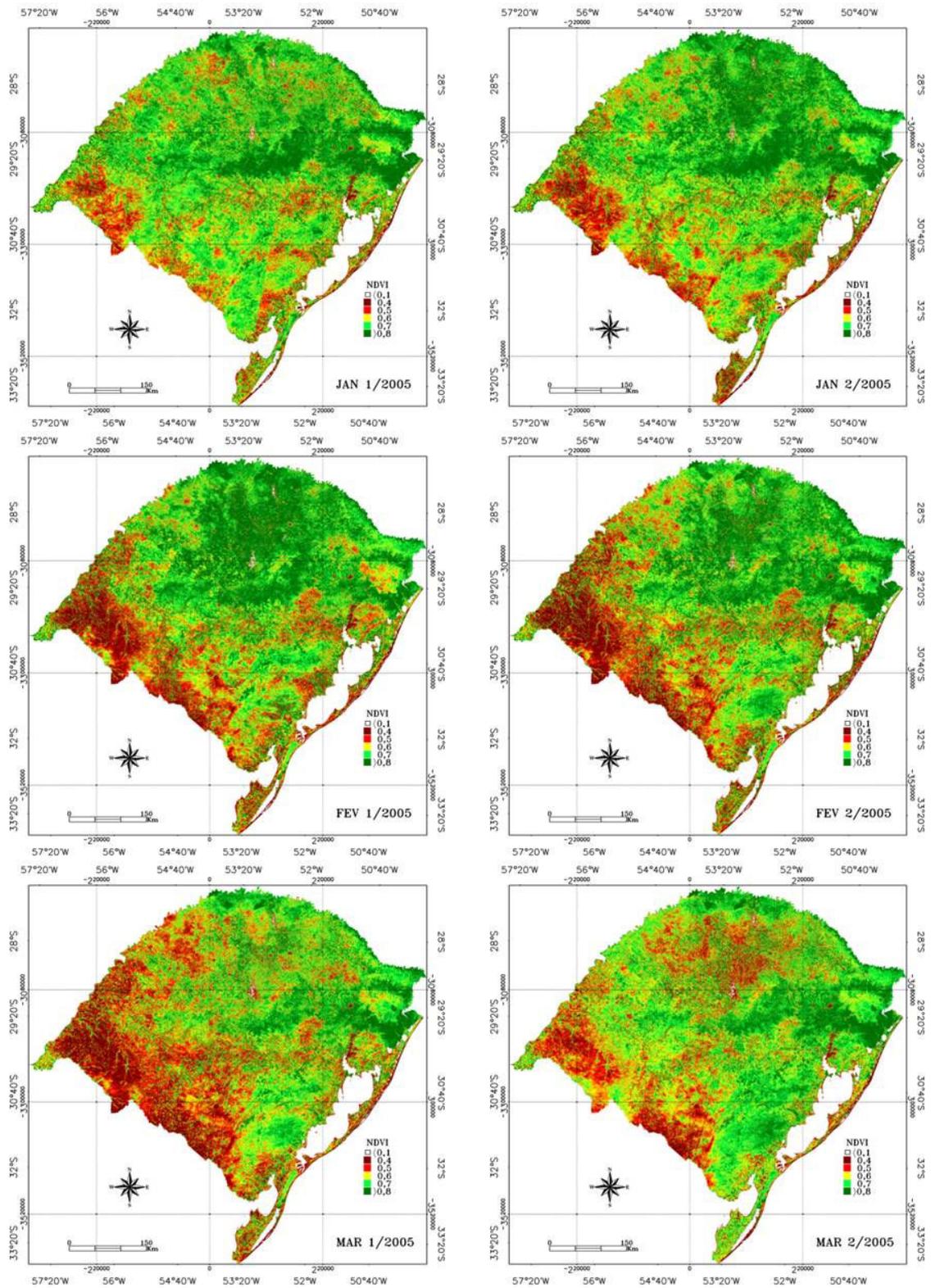
APÊNDICE 5. Série temporal média de NDVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2003/2004 (outubro a março).



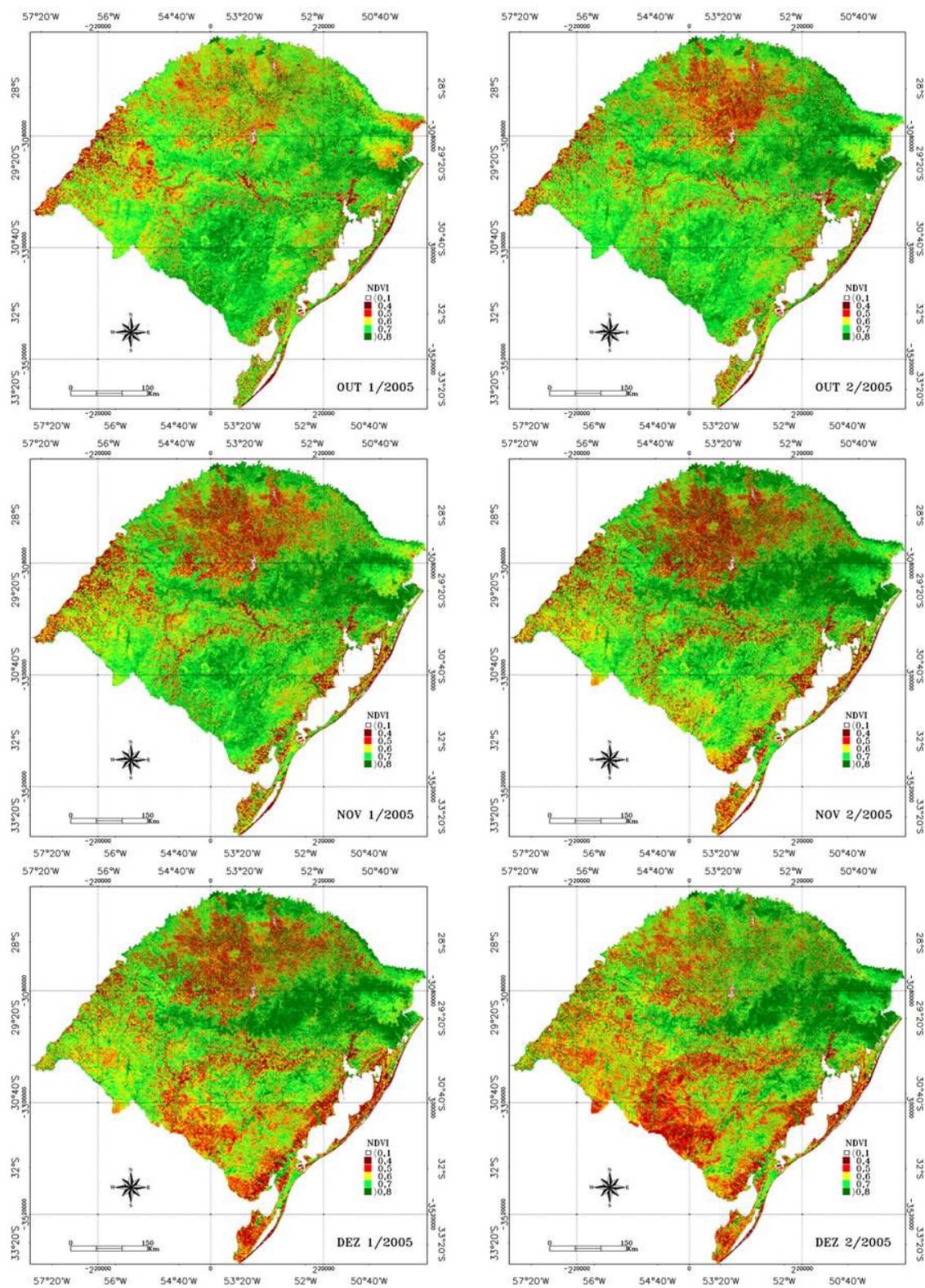
APÊNDICE 5. Continuação...



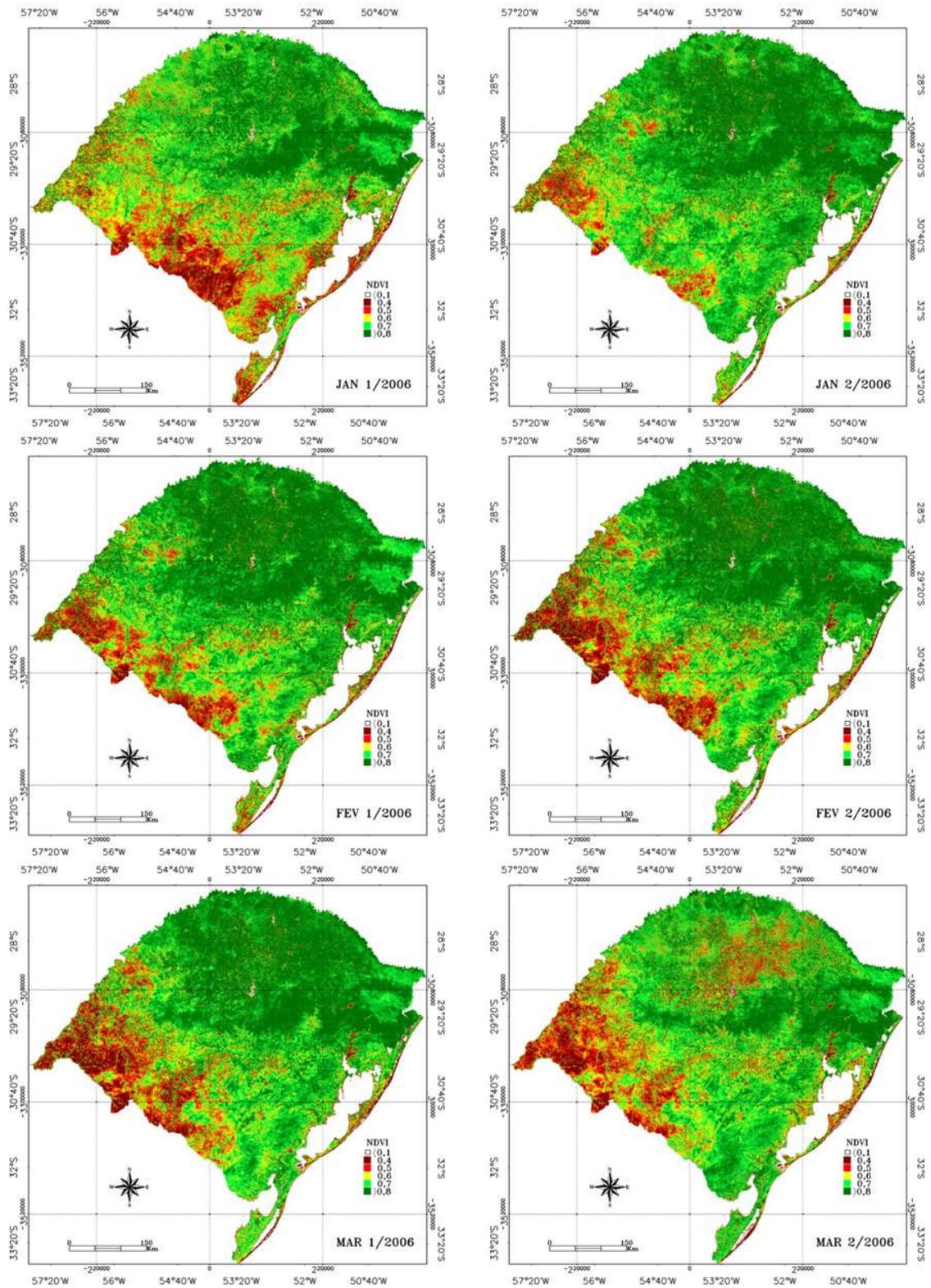
APÊNDICE 6. Série temporal média de NDVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2004/2005 (outubro a março).



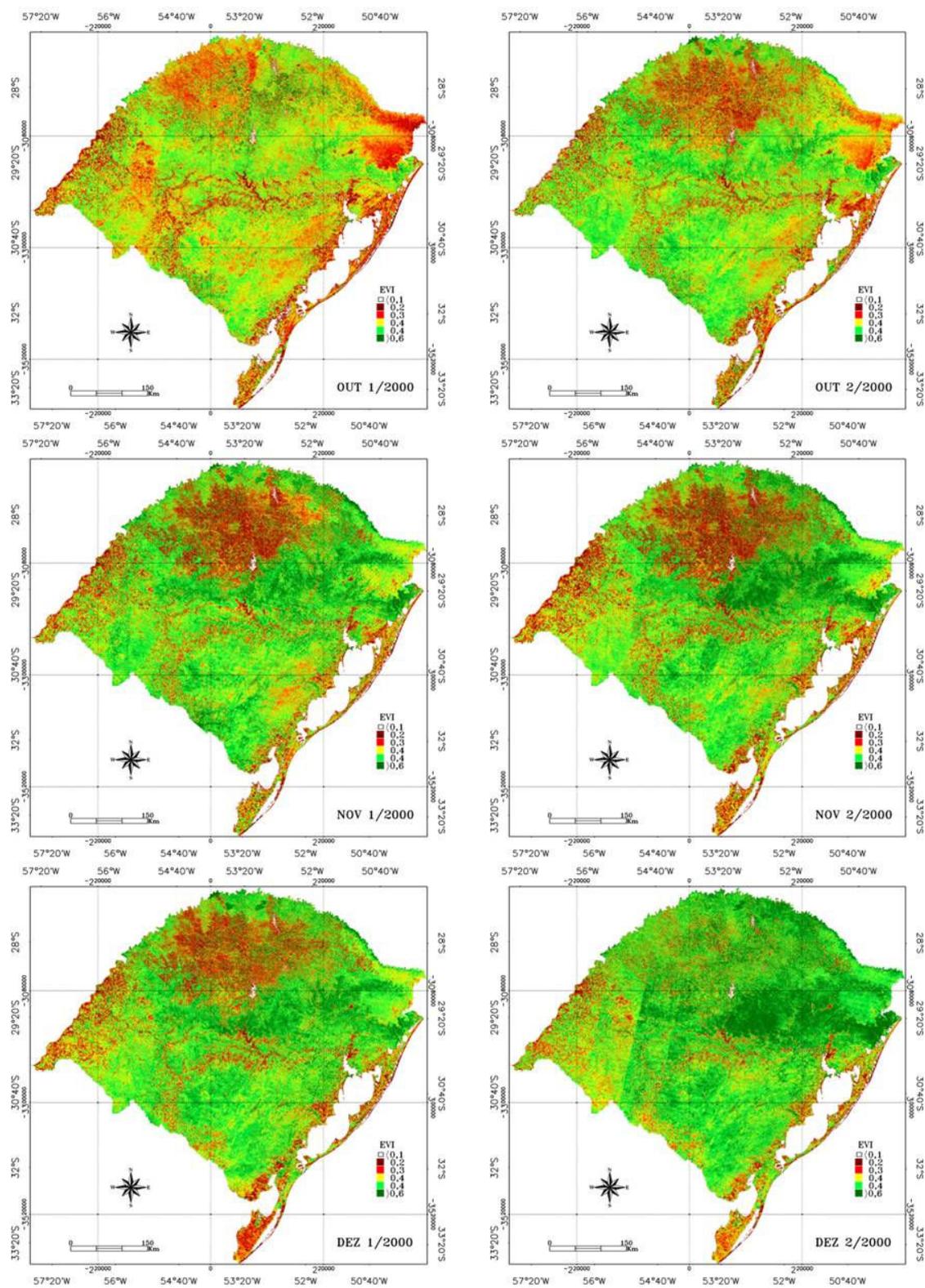
APÊNDICE 6. Continuação...



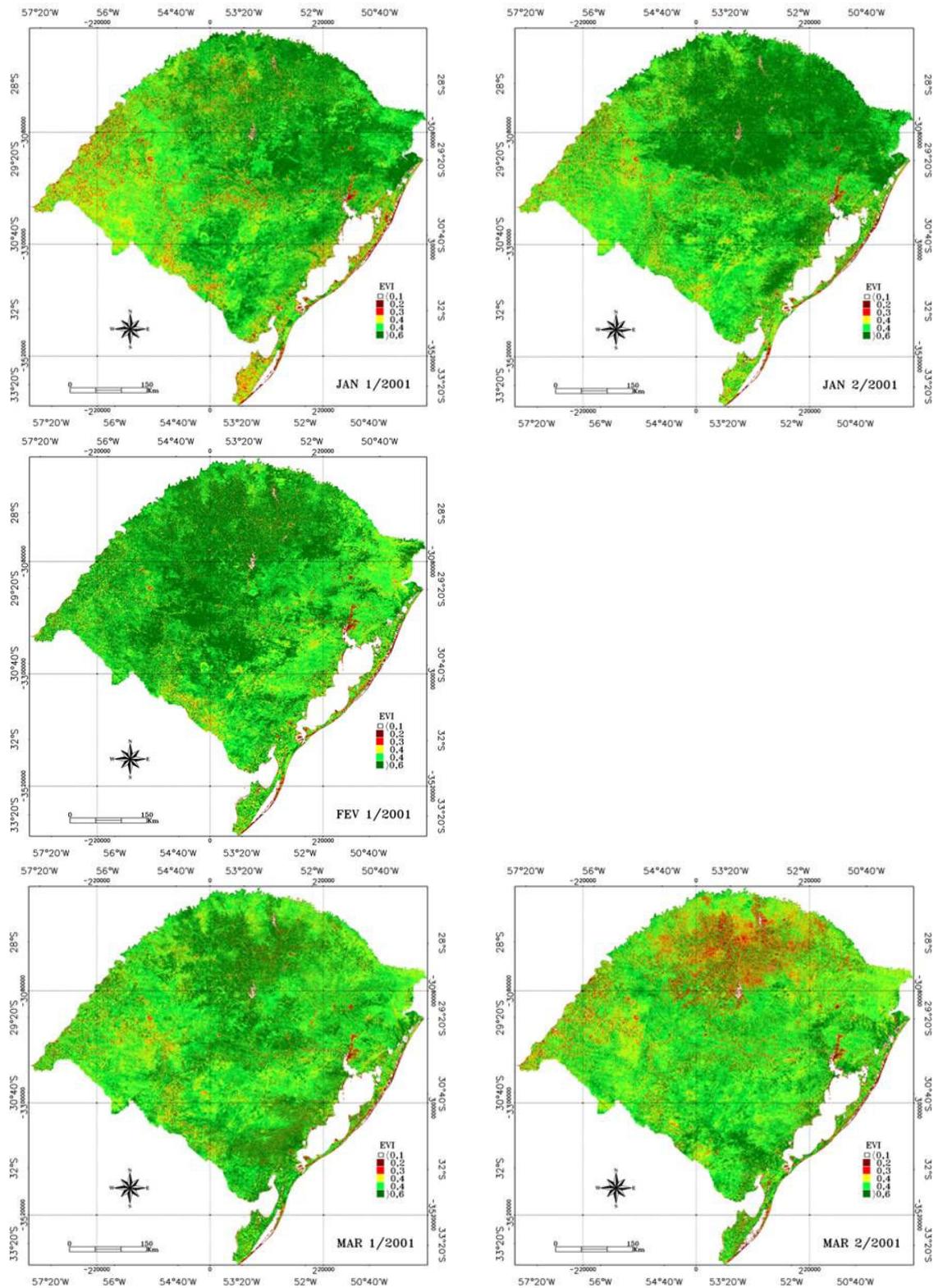
APÊNDICE 7. Série temporal média de NDVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2005/2006 (outubro a março).



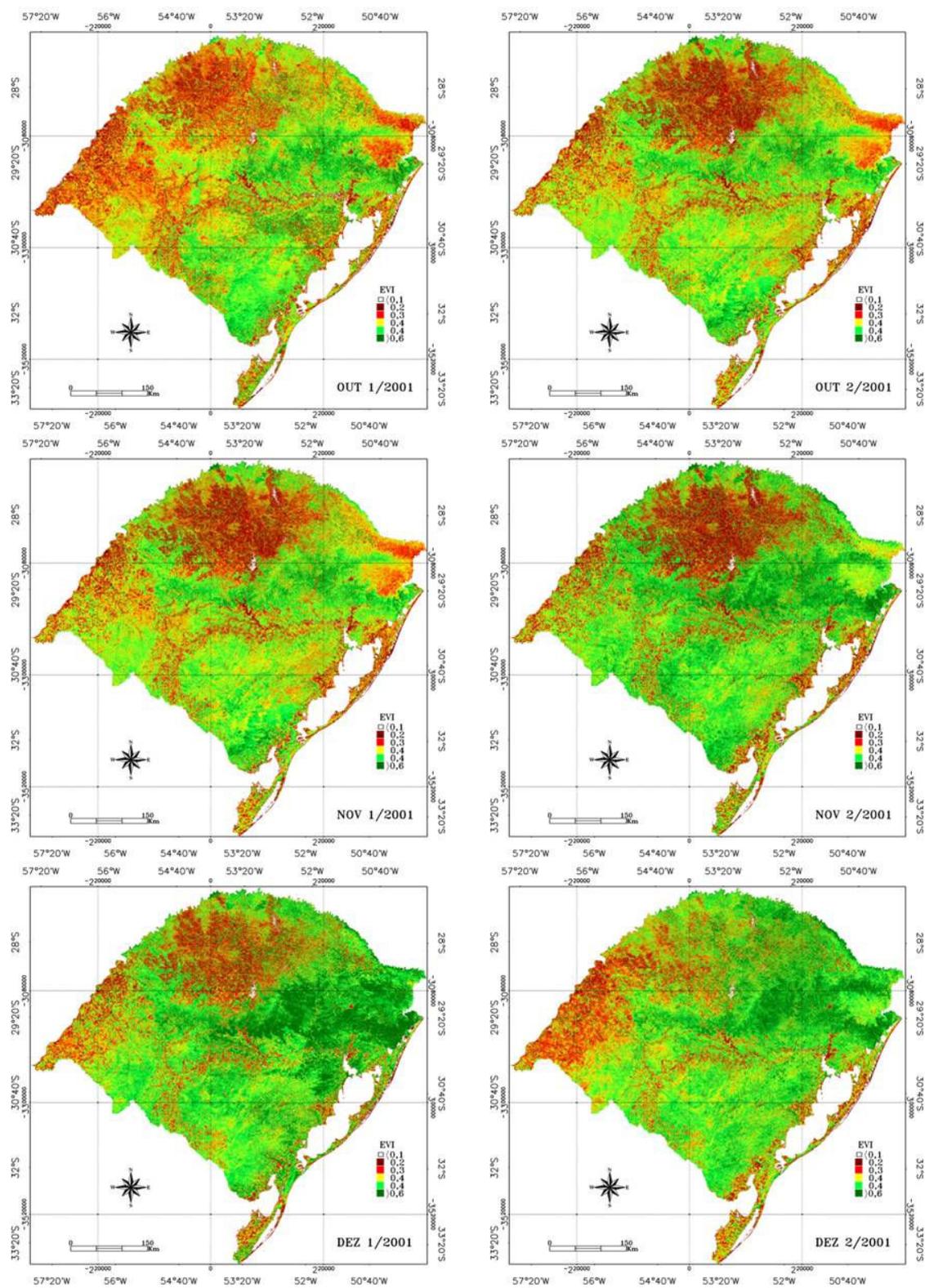
APÊNDICE 7. Continuação...



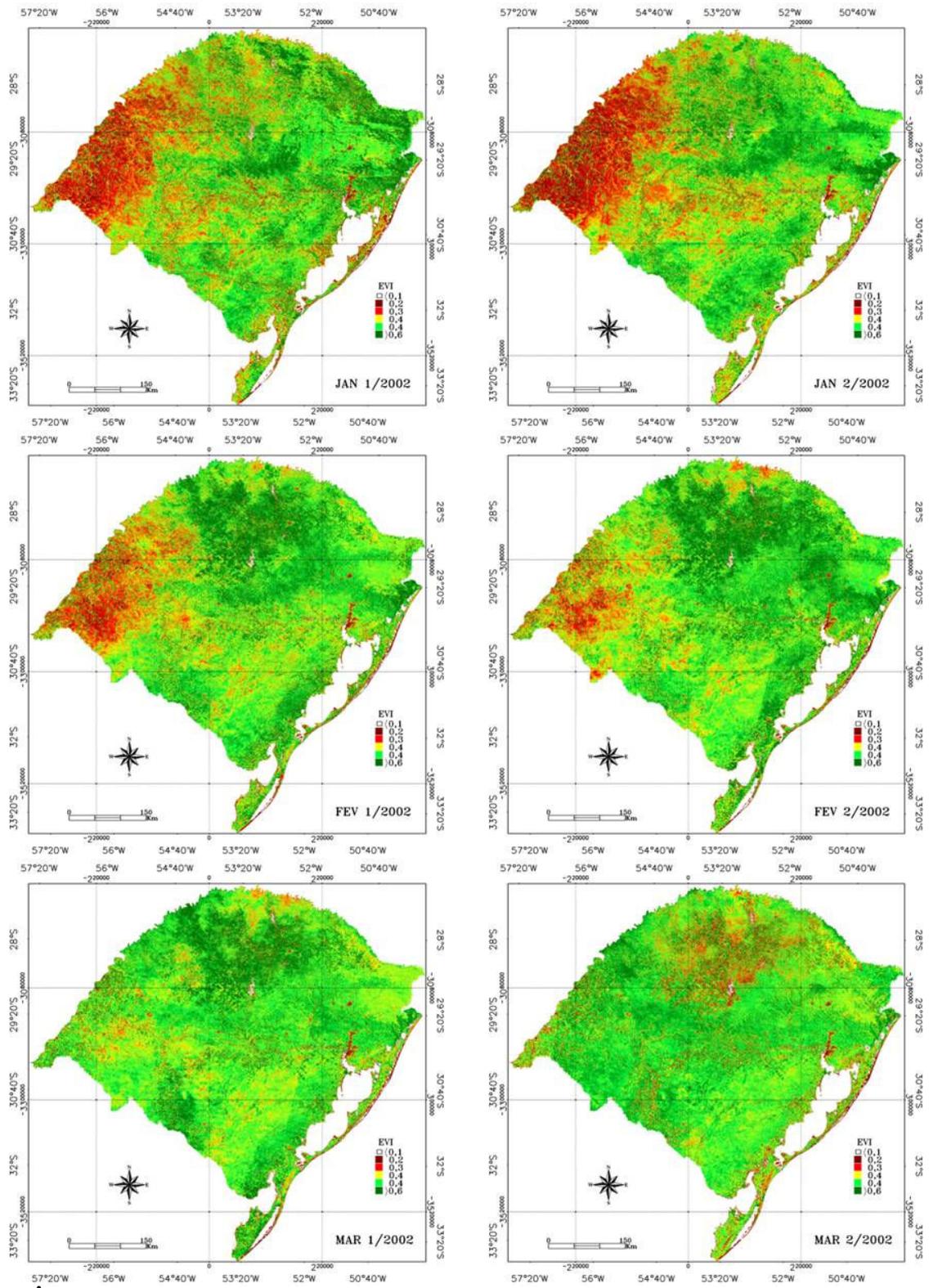
APÊNDICE 8. Série temporal média de EVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2000/2001 (outubro a março).



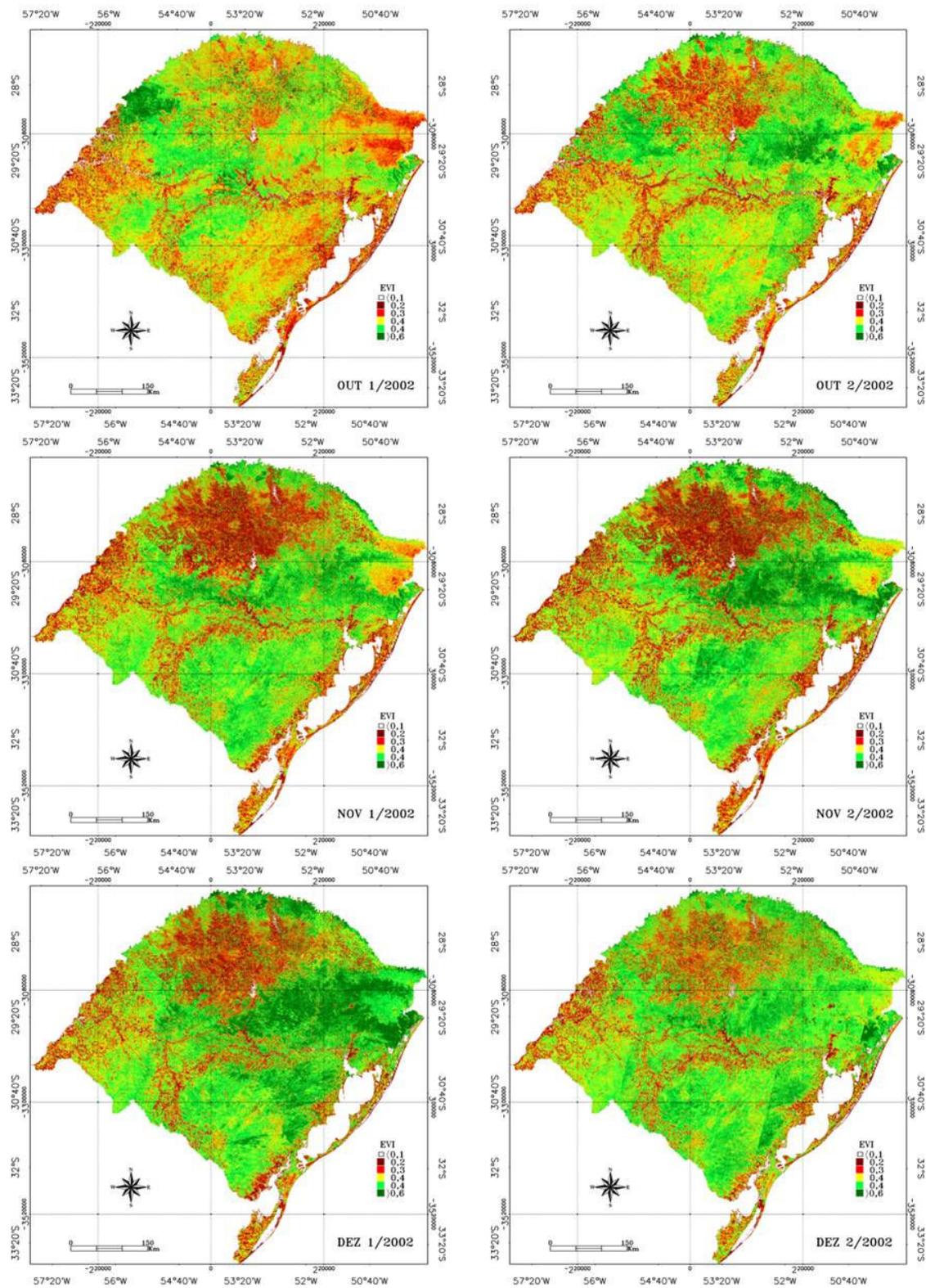
APÊNDICE 8. Continuação...



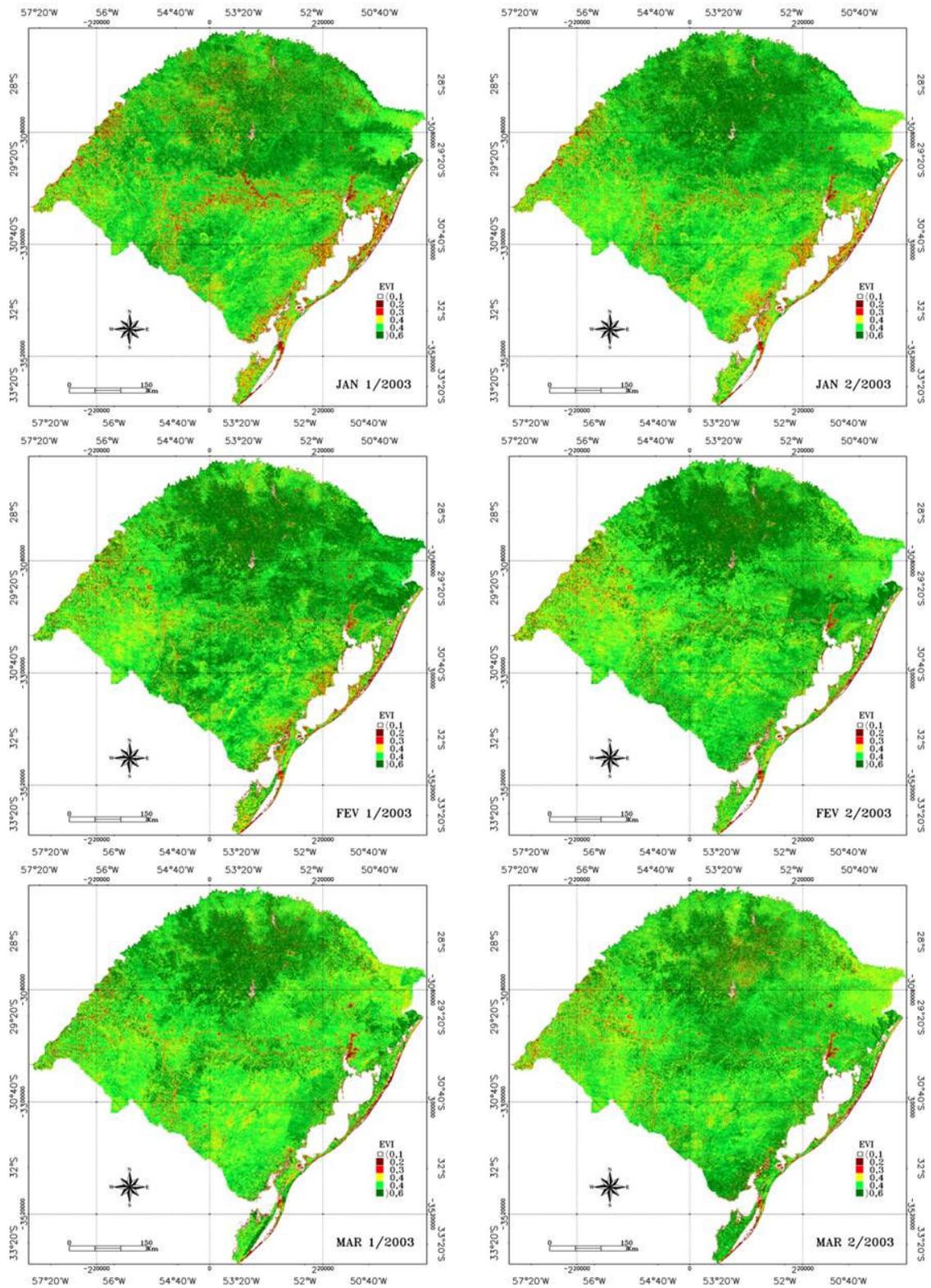
APÊNDICE 9. Série temporal média de EVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2001/2002 (outubro a março).



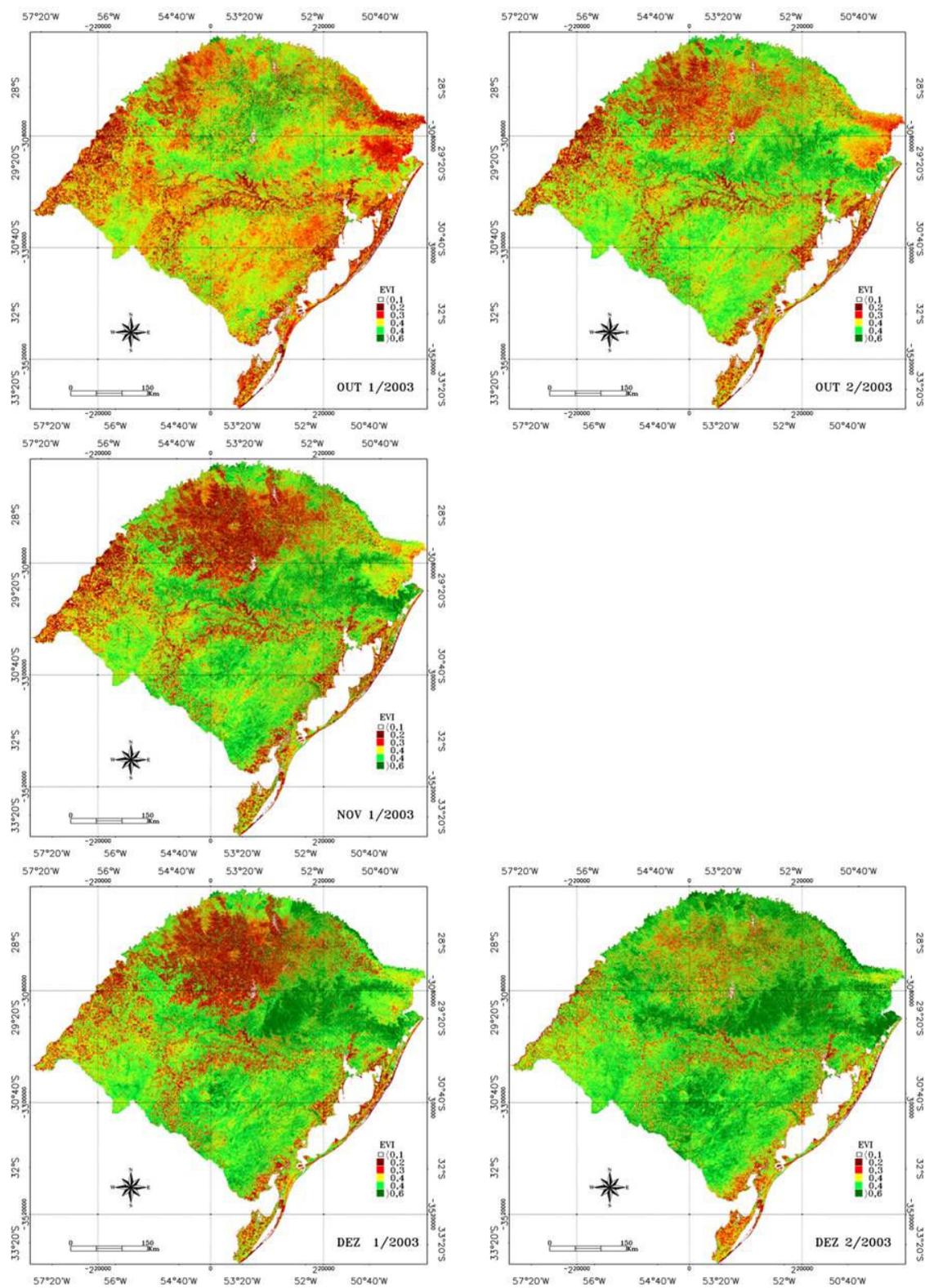
APÊNDICE 9. Continuação...



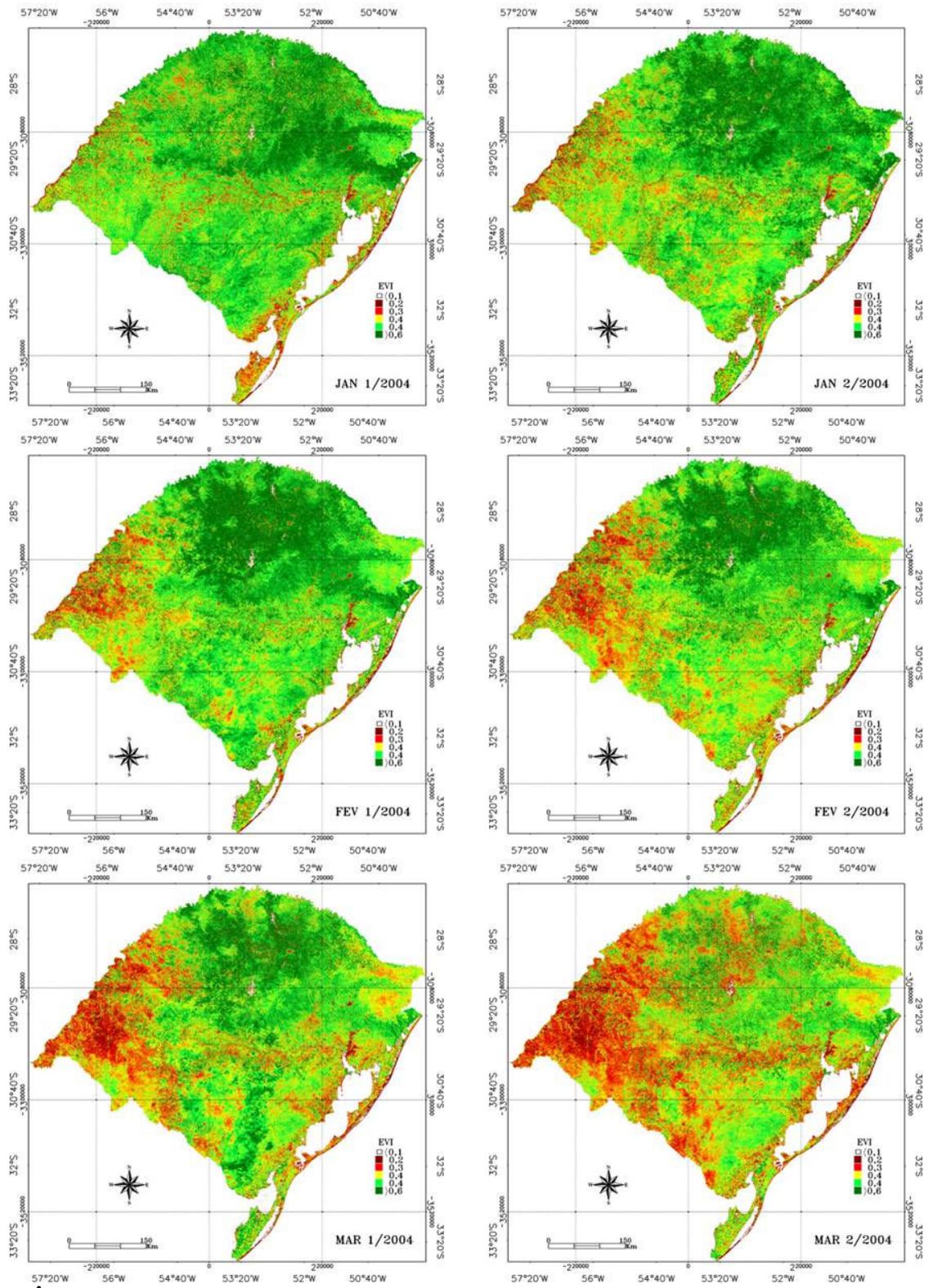
APÊNDICE 10. Série temporal média de EVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2002/2003 (outubro a março).



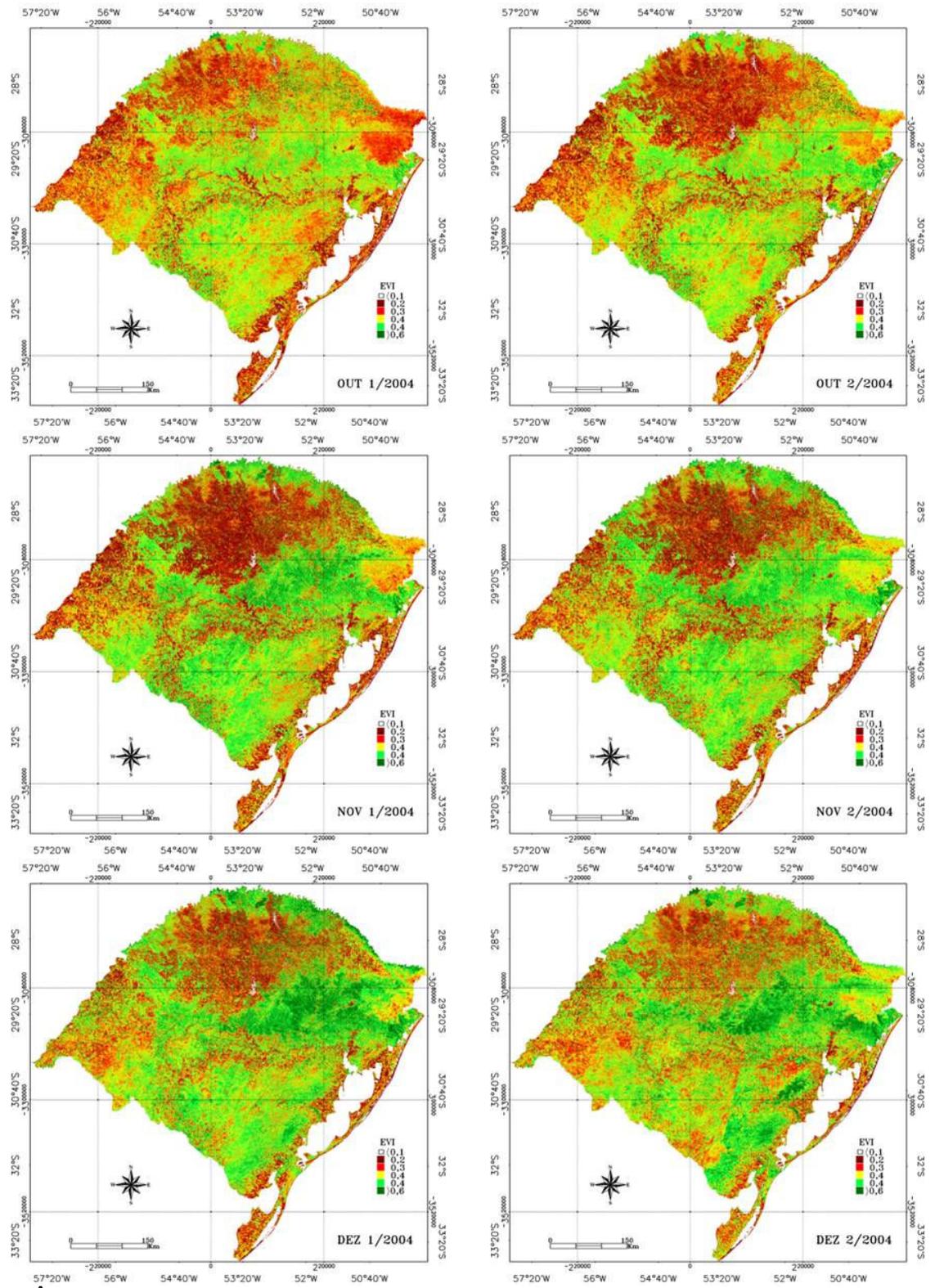
APÊNDICE 10. Continuação...



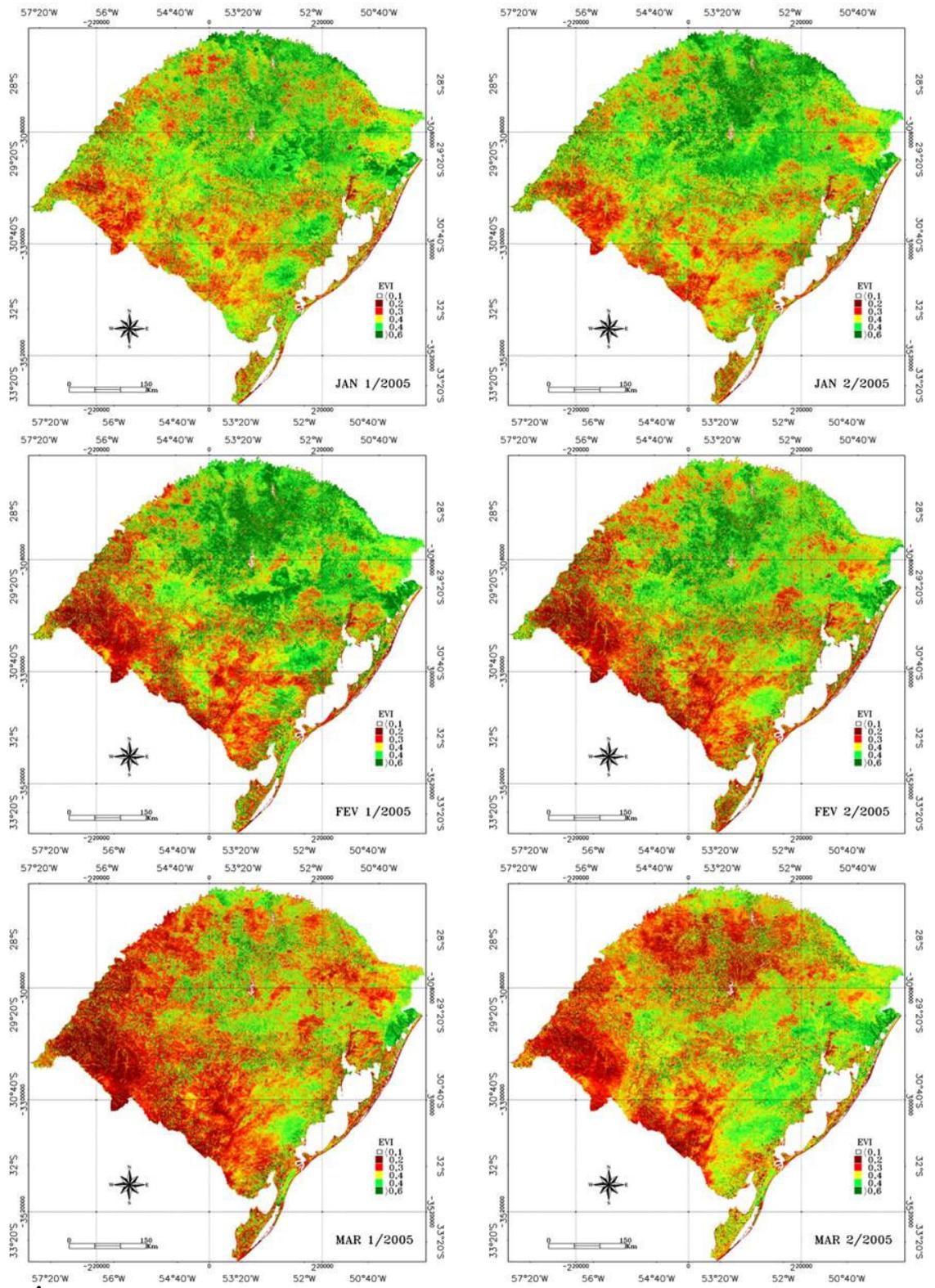
APÊNDICE 11. Série temporal média de EVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2003/2004 (outubro a março).



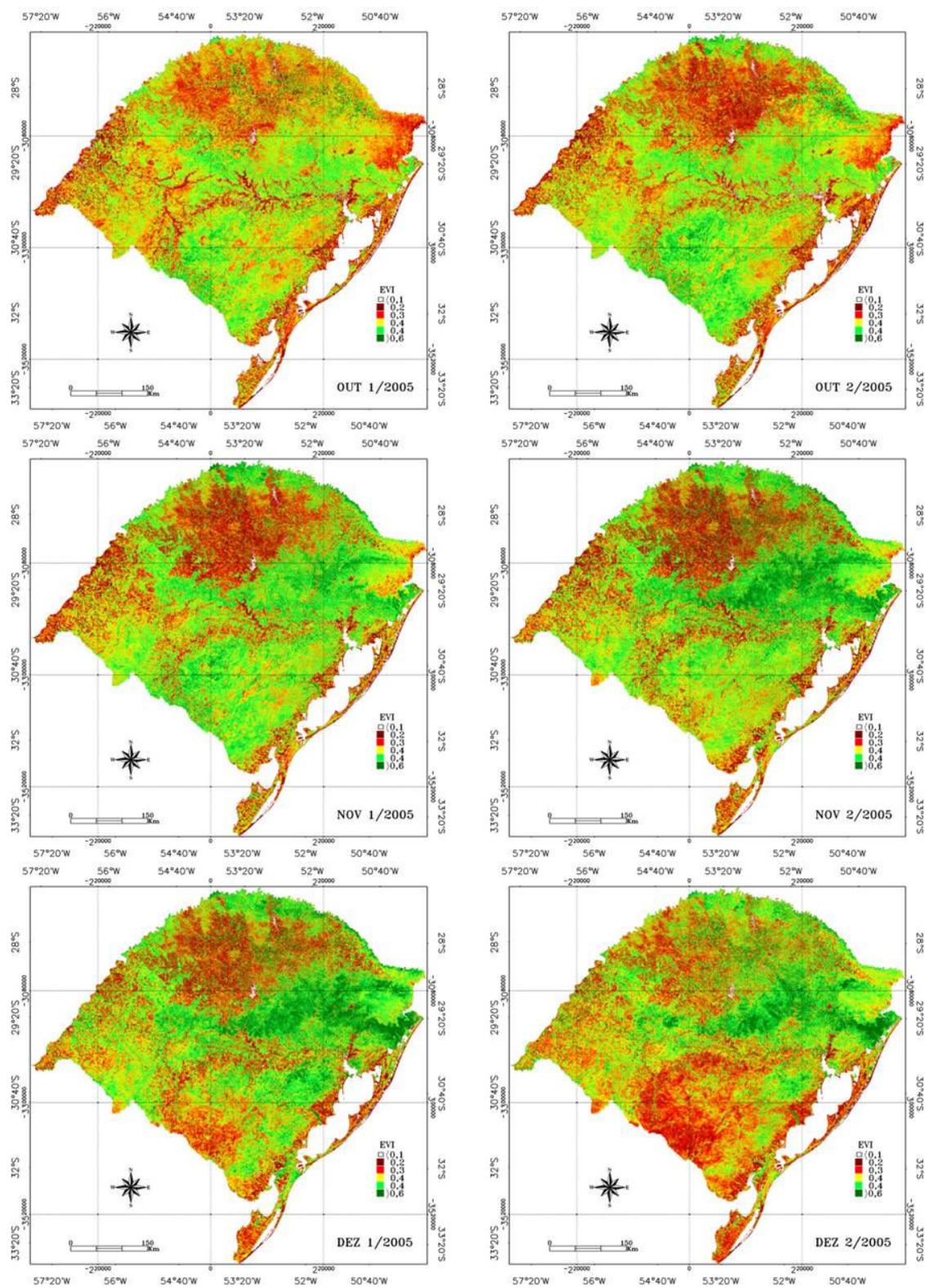
APÊNDICE 11. Continuação...



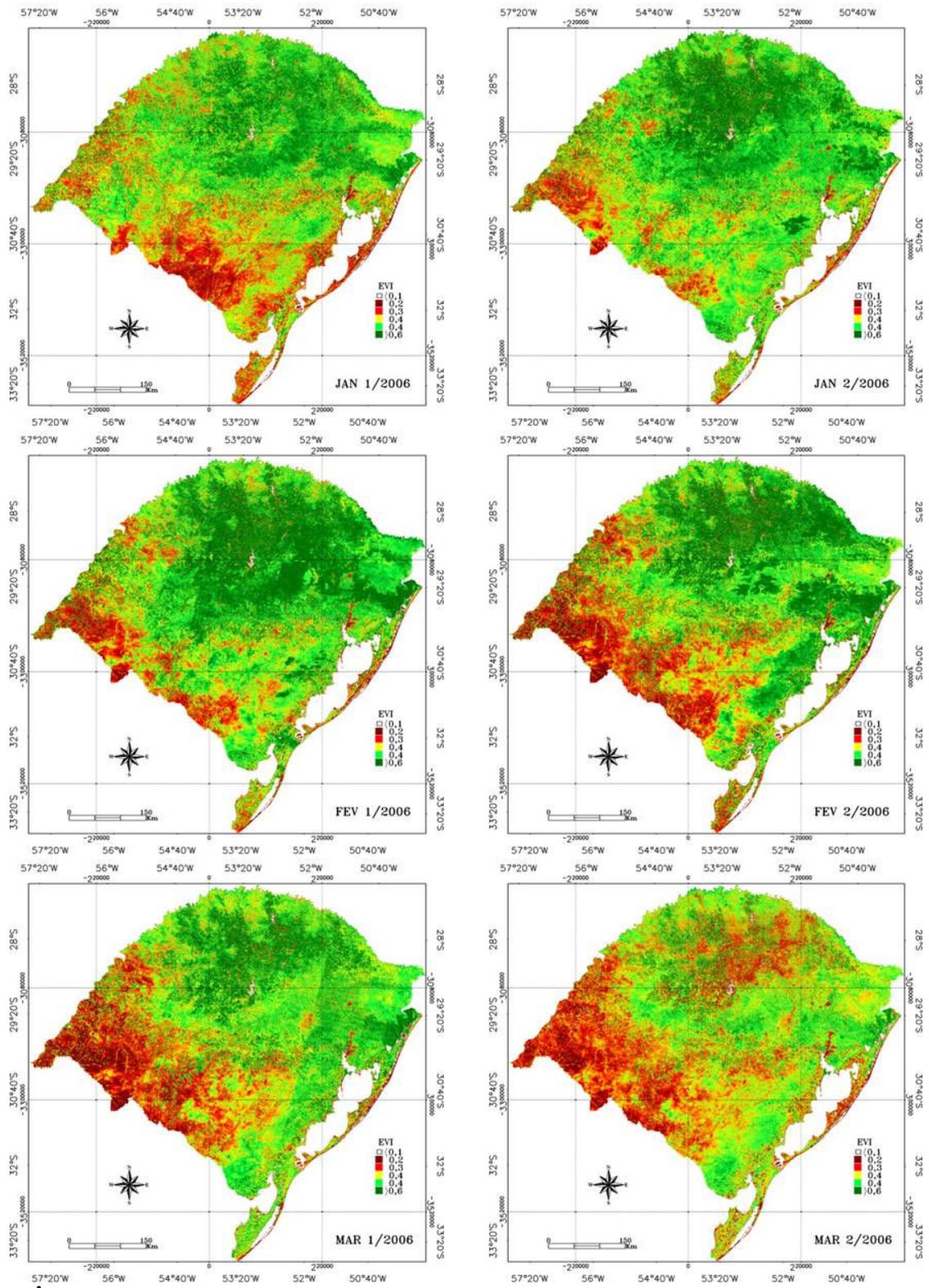
APÊNDICE 12. Série temporal média de EVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2004/2005 (outubro a março).



APÊNDICE 12. Continuação...



APÊNDICE 13. Série temporal média de EVI para o Rio Grande do Sul referente à safra 2005/2006 (outubro a março).



APÊNDICE 13. Continuação...

Região	Área (mil ha)	Safras agrícolas					
		2000/2001	2001/2002	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006
1	NDVI	336,4	280,6	427,9	309,7	305,4	322,7
	IBGE	259,6	275,6	258,7	281,9	260,8	249,5
2	NDVI	165,4	206,5	291,5	184,8	230,7	192,8
	IBGE	165,5	170,9	167,2	175,1	167,2	173,0
3	NDVI	147,5	175,2	195,5	165,3	176,5	176,5
	IBGE	145,8	150,6	152,8	161,4	151,4	157,1
4	NDVI	121,6	138,7	129,8	130,1	136,9	161,5
	IBGE	107,9	112,4	114,2	120,4	116,1	130,4
5	NDVI	139,1	162,3	158,3	126,4	151,9	150,7
	IBGE	102,0	107,2	110,5	126,2	131,4	125,0
6	NDVI	226,0	253,0	331,8	222,0	181,6	196,3
	IBGE	158,1	155,0	149,7	171,4	173,8	148,4

APÊNDICE 14. Área cultivada de arroz irrigado (mil ha), nas diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, estimada com imagens NDVI/MODIS e dados oficiais (IBGE), para as safras 2000/2001 até 2005/2006.

Região	Área (mil ha)	Safras agrícolas					
		2000/2001	2001/2002	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006
1	EVI	503,3	303,7	564,5	405,5	479,4	481,7
	IBGE	259,6	275,6	258,7	281,9	260,8	249,5
2	EVI	191,9	174,9	269,9	171,0	220,6	237,7
	IBGE	165,5	170,9	167,2	175,1	167,2	173,0
3	EVI	171,8	154,0	200,6	166,5	184,9	233,0
	IBGE	145,8	150,6	152,8	161,4	151,4	157,1
4	EVI	140,4	143,6	123,5	118,9	134,3	180,1
	IBGE	107,9	112,4	114,2	120,4	116,1	130,4
5	EVI	135,4	156,8	134,4	128,1	143,8	169,1
	IBGE	102,0	107,2	110,5	126,2	131,4	125,0
6	EVI	198,8	216,9	213,8	185,8	171,5	193,8
	IBGE	158,1	155,0	149,7	171,4	173,8	148,4

APÊNDICE 15. Área cultivada de arroz irrigado (mil ha), nas diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul, estimada com imagens EVI/MODIS e dados oficiais (IBGE), para as safras 2000/2001 até 2005/2006.