

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

ANÁLISE DO MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL APLICADO A
IMAGENS MODIS PARA O MAPEAMENTO DA CULTURA DE ARROZ
IRRIGADO NO ESTADO DO
RIO GRANDE DO SUL

GILCA MARQUES ALVES
Engenheira Agrônoma (UFPel)

Dissertação apresentada como um dos
requisitos à obtenção do grau de
Mestre em Sensoriamento Remoto

Porto Alegre, RS, Brasil
Junho de 2009

FOLHA DE HOMOLOGAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a todos que me incentivaram a desenvolver este trabalho, principalmente as minhas orientadoras, professora Dr^a. Denise Cybis Fontana e professora Dr^a. Eliana Lima da Fonseca, pois sem a orientação das mesmas eu não teria conseguido. Gostaria de deixar aqui um agradecimento especial a minha filha Gabriela Marques Alves da Silveira e dedicar todo o meu esforço a ela, e aos meus ricos pequenos, Lucas Marques Alves Petry e Vitor Marques Alves Petry. Agradeço também ao apoio dos meus pais e, é claro, à minha irmã que foi a maior incentivadora deste mestrado e um exemplo a ser seguido, Rita de Cássia Marques Alves, muito obrigada. Gostaria de deixar aqui o meu muito obrigado também ao meu amigo, companheiro, namorado, marido, pai dos meus filhos em fim, uma pessoa muito importante e que me apoiou em todas as etapas de minha vida, estando sempre presente com uma palavra amiga, Alexandre Corrêa Petry, muito obrigada por tudo. É claro que eu não poderia esquecer da minha super babá Adriana Monteiro Padilha, graças a ela consegui concluir meu trabalho, uma pessoa que confio e que cuida muito bem dos meus filhos e sempre esteve a disposição para me ajudar, dedico a ela um carinho muito especial.

Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM) que proporcionou através da sua infra-estrutura as condições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho, e a todos os mestres desta instituição que me ajudaram.

ANÁLISE DO MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL APLICADO A IMAGENS MODIS PARA O MAPEAMENTO DA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Autor: Gilca Marques Alves

Orientador: Dr^a. Denise Cybis Fontana

Co-Orientador: Dr^a. Eliana Lima da Fonseca

RESUMO

O monitoramento e a previsão de safras agrícolas são fundamentais para a economia de um país ou região, pois a partir dos dados gerados é possível obter informações a respeito da oferta de produtos no mercado, sendo estas informações necessárias, tanto na definição de preços, quanto nas políticas públicas de estoque. Com base na necessidade de fornecer dados objetivos, complementando os dados divulgados pelos órgãos oficiais responsáveis, este trabalho teve por objetivo avaliar o uso das imagens fração geradas a partir da aplicação do modelo linear de mistura espectral para classificação automática da área cultivada com arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul, levando em conta o comportamento temporal desta cultura. A área utilizada para a realização deste estudo compreende a região orizícola do Estado. Para isso, foram utilizadas imagens do sensor EOS-MODIS, produto MOD13, índice de vegetação (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*), com resolução espacial de 250 m, e correspondente ao período do ciclo da cultura de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul, (de novembro de 2005 a abril de 2006). Estas imagens foram integradas a um banco de dados georreferenciados utilizando o aplicativo Spring versão 4.3.3. Para isto, foi necessária a utilização do aplicativo ConvGeotiff, para a conversão da imagem MODIS que é disponibilizada em 16 bits, para 8 bits. Após, foi feita a segmentação da imagem e classificação, adotando o algoritmo ISODATA, para o cálculo da área cultivada com arroz irrigado. Para implementar o modelo linear de mistura espectral e gerar as imagens fração foram utilizadas as bandas do vermelho, do infravermelho próximo e do infravermelho médio, contidas no produto MOD13. A avaliação da qualidade dos resultados da classificação das áreas cultivadas com arroz irrigado no Estado e a eliminação das confusões com áreas úmidas não relacionadas ao cultivo de arroz geradas pelo algoritmo de classificação automática, foi feita através da comparação com o mapeamento feito com imagens Landsat, para o mesmo ano safra 2005/2006. Dada a natureza do produto MODIS, problemas com a nebulosidade não constituíram limitação à geração de um mapa para todo o Estado. Verificou-se que a melhor data para a classificação automática das áreas de arroz irrigado é o momento de entrada de água na lavoura. A área estimada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul, através das imagens MODIS aproxima-se dos dados oficiais, sendo, portanto, possível a adoção desta metodologia como mais uma ferramenta para auxiliar em programas de previsão e monitoramento de safras agrícolas, complementando os métodos convencionais utilizados atualmente na previsão de safras no Brasil. O método proposto é rápido, de fácil implementação e tanto as imagens adotadas quanto o software utilizado são gratuitos, resultando em custo reduzido.

Analysis of the linear spectral mixture model applied to MODIS images for the mapping of irrigated rice culture in Rio Grande do Sul

Author: Gilca Marques Alves

Adviser: Dr^a. Denise Cybis Fontana

Co-Adviser: Dr^a. Eliana Lima da Fonseca

ABSTRACT

Monitoring and forecasting crops is fundamental for the economy of a country or region, since having such data enables the obtaining of information on the offer of products in the market. Such information is necessary for the definition of prices, as well as for the definition of stockpiling public policies. Based on the necessity of supplying objective data which may complement the data published by the official departments in charge of this task, this work aims at evaluating the use of fraction images generated by the application of linear spectral mixture model for the automatic classification of the cultivated area of irrigated rice in Rio Grande do Sul State, taking into account the temporal behavior of such culture. The area in which this study was performed comprises the riziculture region of the State. To achieve the data, the images used were captured by the sensor EOS-MODIS, product MOD13, vegetation index (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*) with spatial resolution of 250m, corresponding to the period of the irrigated rice culture cycle in Rio Grande do Sul (from November, 2005 to April, 2006). These images were integrated to a georeferenced database using the software Spring, version 4.3.3. It was necessary to use the software ConvGeotiff to convert the MODIS image, which is available at 16 bits, to 8 bits. After this, the image was segmented and classified, using the ISODATA algorithm for the calculation of the irrigated rice cultivated area. In order to implement the linear spectral mixture model and to generate the fraction images, the bands of red, near-infrared and mid-wavelength infrared from the MOD13 product were used. The quality of the classification results for the irrigated rice cultivated areas in the State and the elimination of the confusion with humid areas not related to rice cultivation generated by the automatic classification algorithm were carried out by means of a comparison of the mapping carried out with Landsat images for the same crop year 2005/2006. Due to the nature of MODIS, problems with nebulosity did not constitute a limitation for the generation of a map for the whole state. It was noticed that the best date for the automatic classification of irrigated rice areas is the beginning of water entrance in the fields. The estimated area of irrigated rice in Rio Grande do Sul obtained by the MODIS images is close to the official data, thus being possible to adopt such methodology as an additional tool to help programs for monitoring and forecasting crops, complementing the conventional methods used nowadays to forecast crops in Brazil. The method proposed is fast, easily implemented and the images used, as well as the software, are free, resulting in low costs for the work.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica.....	4
2.1. A cultura do Arroz (<i>Oriza sativa</i>).....	4
2.1.1. Condições climáticas para o cultivo do arroz.....	5
2.1.2. Zoneamento Agroclimático.....	8
2.1.3. Sistemas de cultivo e tratos culturais da cultura do arroz.....	9
2.2. Sensor MODIS.....	10
2.2.1. Histórico e descrição do programa EOS.....	10
2.2.2. Características e especificações do sensor MODIS.....	11
2.2.3. Níveis de dados MODIS.....	13
2.2.4. Produtos gerados pelos dados do sensor MODIS.....	14
2.2.5. Produto MOD 13.....	15
2.2.6. Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).....	16
2.3. Modelo Linear de Mistura Espectral.....	17
2.4. Sensor TM – Programa Landsat.....	20
2.4.1. Características do sensor TM.....	20
3. Material e métodos.....	22
3.1. Área de estudo.....	22
3.2. Período de estudo.....	25
3.3. Imagens MODIS.....	26
3.3.1. Produto MOD 13.....	26
3.3.2. Conversões de formato.....	28

3.3.3. Banco de dados.....	30
3.4. Modelo Linear de Mistura Espectral.....	30
3.5. Classificação.....	31
3.5.1. Segmentação.....	32
3.5.2. Classificação.....	32
3.6. Análise dos resultados.....	33
4. Resultados e discussão.....	35
4.1. Geração das imagens fração.....	43
4.2. Variação temporal da reflectância dos “ <i>pixels</i> puros”.....	47
4.3. Testes de classificação.....	50
4.3.1. Imagem da 1º quinzena de janeiro de 2006 – jan_1 – três imagens fração do MLME (vegetação, solo e água).....	50
4.3.2. Imagem de máximo NDVI do ciclo da cultura e a imagem fração referente a porção água da 2º quinzena de novembro de 2005	53
4.3.3. Imagem da 2º quinzena de novembro de 2005 com as imagens fração geradas pelo MLME (vegetação, solo e água).....	56
4.4. Estimativa de área cultivada com arroz irrigado.....	58
5. Conclusões.....	64
6. Referências bibliográficas.....	65

RELAÇÃO DE FIGURAS

- FIGURA 1.** Área de estudo: regiões orizícolas no Estado do Rio Grande do Sul (Fonte: IRGA, 2007).....22
- FIGURA 2.** Localização dos solos de várzea no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina (Fonte: adaptado de IBGE, 1986, e Santa Catarina, 1986).....25
- FIGURA 3.** Zoneamento Agroclimático por época de semeadura para o arroz irrigado, cultivares de ciclo médio (M) e precoce (P), no Estado do Rio Grande do Sul. Os números e as letras indicam as regiões e sub-regiões agroecológicas. A área definida pela letra A abaixo da linha preta em negrito corresponde às regiões orizícolas. Fonte: Adaptado de Steinmetz e Braga (2001).....26
- FIGURA 4.** *Tiles* h13v11 e h13v12, referentes às cenas que cobrem o Estado do Rio Grande do Sul. FONTE: NASA 2008.....27
- FIGURA 5.** Diagrama dos passos necessários para o tratamento dos dados MODIS para importação para o aplicativo Spring versão 4.3.3.....29
- FIGURA 6.** Fluxograma dos passos adotados para a classificação das imagens de NDVI até a obtenção do mapa final com as áreas de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul.....33
- FIGURA 7.** Localização das áreas cultivadas com arroz irrigado no Rio Grande do Sul na safra de 2005/2006, mapeadas através de imagens Landsat – no Litoral não foi realizado o mapeamento devido a nebulosidade persistente (Fonte: Weber *et al.*, 2007).....34
- FIGURA 8.** Curvas espectrais dos “*pixels* puros” (vegetação, solo e água) da imagem MODIS de novembro de 2005, 1º e 2º quinzena, no Estado do Rio Grande do Sul.....37
- FIGURA 9.** Curvas espectrais dos “*pixels* puros” (vegetação, solo e água) da imagem MODIS de dezembro de 2005, 1º e 2º quinzena, no Estado do Rio Grande do Sul.....38

FIGURA 10. Curvas espectrais dos “ <i>pixels</i> puros” (vegetação, solo e água) para a imagem MODIS de janeiro de 2006, 1º e 2º quinzena, no Estado do Rio Grande do Sul.....	39
FIGURA 11. Curvas espectrais dos “ <i>pixels</i> puros” (vegetação, solo e água) para a imagem MODIS de fevereiro de 2006, 1º e 2º quinzena, no Estado do Rio Grande do Sul.....	40
FIGURA 12. Curvas espectrais dos “ <i>pixels</i> puros” (vegetação, solo e água) para a imagem MODIS de março de 2006, 1º e 2º quinzena, no Estado do Rio Grande do Sul.....	41
FIGURA 13. Curvas espectrais dos “ <i>pixels</i> puros” (vegetação, solo e água) para a imagem MODIS de abril de 2006, 1º e 2º quinzena, no Estado do Rio Grande do Sul.....	42
FIGURA 14. Imagens fração de água (a), solo (b) e vegetação (c), geradas a partir do modelo linear de mistura espectral para a 2ª quinzena de novembro/2005. Estado do Rio Grande do Sul, safra 2005/2006.....	44
FIGURA 15. Imagens fração de água (a_1), solo (b_1) e vegetação (c_1), geradas a partir do modelo linear de mistura espectral para a 1ª quinzena de janeiro/2006. Estado do Rio Grande do Sul, safra 2005/2006.....	45
FIGURA 16. Imagens fração de água (a_2), solo (b_2) e vegetação (c_2), geradas a partir do modelo linear de mistura espectral para a 2ª quinzena de janeiro/2006. Estado do Rio Grande do Sul, safra 2005/2006.....	46
FIGURA 16. Evolução temporal da reflectância dos “ <i>pixels</i> puros” de água, solo e vegetação (cultura de arroz), nas porções do vermelho (VER), infravermelho próximo (IVP) e médio (IVM), durante a safra 2005/2006, no Rio Grande do Sul.....	49

- FIGURA 18.** Evolução temporal do NDVI durante o ciclo da cultura de arroz, no Estado do Rio Grande do Sul, para os “*pixels* puros” de vegetação, solo e água, na safra 2005/2006.....50
- FIGURA 19.** Resultado bruto da classificação automática da imagem da 1º quinzena de janeiro de 2006, com as três bandas do modelo linear de mistura espectral, contendo as 55 classes espectrais, para o Estado do Rio Grande do Sul.....52
- FIGURA 20.** Área classificada como arroz irrigado, obtida a partir da seleção de 12 classes espectrais. Estado do Rio Grande do Sul, safra 2005/2006.....53
- FIGURA 21.** Resultado da classificação da imagem de máximo NDVI do período da cultura e a banda de água do MLME, da 2ª quinzena de novembro/2005. imagem temática, obtida a partir da seleção de algumas classes condizentes a áreas de arroz, onde foram selecionadas 6 classes.....55
- FIGURA 22.** Resultado da classificação da imagem de máximo NDVI do período da cultura e a banda de água do MLME, da 2ª quinzena de novembro/2005. imagem temática, obtida a partir da seleção de algumas classes condizentes a áreas de arroz, onde foram selecionadas 9 classes.....56
- FIGURA 23.** Imagem temática obtida a partir da classificação da imagem da 2ª quinzena de novembro/2005, com as 3 bandas do modelo linear de mistura espectral (vegetação, solo e água).58
- FIGURA 24.** Área cultivada para a safra 2005/2006 com arroz irrigado no Rio Grande do Sul estimada pelo IBGE e partir da classificação da imagem MODIS da 2ª quinzena de novembro de 2005.....59
- FIGURA 25.** Resultado final da classificação automática mostrando a área de cultivo com arroz (em vermelho) no Estado do Rio Grande do Sul, na safra de 2005/2006.....60
- FIGURA 26.** Área cultivada com arroz irrigado na safra 2005/2006, estimada pelo IBGE, Landsat e MODIS a partir da 2ª quinzena de novembro, os municípios apresentados são grandes produtores e apresentaram ausência de nebulosidade.....62

FIGURA 27. Localização dos municípios grande produtores da cultura de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul, utilizados para comparação dos dados obtidos com sensor TM-Landsat e MODIS.....63

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento e a previsão de safras agrícolas são fundamentais para a economia de um país ou região, pois a partir dos dados gerados pode-se obter informações a respeito da oferta de produtos no mercado, sendo estas informações necessárias, tanto na definição de preços, quanto nas políticas públicas de estoque.

Atualmente, no Brasil, o monitoramento e a previsão de safras agrícolas são realizados através de levantamentos de informações obtidas através de entrevistas com agricultores e entidades relacionadas com o setor agrícola. Os dados gerados nestes levantamentos são subjetivos e a principal limitação é a dificuldade de avaliação quanto aos erros de estimativa tanto de área plantada quanto de rendimento de grãos e produção total de uma determinada cultura.

Tendo isto em vista, é estratégica a melhoria do sistema nacional de monitoramento e a previsão de safras a partir da incorporação de informações mais precisas a respeito dos dois componentes que compõem a produção agrícola: áreas cultivadas e rendimento de grãos.

Atualmente as técnicas de sensoriamento remoto estão sendo muito empregadas graças ao avanço nas pesquisas na área, que nos últimos anos demonstraram a possibilidade de obtenção de estimativas não só de áreas cultivadas, mas também de rendimento, através da introdução de imagens e de modelagem, em diferentes culturas. Aliam-se às imagens de satélites, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Sistema de Posicionamento Global (GPS). Os trabalhos desenvolvidos têm evidenciado as limitações e potencialidades no uso das técnicas de Sensoriamento Remoto em grandes e pequenas extensões de áreas no Brasil.

A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a partir de 2004, tem buscado integrar ao atual sistema, recursos tecnológicos de eficiência comprovada, como modelos estatísticos auxiliados pelo sensoriamento remoto, sistemas de posicionamento por satélite (GPS), sistemas de informações geográficas (SIG) e modelos agrometeorológicos. Tais tecnologias constituem o “método objetivo” que

recebeu o nome de Projeto GeoSafras. O GeoSafras tem focado prioritariamente alguns produtos como: café; cana-de-açúcar; soja; arroz e milho. A prioridade por estes produtos é decorrente da urgência da demanda por informações relativas a tais culturas bem como da importância das mesmas para economia brasileira. Porém, estas informações com o tempo deverão se estender a outras culturas de acordo com as necessidades e possibilidades do Projeto.

Com relação às estimativas de áreas de cultivo, o avanço das técnicas envolvendo o sensoriamento remoto tornou possível a utilização operacional de imagens de satélites. O vasto número de satélites orbitando o espaço e a grande variedade com relação à resolução espacial, espectral e temporal dos mesmos, permite a definição e o monitoramento de áreas cultivadas. Há algum tempo atrás, isto não era possível devido à cobertura de satélites, que permitiam apenas uma ou no máximo duas visitas durante o período das safras, reduzindo assim as chances de um melhor acompanhamento e quantificação das áreas cultivadas. Atualmente, os novos sensores, assim como a combinação dos vários satélites, permitem a obtenção de maior número de imagens por ciclo de cultivo, garantindo o monitoramento das áreas cultivadas.

No Rio Grande do Sul o sistema de cultivo de arroz, por ser do tipo irrigado, implica em algumas dificuldades no monitoramento por satélite. A confusão gerada pela resposta espectral desta cultura com outras culturas de verão, e o fator água, que influencia de forma significativa na resposta espectral, dificulta o reconhecimento das áreas de arroz.

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo da plataforma Terra, tem sido muito utilizado em pesquisas voltadas para estudos em áreas importantes como a agricultura, desmatamentos e queimadas. Entre os produtos disponibilizados encontra-se o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*), que pode ser considerado o mais utilizado em todo o mundo para o acompanhamento e monitoramento do ciclo de diversas culturas agrícolas.

Dada a resolução espacial das imagens de satélites, é comum encontrar misturas de diferentes alvos em um mesmo *pixel*, comumente chamado de mistura espectral, o que compromete em parte o desempenho dos classificadores. Atualmente existem técnicas aplicadas no processamento digital destas imagens que permitem a separação de alguns alvos, sendo o Modelo Linear de Mistura Espectral uma delas. Com base nessas informações e tendo como motivação o fato de que a cultura do arroz no Brasil é

de grande importância econômica e social e de que existe o interesse por parte de órgãos oficiais em estimar a área cultivada e monitorar as diferentes etapas do ciclo fenológico, o presente trabalho foi desenvolvido. A hipótese apresentada para o desenvolvimento deste trabalho é que é possível identificar áreas de arroz irrigado com base na variação temporal da resposta espectral da cultura, a qual difere dos demais alvos na superfície.

Neste contexto, o **objetivo principal** do trabalho foi avaliar o uso das imagens fração geradas a partir do Modelo Linear de Mistura Espectral para a classificação automática da área cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul, utilizando imagens do sensor MODIS, visando sua utilização no monitoramento dessas áreas.

Os **objetivos específicos** foram: (i) gerar as imagens fração a partir da aplicação do modelo linear de mistura, (ii) escolher a melhor data para realização do mapeamento das áreas de arroz, (iii) testar a segmentação e classificação digital para fins de definição de áreas de cultivo de arroz e por fim (iv) gerar um mapa para todo o Estado com as áreas cultivadas com arroz irrigado obtido de forma objetiva, rápida e com baixo custo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A cultura do Arroz

O arroz (*Oriza sativa*) é um dos mais importantes grãos produzidos no mundo. A cultura ocupa uma área de aproximadamente 150 milhões de hectares no mundo, movimentando uma produção de cerca de 590 milhões de toneladas a cada safra agrícola, sendo mais de 75% desta produção oriunda do sistema de cultivo irrigado (Embrapa, 2007). É responsável pela alimentação da maior parte da população mundial e está presente na mesa de bilhões de pessoas. Nos países em desenvolvimento é considerado o cultivo alimentar de maior importância, principalmente na Ásia e Oceania, onde vive cerca de 70% da população total dos países em desenvolvimento e cerca de dois terços da população subnutrida do mundo. É considerado um dos alimentos com melhor balanceamento nutricional (20% de energia e 15% de proteína per capita necessária ao homem). Atualmente, cerca de 90% do arroz do mundo é cultivado e consumido na Ásia (Embrapa, 2007).

A Região Sul do Brasil destaca-se por ser responsável por cerca de 70% da produção deste cereal, onde o sistema de cultivo é irrigado e as regiões de cultivo apresentam clima subtropical, ocupando grandes áreas de várzea (IBGE, 2007). No entanto, cabe ressaltar que, embora tenha uma alta produção, apresenta uma baixa rentabilidade devido aos altos custos de produção e de distorções no mercado, os preços de comercialização do arroz em casca no Rio Grande do Sul, ao longo dos últimos dez anos, apresentaram redução de 24%, ao se compararem as médias anuais de 1994 a 2002 (Azambuja *et al.*, 2004).

O Rio Grande do Sul é o maior produtor brasileiro, sendo conhecido também como estabilizador da safra nacional, responsável por 58% da produção, cerca de seis milhões de toneladas (IBGE, 2007). O comércio da safra de arroz representa cerca de 3,1% do PIB (Produto Interno Bruto) gaúcho, gerando cerca de R\$ 175 milhões em ICMS (Imposto de Circulação de Mercadorias e Serviços), além do grande número de empregos gerados no Estado, direta e indiretamente (Embrapa, 2007).

2.1.1. As condições climáticas para o cultivo de arroz

Apesar dos altos índices de produtividade obtidos nos últimos anos com a cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul, ocorrem em alguns anos, quedas acentuadas causadas, fundamentalmente, pelas condições meteorológicas (Gomes *et al.*, 2004). Por este motivo, as regiões que produzem arroz irrigado no Rio Grande do Sul e Santa Catarina são bem características, principalmente no que diz respeito ao tipo de clima e solo (Gomes *et al.*, 2004).

A ocorrência de baixas temperaturas e a limitação na disponibilidade de radiação solar durante as fases críticas da planta estão intimamente ligados com decréscimos de produtividade, além da chuva e a quantidade de água exigida pela cultura (Steinmetz *et al.*, 2004). Segundo Yoshida (1981), a temperatura ótima para o desenvolvimento do arroz situa-se entre 20°C e 35°C. Em geral a cultura exige temperaturas relativamente elevadas da germinação a maturação, uniformemente crescentes até a floração (antese) e decrescentes, porém sem reduções bruscas após a floração (Steinmetz *et al.*, 2004).

Durante as fases iniciais a temperatura do solo exerce um papel fundamental para o desenvolvimento da cultura, em particular durante a germinação e emergência (Steinmetz *et al.*, 2004). Yoshida (1981) sugere que o período de 14 a 7 dias antes da emissão das panículas ou emborrachamento seja considerado como o mais sensível às baixas temperaturas, seguido da floração. Segundo o autor, para uma mesma temperatura a percentagem de espiguetas estéreis é mais alta na pré-floração do que na floração (Steinmetz *et al.*, 2004).

Nishiyama *et al.* (1969) mostram que a faixa crítica de temperatura para induzir a esterilidade situa-se entre 15°C e 17°C, em genótipos altamente tolerantes ao frio, e de 17°C a 19°C para os de maior sensibilidade (Steinmetz *et al.*, 2004).

Cabe salientar que os genótipos respondem diferentemente em relação a tolerância ao frio, sendo que, em geral, as cultivares do grupo *japônica* são mais tolerantes do que as do grupo *indica*. Entretanto, trabalhos recentes demonstram que algumas cultivares do grupo *indica* são tão ou mais tolerantes às baixas temperaturas durante o emborrachamento do que as cultivares mais tolerantes do grupo *japônica* (Yoshida, 1981).

As altas temperaturas do ar diurnas também podem causar esterilidade às espiguetas (superiores a 35°C), sendo que a fase mais sensível é a floração, seguida da pré-floração, ou seja, cerca de 9 dias antes da emissão das panículas (Steinmetz *et al.*,

2004). Da mesma forma que para baixas temperaturas, há diferenças entre os genótipos quanto à tolerância a temperaturas altas (Yoshida, 2004).

Um dos conceitos mais importantes para caracterizar o desenvolvimento da cultura do arroz é a soma térmica ou graus-dia (GD). Esse conceito expressa a disponibilidade energética do meio e pode ser caracterizado como o acúmulo diário de temperaturas que se situam acima da condição mínima e abaixo da máxima exigida pela planta (Ometto, 1981). Trabalhos como o realizado na região de Pelotas (RS) por Infield *et al* (1998), com cultivares de arroz irrigado de ciclo curto, médio e longo, mostraram que para o período compreendido entre a emergência e a diferenciação do primórdio floral, valor de temperatura base de 11°C nesse período, a soma térmica foi de 536, 638 e 772 graus-dia, respectivamente. A partir daí os autores mostraram que é possível estimar a duração do período vegetativo com erro em torno de 3 dias para as cultivares de ciclo precoce e de 4,5 para as de ciclo médio e longo. Estas informações são de grande utilidade para indicar a época correta de aplicação de nitrogênio em cobertura.

Salienta-se ainda os fenômenos El Niño e La Niña que apresentam uma participação importante na variabilidade das condições meteorológicas, em particular do regime de nebulosidade e de precipitação pluvial, que por consequência afeta os índices de rendimento (Steinmetz *et al.*, 2004). No Rio Grande do Sul, Fontana & Berlato (1997) mostraram que a média de precipitação pluvial mensal durante a ocorrência destes fenômenos (El Niño e La Niña) é distinta conforme a fase do fenômeno. Na fase fria do fenômeno (La Niña), a ocorrência de precipitação pluvial é inferior à média climatológica e muito inferior a precipitação média observada durante a fase quente (El Niño) destes fenômenos, em dois períodos distintos. Os autores mostram que o período de maior intensidade de influência do fenômeno, para ambas as fases, sobre a precipitação pluvial média do Estado, foi de outubro a dezembro, principalmente em outubro e novembro. Em menor intensidade foi observado também no período de abril a junho, principalmente em maio e junho. Os autores destacam que do ponto de vista agrícola, ambos os períodos são muito importantes. Nos meses de outubro, novembro e dezembro, as principais culturas de primavera-verão encontram-se nas fases de estabelecimento e desenvolvimento, desta forma a precipitação pluvial muito abaixo da média climatológica compromete o rendimento final das culturas, do contrário precipitação pluvial ligeiramente acima da média climatológica pode favorecê-las. O segundo período de influência desses fenômenos (abril e maio) coincide com a maturação e colheita das principais culturas de primavera – verão. Nesse período,

precipitação pluvial acima da média prejudica, ao passo que precipitações pluviais abaixo da média climatológica favorece (Fontana & Berlato, 1997).

Steinmetz *et al.* (1999) realizaram trabalhos usando séries longas de dados (1900/1998) na região de Pelotas, com propósito de avaliarem a influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre algumas variáveis climatológicas, dentre elas a precipitação pluvial. Segundo os autores a variável precipitação pluvial foi a que apresentou os desvios mais acentuados em relação à média climatológica, sendo que estes desvios apresentaram-se positivos durante o período de outubro a dezembro, em eventos El Niño, e negativos de outubro a janeiro, em eventos de La Niña. Sendo assim, os autores observaram que a escassez de chuva combinados a temperaturas abaixo da média em outubro e novembro pode afetar a cultura do arroz irrigado na sua fase de implantação. Em geral, em eventos La Niña, as produtividades são maiores, por outro lado em anos de El Niño, em geral as produtividades são menores (Steinmetz *et al.*, 2007).

Mota (1999) em estudo realizado na região de Pelotas (RS) relacionando a influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre a produtividade e necessidade de irrigação em lavouras de arroz, mostrou que: a) os fenômenos El Niño e La Niña influíram negativa e positivamente na produtividade do arroz, respectivamente, por diminuir e aumentar a radiação solar no mês de fevereiro; b) em anos de El Niño a produtividade diminui em 2,4%, em média, em eventos mais fortes esta diminuição chegou a 6,5%, em média; c) em anos de La Niña, a produtividade aumentou 4,1%, em média, sendo que, nos eventos mais fortes este aumento chegou a 9,5%; d) a ocorrência do El Niño diminui a necessidade de irrigação no arroz, no período de dezembro a fevereiro, em média 4,3%, nos eventos mais fortes a diminuição foi de 36,5%, em média; e) a ocorrência do La Niña aumentou a necessidade de irrigação do arroz, de dezembro a fevereiro, em média 9,0%, sendo que, nos eventos mais fortes, o aumento foi de 43,8%, em média (Steinmetz *et al.*, 2007).

Desta forma, pode-se dizer que estes fenômenos influem de forma significativa não só no rendimento como também no momento de implantação da cultura, manejo, dentre outros aspectos.

2.1.2. Zoneamento Agroclimático

Para minimizar a influência de elementos meteorológicos adversos e ao mesmo tempo aproveitar-se das condições favoráveis de tempo e clima foi desenvolvido através de pesquisas o Zoneamento Agroclimático por Épocas de Semeadura, o qual indica para as regiões preferenciais de cultivo, as épocas de semeadura com menores riscos climáticos (Steinmetz *et al.*, 2004). Este zoneamento tem sido muito utilizado como instrumento de Política Agrícola do Governo Federal e como suporte a tomada de decisões no âmbito do Programa de Garantia da Atividade Agropecuária – Proagro. A cada ano, no período que antecede ao início da safra do arroz e das demais culturas incluídas no zoneamento agrícola, são publicadas no diário oficial da união, as portarias contendo uma série de informações como: zoneamento agrícola, épocas recomendadas de semeadura ao nível municipal e tipos de solos aptos para plantio. Estas informações são amplamente divulgadas através de publicações e via internet, às associações de produtores, entidades de assistência técnica e extensão rural, agentes financeiros, cooperativas, secretarias de agriculturas, entidades públicas e privadas, de modo que este instrumento de avanço tecnológico possa ser adotado e em curto prazo, trazer benefícios diretos aos agricultores que dele se utilizam (Gomes *et al.*, 2004).

Os critérios adotados para definir o período mais favorável de semeadura são os seguintes:

- Temperatura do solo desnudo, a 5cm de profundidade, maior ou igual a 20°C para não retardar demasiadamente os processos de germinação e emergência das plântulas;
- Menores probabilidades de ocorrência de temperaturas mínimas do ar iguais ou inferiores a 15°C, nos períodos de pré-floração e floração, ou seja, de 15 dias antes a 5 dias após o início da floração;
- Maior disponibilidade de radiação solar na fase reprodutiva, ou seja, de 21 dias antes a 21 dias após o início da floração;
- Dados fenológicos e de produtividade da cultura, baseados em experimentos de campo. O comprimento do ciclo das cultivares indicado nas recomendações técnicas para o Sul do Brasil foi de 106 a 120 dias

para cultivares de ciclo precoce e 121 a 135 dias para cultivares de ciclo médio;

- Regiões e sub-regiões agroecológicas e malha municipal do Rio Grande do Sul.

Com base nessas informações a época de semeadura recomendada para cultivares de ciclos médio e precoce varia em função das regiões e sub-regiões do Estado e da duração do ciclo da cultivar, desde a germinação até a colheita, e pode variar de 115 até 160 dias (*Steinmetz et al.*, 2004).

- **CULTIVARES DE CICLO MÉDIO:**

Para estas cultivares o período de semeadura pode estender-se de 21/09 a 20/11 nas regiões mais quentes (Fronteira Oeste e Alto Vale do Uruguai) e de 21/10 a 20/11 nas regiões mais frias (Serra do Nordeste e Planalto Superior).

- **CULTIVARES DE CICLO PRECOCE:**

O período de semeadura para estas cultivares varia de 11/10 a 10/12 (Fronteira Oeste e Alto Vale do Uruguai) e de 1/11 a 30/11 (Serra do Nordeste e Planalto Superior).

- **CULTIVARES DE CICLO MUITO PRECOCE E TARDIO:**

Como as áreas do Rio Grande do Sul cultivadas com variedades com este tipo de ciclo é muito pequena, a recomendação geral de semeadura é baseada nas recomendações das cultivares de ciclo precoce, levando-se em conta que o início e o término da semeadura podem ser retardados em cerca de 10 dias. Para as cultivares de ciclo tardio, que são semeadas principalmente na região Norte do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, recomenda-se utilizar o mesmo período das cultivares de ciclo médio, porém o início e o término da semeadura deve ser antecipada em cerca de 10 dias.

2.1.3. Sistemas de cultivo e tratos culturais da cultura do arroz

Com relação aos sistemas de cultivo de arroz irrigado os mais conhecidos são: sistema convencional, convencional em linha, plantio direto e sistema de cultivo pré-germinado (*Gomes et al.*, 2004). Estes sistemas são caracterizados principalmente pela maneira do preparo do solo.

O sistema convencional é caracterizado pelo preparo de solo por meio de aração e gradagem. A semeadura é feita a lança sobre o terreno descoberto e as sementes são

enterradas em seguida com implemento agrícola. Neste sistema, a emergência das plântulas não é muito uniforme em razão da variação na profundidade das sementes.

O sistema convencional com linhas difere do primeiro por empregar implemento agrícola para a semeadura em linha. Com isso, apresenta maior rapidez e uniformidade de emergência das plântulas.

No sistema de produção direto a semeadura é executada em linha e sobre o solo vegetado, com prévia aplicação de herbicida de ação total, que visa dessecar a vegetação nativa presente.

Finalmente, o sistema de produção pré-germinado consiste na semeadura a lanço, com sementes em processo de germinação induzida, sobre o terreno inundado, cuja lâmina d'água é removida e restabelecida por algumas vezes até o pleno estabelecimento da cultura, cerca de 20 a 25 dias após a semeadura.

O sistema convencional ou tradicional é utilizado em cerca de 50% da área cultivada no Rio Grande do Sul, e cerca de 5% do cultivo em Santa Catarina (Gomes *et al.*, 2004). O sistema pré germinado é adotado na Europa, em 90% da área, nos EUA, em 30% e no Brasil, em 20% da área cultivada com arroz irrigado. Destaca-se o Estado de Santa Catarina com 98% e Rio Grande do Sul com 11% do total da área de cultivo com arroz irrigado, com o referido sistema (Azambuja *et al.*, 2004)

2.2. Sensor MODIS

2.2.1. Histórico e descrição do Programa EOS

Segundo revisão feita por Soares *et al.* (2007), foi a partir da convenção em Estocolmo em 1972, que a humanidade tomou consciência de que o homem é capaz de provocar alterações na Terra que podem mudar o clima e provocar grandes alterações sócio-econômicas e ambientais. Isto estimulou a criação de um programa internacional denominado EOS (*Earth Observing System*), liderado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) para o estudo dos processos de mudanças globais (Soares *et al.*, 2007). A definição dos sensores se deu a partir dos requisitos de cientistas das áreas de ciências da Terra de forma a fornecer dados com adequada repetitividade, permitindo a observação de fenômenos dinâmicos e, portanto, com capacidade de gerar conhecimentos sobre os processos de mudanças globais (Soares *et al.*, 2007). A primeira plataforma deste programa foi a plataforma Terra, lançada em 18 de dezembro de 1999, sendo que os dados começaram a ser coletados a partir de 2000.

A passagem no Equador ocorre no período da manhã, aproximadamente as 10 h 30 min, por este motivo inicialmente a plataforma era conhecida como EOS-AM (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>, 2007).

Os objetivos de pesquisa contemplados na plataforma Terra incluem o estudo de nuvens, aerossóis, balanço de radiação, ciclo do carbono, entre outros. As características dessa plataforma são: órbita quase polar com inclinação de 98,2° e heliossíncrona, com passagem pelo Equador às 10 h 30 min na sua órbita descendente; órbita de altitude média de 707,8 km (altitude variável de 700 a 737 km); período orbital de 98,88 minutos; repetitividade de 16 dias no Equador. Os sensores a bordo da plataforma Terra são: CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), **MODIS** (*Moderate resolution Imaging Spectroradiometer*) e MISR (*Multi-angle Imaging Spectro Radiometer*) da NASA; ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) do Japão; e MOPITT (*Measurement of Pollution in the Troposphere*) do Canadá (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>, 2007).

A segunda plataforma deste programa foi lançada no dia 4 de maio de 2002, recebendo o nome de Aqua. Nesta, o objetivo principal foi de complementar as observações da plataforma Terra em diferentes condições de atmosfera e iluminação. A plataforma Aqua tem a bordo seis instrumentos: AIRS (*Atmospheric InfraRed Sounder*); AMSU-A (*Advanced Microwave Sounding Unit-A*); HSB (*Humidity Sounder for Brazil*); AMSR-E (*Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS*); **MODIS**; e CERES. As características da plataforma Aqua são: órbita quase polar com inclinação de 98° e heliossíncrona; passagem pelo Equador às 13 h 30 min da tarde, na sua trajetória ascendente; altitude de 705 km com um período orbital de 99 minutos; período de revisita de 2 dias (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>, 2007). Cabe ressaltar que o sensor **MODIS** está presente em ambas as plataformas, a diferença existente é com relação ao seu horário de passagem no Equador na plataforma Terra ocorre no período da manhã e na plataforma Aqua seu horário de passagem ocorre durante a tarde.

2.2.2. Características e especificações do sensor MODIS

O sensor MODIS é o principal instrumento presente nas plataformas Terra/Aqua, abrange as regiões do visível e do infravermelho do espectro eletromagnético, cobrindo a Terra a cada 2 dias.

O sensor MODIS possui sensibilidade radiométrica (12 bits) em 36 bandas espectrais contidas no intervalo de 0,4 a 14,4 μm do espectro eletromagnético. Duas bandas são adquiridas na resolução de 250 m outras cinco bandas na resolução de 500 m e as demais 29 bandas em 1 km. A varredura de 55° para cada lado na órbita de 705 km de altura resulta numa faixa imageada de 2.330 km, com cobertura global em 2 dias. As primeiras 19 bandas estão posicionadas na região do espectro eletromagnético situada entre 405 nm a 2155 nm, a disposição das bandas se dá da seguinte forma: bandas 1 – 7 direcionadas para a aplicação terrestre, 8 – 16 para as observações oceânicas e 17 – 19 para as medições atmosféricas. As bandas 20 – 36, com exceção da banda 26 (1360 a 1390 nm), correspondem a porção termal do espectro eletromagnético (3660 nm a 14385nm) (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>, 2007).

As bandas do sensor MODIS, segundo Soares *et al.*, (2007) foram desenvolvidas para o monitoramento da superfície terrestre, possuindo uma herança do Landsat Thematic Mapper e AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo dos satélites da série NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), com capacidades melhoradas tanto nos menores comprimentos de onda quanto no infravermelho (Justice *et al.*, 1998). Segundo Strahler *et al.* (1996), o sensor MODIS possui bandas espectrais finas, específicas para as necessidades da comunidade científica, que desenvolvem pesquisas nas áreas continentais do planeta .

As bandas para o estudo da superfície terrestre possuem resolução espacial de 250 m (vermelho e infravermelho próximo) e 500 m (para o azul, verde e infravermelho médio) que são os valores nominais para pixels no nadir. No limite da largura da área imageada (que corresponde a 2.330 km), os pixels crescem com um fator de duas vezes na direção ao longo da linha de imageamento e de um fator de cinco vezes na direção através da linha de imageamento. Com relação a resolução temporal, o MODIS apresenta um intervalo quase diário para a revisita de uma área, o que lhe confere uma grande capacidade para estudos de dinâmicas ecológicas, tanto terrestres quanto oceânicas (Soares *et al.*, 2007).

A geolocalização/georreferenciamento do sensor MODIS foi estabelecida através do uso de uma técnica paramétrica, onde pontos de controle foram aplicados somente para remover as direções tendenciosas. Sua orientação em relação a Terra é obtida através de sensores a bordo do satélite. Os produtos de georreferenciamento do sensor MODIS definem as coordenadas geodésicas, elevação do solo (altitude), e ângulos zenitais solar e azimutal para cada amostra de 1km do MODIS (Soares *et al.*,

2007). A distância da Terra é medida por um giro inercial e por um sensor *star-tracking*, onde a posição é medida por um TDRSS (*Tracking Data Relay Satellite System*) a bordo de um sistema de navegação (TONS) (Telles *et al.*, 1995). Esses dados são fornecidos como parte do banco de dados das radiâncias calibradas no nível 1B e os dados do nível 2, para permitir um processamento posterior. Estes dados serão, portanto, subsequentemente usados para reamostrar espacialmente e compor temporariamente os produtos MODIS em grades georreferenciadas (Soares *et al.*, 2007).

2.2.3. Níveis de dados MODIS

Os dados adquiridos pelos sensores a bordo da plataforma Terra são armazenados e transmitidos para a estação terrestre localizada em White Sands, Estado do Novo México – EUA, usando o TDRSS (*Tracking Data Relay Satellite System*). No centro de pesquisa terrestre começam os processamentos propriamente ditos, sendo divididos em cinco níveis (0-4), onde esta variação depende do grau de processamento (Soares *et al.*, 2007). A partir do processamento do nível 0 pelo sistema operacional, o centro de arquivos irá produzir os níveis 1A e 1B e os produtos de geolocalização.

- Nível 0: dados brutos sem qualquer tratamento não estando disponíveis ao usuário;
- Nível 1A: produtos contendo as 36 bandas utilizadas como dado de entrada para geolocalização, calibração e processamento; sendo adicionados indicadores de qualidade aos dados para indicar alguma perda ou *pixel* de baixa qualidade. As medidas no visível (VIS), infravermelho próximo(IVP) e infravermelho médio (IVM), são feitas apenas durante o dia, enquanto as medidas no infravermelho termal (IVT) são feitas também a noite;
- Nível 1B: contém os dados de calibração e geolocalização para as 36 bandas, geradas pelo nível 1A.
- Nível 2: são os produtos derivados de radiâncias calibradas de produtos prévios MODIS e são conhecidos como níveis 2G (L2G); são gerados a partir de um conjunto de dados de um único dia do nível 2, reorganizados e armazenados em uma grade de referência (*earth-based grid*), preservando os dados originais do nível 2. A menor quantidade de dados processados em um determinado período é definida nos níveis 1 e 2 como *granule* e correspondem a aproximadamente 5

minutos de imageamento. Sendo assim, o MODIS registra 288 *granules* a cada 24 horas ;

- Nível 3: são os produtos espacialmente reamostrados e compostos para um determinado tempo para produzir uma estimativa das variáveis geofísicas para cada grade de localização, sendo que as escalas de tempo dos produtos gerados deste nível, podem variar de um dia até um ano;
- Nível 4: são os produtos gerados pela incorporação dos dados MODIS em modelos para estimar variáveis geofísicas; a menor unidade de processamento referente aos níveis 2G, 3 e 4 é definida como um *tile* , o qual corresponde a uma área geocodificada de 1200 km x 1200 km.

2.2.4. Produtos gerados pelos dados do sensor MODIS

Devido as características das bandas do sensor MODIS, tornou-se possível o desenvolvimento inicial de 44 produtos padrões, os quais estão sendo utilizados por pesquisadores de várias disciplinas, incluindo Oceanografia, Biologia, Ciência da atmosfera, etc., para o estudo de mudanças globais (Soares *et al.*, 2007). Estes produtos são disponibilizados conforme a categoria de aplicação, como:

- Calibração: i) MOD01 (valor de radiância do nível 1A); ii) MOD02 (valores de radiância calibrada e georreferenciamento nível 1B); iii) MOD03 (conjunto de dados de georreferenciamento).
- Atmosfera: i) MOD04 (produto de aerossol); ii) MOD05 (total de água precipitável); iii) MOD06 (produto de nuvem); iv) MOD07 (perfil atmosférico); vi) MOD08 (grades de produtos atmosféricos); vii) MOD35 (máscara de nuvem).
- Continente: i) MOD09 (reflectância de superfície); ii) MOD11 (temperatura de superfície e emissividade); iii) MOD12 (cobertura da Terra/mudança da cobertura da Terra); iv) MOD13 (grades de índices de vegetação – máximo NDVI e EVI integrado); v) MOD14 (anomalias termais, fogo e queima de biomassa); vi) MOD15 (índice de área foliar e fração de radiação fotossinteticamente ativa); vii) MOD16 (evapotranspiração); viii) MOD17

(fotossíntese líquida e produtividade primária); ix) MOD43 (BRDF/albedo – função de distribuição da refletância bidirecional/albedo); x) e MOD44 (mudanças de cobertura vegetal).

- Criosfera: i) MOD10 (extensão da cobertura de neve); ii) MOD29 (extensão de gelo na superfície do mar).
- Oceano: i) MOD18 (radiância normalizada proveniente de corpos d'água); ii) MOD19 (concentração de pigmentos); iii) MOD20 (fluorescência da clorofila); iv) MOD21 (concentração de pigmento de clorofila a); v) MOD22 (PAR/radiação fotossinteticamente ativa); vi) MOD23 (concentração de partículas sólidas); vii) MOD24 (concentração de matéria orgânica); viii) MOD25 (concentração de plâncton calcáreo); ix) MOD26 (coeficiente de atenuação da água do mar); x) MOD27 (produtividade primária do oceano); xi) MOD28 (TSM – temperatura de superfície do mar); xii) MOD31 (concentração de pigmentos de algas vermelhas); xiii) MOD36 (coeficiente de absorção total); xiv) MOD37 (propriedades de aerossol oceânico); xv) MOD39 (grau de pureza de águas claras).

Todos estes produtos são disponibilizados em formato HDF, o qual permite uma implantação transparente de acesso aos dados, sendo também disponibilizados de forma gratuita aos seus usuários. São fornecidos também o ATBD (*Algorithm Theoretical Basis Document*) de cada produto, que vem a ser um manual que fornece todos os dados sobre os algoritmos utilizados para a geração dos mesmos (Soares *et al.*, 2007).

2.2.5. Produto MOD 13

Este produto está relacionado à vegetação, nele são encontrados os índices de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*), sendo produzidos globalmente com resolução de 1 km, 500 m e 250 m, em composições de imagens ou mosaicos de 16 dias (Latorre *et al.*, 2007). São incluídas para a geração destes índices as bandas do azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio. Os índices de vegetação do produto MOD13 permitem realizar estudos tanto ao longo do tempo quanto no espaço, sobre as condições da

cobertura vegetal, em escalas global e regional. As características deste produto segundo Latorre *et al.*, (2007) são:

- Gerar índices de vegetação por meio de mosaicos de imagens para minimizar ou mesmo eliminar a presença de nuvens;
- Obter os índices na melhor resolução espacial possível;
- Padronizar a geometria de aquisição e iluminação das imagens;
- Assegurar a qualidade e a consistência dos dados;
- Descrever e reconstituir dados de variações fenológicas;
- Discriminar com precisão variações interanuais na vegetação;
- Gerar mosaicos de imagens compostas em períodos de 1 e 30 dias.

Os mosaicos gerados apresentam como características principais além da reamostragem: i) mínimo de nuvens e correção atmosférica; ii) resoluções espaciais para os mosaicos de 16 dias de 250 m, 500 m, 1 km e 25 km (Latorre *et al.*, 2007).

2.2.6. Índice de vegetação por diferença normalizada - NDVI (do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*)

Os índices de vegetação foram criados para tentar diminuir o trabalho de análise de dados orbitais, por meio da maximização de informações espectrais da vegetação no menor número de bandas de operação dos sensores. O objetivo é ressaltar o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e a outros alvos da superfície terrestre (Moreira, 2005).

Segundo alguns pesquisadores, o emprego de índices de vegetação para caracterizar e quantificar determinado parâmetro biofísico de cultivos agrícolas apresenta duas grandes vantagens: i) permite reduzir a dimensão das informações multiespectrais, por meio de um simples número, além de minimizar o impacto das condições de iluminação e visada; ii) fornece um número altamente correlacionado aos parâmetros agronômicos.

Moreira (2005) comenta que o estudo do comportamento espectral de alvos agrícolas, através da razão entre bandas espectrais, é mais indicado do que o emprego separado de dados espectrais em cada banda do sensor, pois controla os erros

introduzidos nas estimativas da radiância pela resposta lambertiana dos alvos agrícolas. Os índices de vegetação 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 (Moreira *et al.*, 2005).

O NDVI é uma relação entre as reflectâncias das bandas do infravermelho próximo e do vermelho, e visa eliminar diferenças sazonais do ângulo de elevação solar e minimizar os efeitos da atenuação atmosféricas em imagens multitemporais (Latorre *et al.*, 2007), seus valores variam de -1 a +1. Este é o índice mais utilizado nos diversos estudos de vegetação, que envolvem o uso dos dados de sensoriamento remoto (Moreira, 2000), sendo obtido a partir da equação (1):

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{V}}) / (\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{V}}) \quad (1)$$

Onde: ρ_{IVP} = reflectância no infravermelho próximo

ρ_{V} = reflectância no vermelho

Para alvos terrestres o limite inferior torna-se aproximadamente zero (0) e o limite superior aproximadamente 0,80. Uma peculiaridade atribuída ao NDVI é a rápida saturação, o que o torna insensível ao aumento da biomassa vegetal a partir de um determinado estágio de desenvolvimento. Entretanto, estudos de monitoramento da vegetação utilizando este índice têm apresentado bons resultados, conforme pode ser verificado em muitos trabalhos que utilizaram este índice (Latorre *et al.*, 2007).

Especificamente no Estado do Rio Grande do Sul, salienta-se os trabalhos realizados com o NDVI no contexto do monitoramento e previsão de safras. Nestes, o foco principal tem sido a criação de máscaras de cultivo para fins de monitoramento das condições da biomassa ao longo do ciclo de desenvolvimento das principais culturas e também a modelagem agrometeorológica-espectral de estimativa do rendimento (Rizzi & Rudorff, 2005; Rudorff *et al.*, 2007; D'Arco *et al.*, 2005; Rizzi *et al.*, 2007; Almeida *et al.*, 2007; Kreling., 2007; Junges *et al.*, 2009).

2.3. Modelo Linear de Mistura Espectral

Em imagens de sensoriamento remoto, é comum encontrarmos problemas de mistura espectral, geralmente causados pelo tamanho do pixel, que pode incluir mais de um tipo de cobertura do terreno. Quando sensores observam a superfície da Terra, a

medida da radiância de cada *pixel* é a integração da radiância de todos os objetos contidos dentro do mesmo. Por este motivo podem surgir os problemas de mistura espectral (Aguiar *et al.*, 1999). O entendimento disto está associado ao conceito de *pixel*, que é a representação numérica quantificada dos valores de radiância correspondentes a cada pequena área unitária no terreno.

É importante considerar, portanto, que dependendo do sistema sensor e da altitude da plataforma que o sustenta, o tamanho do pixel varia, ou seja, a resolução espacial do sensor varia (Ponzoni & Shimabukuro, 2007). Assim, a radiância registrada pelo sensor depende basicamente de:

- i) Características específicas de cada sensor;
- ii) Propriedades físico-químicas dos objetos contidos dentro do *pixel*;
- iii) Interferência atmosférica.

Sendo assim, o que é detectado pelo sensor não será representativo de qualquer um dos materiais que compõem um pixel, a menos que dentro dele esteja presente exclusivamente um único objeto (Ponzoni & Shimabukuro, 2007).

Para resolver questões de mistura espectral, foi desenvolvido o Modelo Linear de Mistura Espectral, que visa estimar a proporção dos componentes como solo, vegetação e água/sombra, para cada *pixel*, a partir da resposta espectral nas diversas bandas, gerando imagens fração de solo, vegetação e água/sombra (Shimabukuro & Smith, 1991). Estas imagens fração são imagens obtidas a partir das imagens originais das quais são selecionados “*pixels* puros” que trarão novas informações obtidas a partir das informações espectrais originais. São denominados “*pixel-puro*”, aqueles cuja resposta espectral está de acordo com a assinatura espectral do alvo em questão. As imagens fração podem ser consideradas como uma forma de redução da dimensionalidade dos dados e também como uma forma de realce das informações. Para a geração das imagens fração, as respostas espectrais das componentes (*endmembers*) são consideradas conhecidas, ou seja, podem ser obtidas de bibliotecas espectrais disponíveis (Ponzoni & Shimabukuro, 2007).

O modelo decompõe a reflectância contida em um determinado *pixel*, em três componentes referentes a vegetação, solo, água/sombra. O modelo linear de mistura espectral pode ser escrito como:

$$r_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + e_1$$

$$r_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + e_2$$

...

$$r_1 = a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + e_m \quad (2)$$

Portanto:

$$r_{i=1}^n = \sum (a_{ij}x_j) + e$$

Sendo que $i=1, \dots, m$ (número de bandas) e $j=1, \dots, n$ (número de componentes) e $n \leq m$

onde:

r_i = corresponde a reflectância espectral na $i^{\text{ésima}}$ banda espectral de um pixel (i.e., valor do pixel na banda i , convertido para o valor de reflectância).

a_{ij} = corresponde reflectância espectral conhecida do $j^{\text{ésimo}}$ componente na $i^{\text{ésima}}$ banda espectral.

x_j = valor a ser estimado de proporção do $j^{\text{ésimo}}$ componente dentro do pixel;

e_i = corresponde ao erro de estimação para a $i^{\text{ésima}}$ banda espectral;

Trabalhos como o de Mello *et al.*, (2003), mostraram a viabilidade de realizar o mapeamento dos desflorestamentos da Amazônia Legal, utilizando técnicas de segmentação e classificação da imagem fração (imagem sintética), resultante do modelo de mistura espectral. Os autores concluíram que o pré-processamento das bandas originais, com a consequente obtenção da imagem sombra, reduziu de modo significativo o tempo de processamento digital gasto no mapeamento de polígonos, quando comparado com o uso das imagens Landsat-TM originais. Isto representa um avanço no que se refere ao uso de técnicas de processamento digital para o mapeamento e estimativa de áreas desflorestadas, especialmente em áreas muito complexas encontradas, principalmente no Estado de Rondônia.

Também em áreas agrícolas esta técnica tem sido utilizada. Moreira *et al.*, (1998) testaram o uso do modelo linear de mistura espectral para identificar e mapear áreas de soja e milho em quatro municípios do Estado de Minas Gerais. Para decompor a radiância do *pixel* nas três componentes vegetação, solo e sombra, os autores empregaram o método dos mínimos quadrados. Neste caso são estimadas as proporções de cada uma das componentes pela minimização da soma dos quadrados dos erros, sendo que a proporção de cada uma delas não deve ser negativa e a soma deve ser igual a 1 (unidade). Os autores concluíram que o emprego do modelo linear de mistura espectral proporcionou um resultado de classificação supervisionada mais eficiente

quando comparado aos resultados da mesma classificação nos dados originais do Landsat-TM. Com relação a eficiência do modelo linear de mistura espectral, os resultados obtidos foram melhores nas estimativas de áreas de soja quando comprados com as áreas de milho. No caso da soja a diferença relativa passou de 7,6% (dados originais) para 3,8% (modelo de mistura espectral), enquanto que para lavouras de milho, o ganho na precisão para estimativas de área foi de apenas 0,7%, quando se aplicou o modelo de mistura espectral, passando de 26,2% (dados originais) para 25,5% (modelo de mistura espectral).

Anderson (2004) utilizou dados multitemporais do sensor MODIS para a classificação e monitoramento da cobertura vegetal do Estado do Mato Grosso. Dentre os principais aspectos da metodologia, destacou-se a aplicação do modelo linear de mistura espectral para avaliar e monitorar as mudanças ocorridas nessa região.

Em imagens de sensores com baixa e média resolução espacial, os problemas de mistura espectral são ainda mais frequentes devido ao tamanho da área imageada, tornando difícil, até mesmo, a identificação de um “*pixel-puro*”. Entretanto, os trabalhos citados, encorajaram a análise do uso das bandas do modelo linear de mistura espectral aplicado a imagens MODIS para o mapeamento da área de arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul.

2.4. Sensor TM - Programa Landsat

2.4.1. Características do sensor TM

Os dados deste sensor são recebidos no Brasil desde 1973, através do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que é responsável por toda a infra-estrutura desde a recepção dos dados até a sua distribuição. Para o Brasil, o programa da série Landsat, teve fundamental importância porque possibilitou consolidar e capacitar uma ampla comunidade de usuários. O programa foi constituído por uma série de sete satélites desenvolvidos e lançados pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) a intervalos de 3 a 4 anos (Novo, 2008).

O sistema TM (*Thematic Mapper*), assim como o MSS (*Multispectral Scanner Subsystem*), esteve presente na carga útil dos satélites Landsat 4, 5, 6 e 7. Não operou no Landsat 6 em virtude da destruição do satélite durante o lançamento. Os satélites Landsat 1, 2 e 3 apresentavam apenas o sistema MSS (*Multispectral Scanner Subsystem*) (Moreira, 2005).

Embora os satélites da série Landsat tenham sido concebidos para terem uma vida média útil de 2 anos, eles se mantiveram em operação durante muito mais tempo, como é o caso do Landsat 5, lançado em 1984, se mantendo ativo (Novo, 2008).

O programa Landsat teve por objetivo proporcionar a aquisição repetitiva de dados multiespectrais calibrados, com resolução espacial relativamente alta se comparada à dos satélites com aplicações meteorológicas e oceanográficas, de modo global, para garantir comparações do estado da superfície terrestre ao longo do tempo. Sendo assim, os dados obtidos por esta série de satélites apresentam o mais longo e completo registro das superfícies continentais do planeta Terra a partir do espaço, o que é de grande valor para os estudos sobre mudanças globais do planeta (Novo, 2008).

O sensor TM (*Thematic Mapper*) operou em sete bandas espectrais, sendo três na região do visível, três na região do infravermelho refletido e uma na região termal. A resolução espacial na região do visível e infravermelho refletido era de 30m x 30m e a do sensor da região do termal eram de 120m x 120m. A largura da faixa imageada era de 185 km (Moreira, 2005). Este sensor apresenta, em cada banda espectral da região do visível e do infravermelho refletido, sistema composto por 16 detectores. A radiância era quantizada em 256 números digitais ou níveis de cinza com uma resolução temporal de 16 dias (Moreira, 2005).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo

A área de estudo compreende a região orizícola do Estado do Rio Grande do Sul, compreendida pelas regiões administrativas definidas pelo Instituto Riograndense do Arroz - IRGA: (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 (Figura 1).

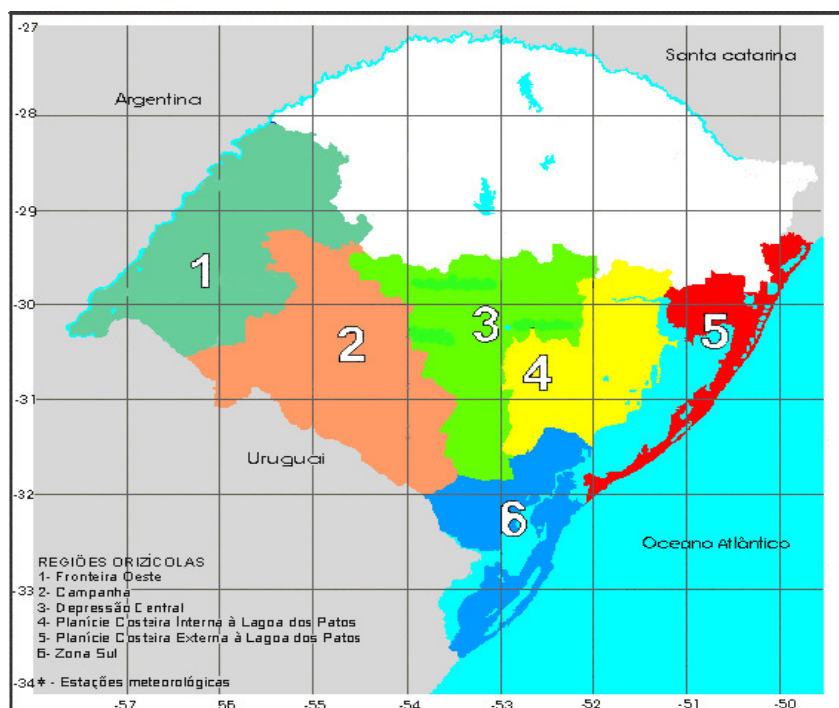


Figura 1: Área de estudo: regiões orizícolas no Estado do Rio Grande do Sul

(Fonte: IRGA, 2007).

As características de solo, relevo e clima destas regiões são apropriados para o desenvolvimento desta cultura, o que faz com que os índices de produtividade de arroz irrigado no Rio Grande do Sul estejam entre os mais altos do Brasil (Steinmetz *et al.*, 2004). Apesar disso, ocorrem reduções acentuadas na produtividade em alguns anos, devido principalmente, às condições meteorológicas.

O clima da região é característico das regiões subtropicais, classificado segundo Köppen (Moreno, 1961) na zona fundamental temperada “C”, tipo úmido “Cf”, variedade “Cfa”.

Com relação ao relevo, varia de plano a suavemente ondulado, sendo encontrados nas Regiões das Planícies Costeiras Interna e Externa e no Litoral Sul, junto a Lagoa dos Patos e Mirim, e nas planícies dos rios da Depressão Central, da Campanha e da Fronteira Oeste, em geral em altitudes entre 0 e 200m (Terres *et al.*, 1999).

Segundo Gomes e Magalhães Junior (2004), dentro da Região Orizícola, os solos próprios para o cultivo de arroz irrigado são os solos de várzea formados por planícies de rios, lagoas e lagunas, apresentando uma característica comum: formação em condições variadas de deficiência de drenagem (hidromorfismo). O hidromorfismo, principal característica desses solos, é normalmente motivado pelo relevo predominantemente plano, geralmente associado a um perfil com camada superficial pouco profunda e subsuperficial mais impermeável. Característica esta identificada em sua intensidade máxima por sua cor cinzenta ou gleizada, e numa intensidade menos acentuada, por manchas avermelhadas ou amareladas (mosquados) em uma cor de fundo cinzento. Na paisagem, esse caráter manifesta-se de forma menos acentuada nos solos situados em patamares mais elevados, podendo estar ausente no caso de solos arenosos. No Rio Grande do Sul os solos de várzea, situados a região oeste, mais especificamente na região da Depressão Central, Campanha e Fronteira Oeste, desenvolveram-se a partir de rochas sedimentares sílticas ou argilosas (siltitos, folhelhos e argilitos) das formações geológicas sedimentares da Bacia do Paraná, ou então de sedimentos de basaltos. Os solos encontrados a leste do Estado, ou planície costeira Interna e Externa e Litoral Sul, são solos que desenvolveram-se a partir de sedimentos lagunares e lacustres do Holoceno e de sedimentos das formações Chuí e Graxaim, do Pleistoceno (Pinto *et al.* 2004). A localização destes solos de várzea podem ser observados na Figura 2.

Os solos de várzea, em função da heterogeneidade do material de origem e dos diferentes graus de hidromorfismo, apresentam grande variação nas características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas, determinando assim seu agrupamento em diferentes classes, com diferentes limitações e aptidões de uso, sendo, conforme o tipo de solo, não adequados ao cultivo com arroz irrigado (Pinto *et al.* 2004).

De acordo com o novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999), as principais classes em que estão incluídos os solos de várzea são: Planossolos (antigos Planossolos, além de Solonetz Solodizado e parte dos Hidromórficos Cinzentos), Gleissolos (antigos Gleis Húmico e Pouco Húmico e parte dos Hidromórficos Cinzentos e Solonchaks), Chernossolos Ebânicos e Chernossolos

Argilúvicos (antigos Brunizém Hidromórficos), Plintossolos, Vertissolos, Neossolos Flúvicos e Neossolos Quartzarênicos Hidromórficos (antigos Solos Aluviais e Areias Quartzosas Hidromórficas respectivamente), Organossolos (antigos Solos Orgânicos) e Espodossolos (antigos Podzóis). Nos patamares mais elevados podem ocorrer solos não-hidromórficos de drenagem imperfeita/moderada até boa, incluídas nas classes Argissolos, Alissolos e Luvisolos, desmembradas dos antigos Podzólicos, além de Chernossolos Háplicos (Brunizéns), Cambissolos e Neossolos Quartzarênicos Órticos (Areias Quartzosas) (Pinto *et al.* 2004).

No Rio Grande do Sul os solos pertencentes às classes citadas representam cerca de 20% da área total do Estado, sendo encontrados na região das Planícies Costeiras Interna e Externa e no Litoral Sul, principalmente junto às Lagoas dos Patos e Mirim, nas Planícies dos rios da Depressão Central, como os rios dos Sinos, Taquari, Caí e Jacuí, e na região da Campanha e Fronteira Oeste, ao longo dos rios Ibicuí, Santamaría, Quarai e outros menores. A classe dos Planossolos (incluídos Gleissolos associados) é a que apresenta a maior área (56,0%), seguindo-se em ordem decrescente, as classes dos Chernossolos (16,1%), Neossolos (11,6%), Plintossolos (incluídos Luvisolos e Argissolos) (8,3%), Gleissolos (7,1%) e Vertissolos (0,9%) (Pinto *et al.* 2004).



Figura 2: Localização dos solos de várzea no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina (Fonte: adaptado de IBGE, 1986, e Santa Catarina 1986).

3.2. Período de estudo

O período de estudo correspondeu ao ciclo da cultura do arroz irrigado no Estado, durante o ano agrícola 2005/2006.

O período de implantação da cultura no Estado é bem definido, dada a obrigatoriedade de observação das recomendações por parte dos agricultores para obtenção de financiamento e seguro safra. Para o Rio Grande do Sul, o zoneamento agroclimático (Figura 3) elaborado para a cultura do arroz irrigado (Steinmentz, 2004) estabelece 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.

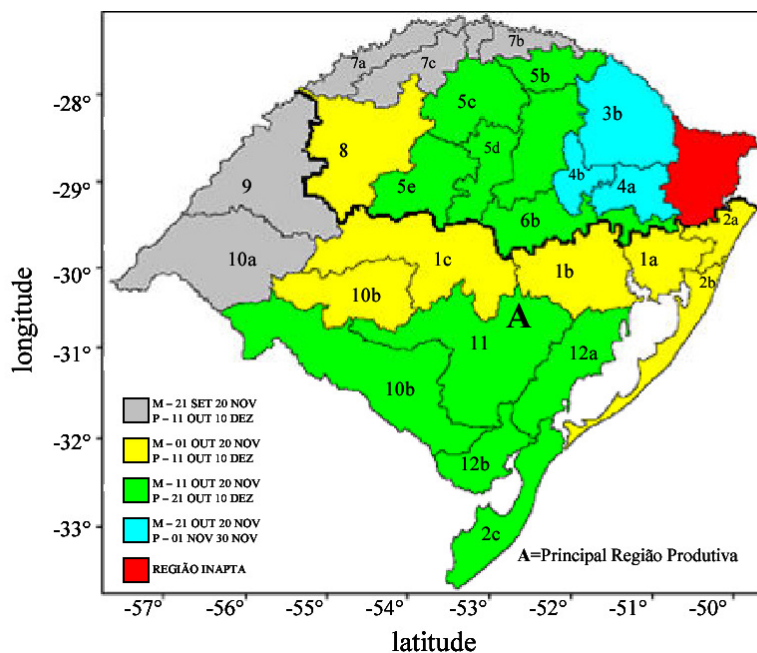


Figura 3: Zoneamento Agroclimático por época de semeadura para o arroz irrigado, cultivares de ciclo médio (M) e precoce (P), no Estado do Rio Grande do Sul. Os números e as letras indicam as regiões e sub-regiões agroecológicas. A área definida pela letra A abaixo da linha preta em negrito corresponde às regiões orizícolas. Fonte: Adaptado de Steinmetz e Braga (2001).

A classificação das variedades como precoce, média e tardia é função da duração de ciclo da cultura, desde a germinação até a colheita, e varia de 115 a 160 dias (Magalhães Júnior *et al.*, 2004). O calendário agrícola do arroz foi usado para a identificação dos períodos mais adequados de aquisição das imagens, quando as áreas orizícolas se apresentam bem definidas em termos da resposta espectral e também se destacam dos demais alvos da cena, conforme proposto por Rudorff *et al.*, (2007).

3.3. Imagens MODIS

3.3.1. Produto MOD13

Foram utilizadas imagens do sensor MODIS, produto MOD13 (MODIS/*Terra Vegetation Indices 16-Day*), disponibilizadas na forma de mosaicos a cada 16 dias, com resolução espacial de 250 m. Este produto inclui as imagens de índice de vegetação (NDVI e EVI) e as imagens de reflectância de superfície das bandas do azul (B), vermelho (R), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (MIR) (NASA,

2007). Para realização deste trabalho foram utilizados 12 conjuntos de imagens MODIS, abrangendo o período de novembro/2005 a abril/2006.

Os produtos MODIS de ecossistema terrestre (MODLAND) estão disponíveis na projeção sinusoidal (SIN) e são divididos em quadrantes (*tiles*) de 10 x 10 graus (1200 x 1200 km). A Figura 4 mostra o sistema de distribuição, com destaque para os *tiles* h13 v11 e h13 v12 utilizados para compor o mosaico do Estado do Rio Grande do Sul.

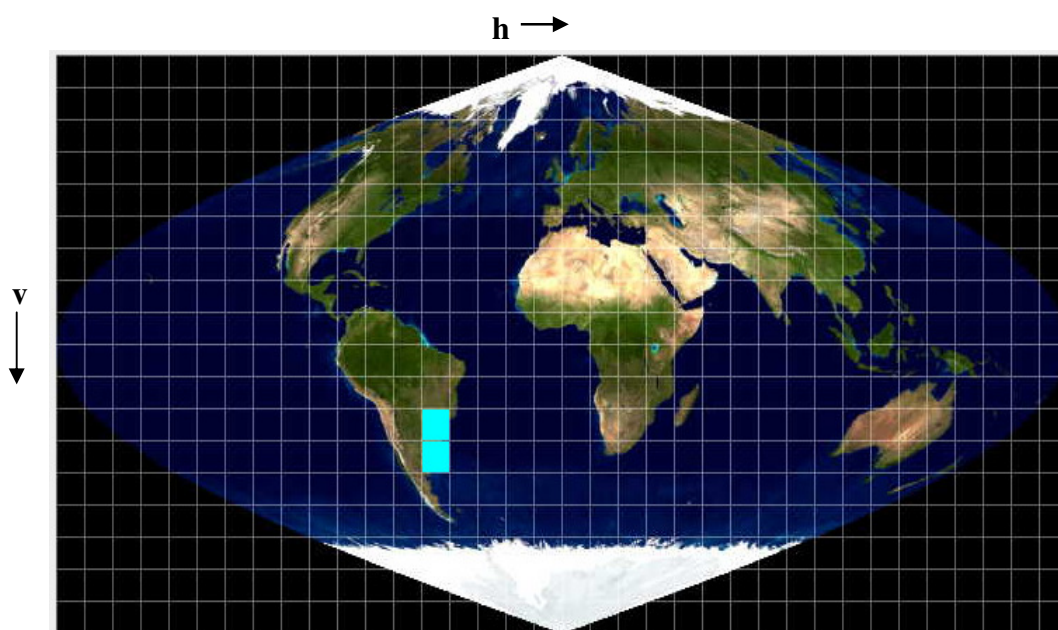


Figura 4 : *Tiles* h13v11 e h13v12, referentes às cenas que cobrem o Estado do Rio Grande do Sul. FONTE: software MRT – disponível para download no site: https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/modis_reprojection_tool

O endereço utilizado para aquisição das imagens foi o <http://wist.echo.nasa.gov/api>. As imagens foram obtidas via FTP, sendo que para a utilização do site, é recomendada a utilização do tutorial de pedidos de dados do portal EOS disponível em (http://lpdaac.usgs.gov/tutorial/resources/EDG_Tutoria.pdf) (Arai & Freitas, 2007). A autorização para a transferência foi obtida através de e-mail, no qual é disponibilizado um endereço que permite fazer o download das imagens. As imagens MODIS, produto MOD13, não apresentam a necessidade de correções atmosféricas ou normalizações, tendo em vista os processamentos anteriores aplicados para a geração do produto. .

3.3.2. Conversões de formato

Para trabalhar com as imagens MODIS foram necessárias a implementação de algumas conversões de formato.

Primeiramente, foi necessário converter o formato hdf, formato disponibilizado pela NASA, para o formato tiff. Esta conversão foi feita no aplicativo MODIS *Reprojection Tools* (MRT), disponibilizado de forma gratuita através do site (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/modis_reprojection_tool). As imagens foram convertidas da projeção ISIN (*Integerized Sinusoidal*) para a projeção Geográfica, *datum* WGS84.

Posteriormente, foi elaborado o mosaico dos *tiles* h13 v11 e h13 v12, obtendo uma imagem com cobertura de todo o Estado, e então reamostrados os pixels utilizando o interpolador vizinho mais próximo.

Por fim, foi utilizado o programa ConvGeotiff (Arai *et al.*, 2005) para importação das imagens para o banco de dados do aplicativo Spring, versão 4.3.3, com um nível de quantização de 8 bits, definidos com os seguintes parâmetros: sistema de projeção geográfica lat/long; Datum WGS84; retângulo envolvente da área de estudo Longitude Oeste: 65° 16' 13.00 w e 42° 34' 2.00 w; latitude Sul 39° 59' 24.00 s e 29° 59' 24.00 s, conforme demonstrado na Figura 5.

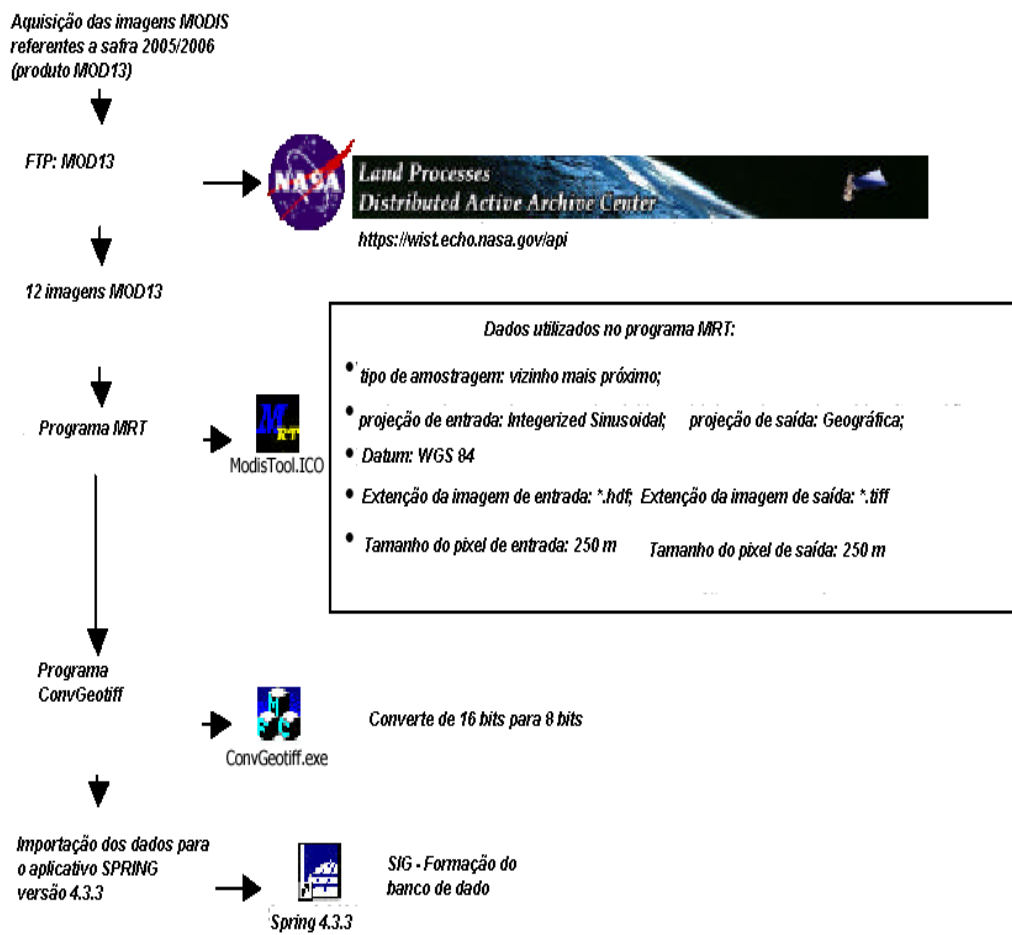


Figura 5. Diagrama dos passos necessários para o tratamento dos dados MODIS para importação para o aplicativo SPRING 4.3.3.

Segundo Arai *et al.*, (2005) a conversão de dados MODIS em formato GeoTIFF de 16 bits para 8 bits e tem por base a restauração do valor de reflectância de cada *pixel* através da equação :

$$Pixel = pixel/10.000 \quad (3)$$

Os valores de reflectância devem variar de 0,0 a 1,0, porém, no modelo de correção atmosférica utilizado nos produtos MODIS, os intervalos de reflectância se encontram no intervalo de -0,01 a 1,0 (Arai & Freitas, 2007). Para o NDVI e EVI são utilizados os intervalos de -1,0 a 1,0, onde também é restaurado o valor real do pixel utilizando a mesma equação com a utilização do programa ConvGeotiff, têm-se o controle desta conversão. Além disso, valores de reflectância inválidos em cada produto são descartados.

O uso de aplicativos para conversões convencionais tende a normalizar os dados utilizando o menor e o maior valor possível armazenado em um inteiro de 16 bits com sinal (-32.768 a +32.768), ocorrendo perda de informação, o que dificulta a padronização da conversão para diferentes imagens/datas (Arai & Freitas, 2007).

3.3.3 Banco de Dados

O banco de dados corresponde fisicamente a um diretório, onde foram armazenados tanto o modelo de dados, com suas definições de categorias e classes, quanto os projetos pertencentes ao banco. A versão utilizada do programa Spring foi a 4.3.3, o gerenciador utilizado para criação deste banco de dados foi o Access, e os parâmetros adotados para o projeto tiveram as seguintes características:

- Projeção Lat/Long/WGS84
- Retângulo envolvente: coordenadas geográficas; latitude: 39° 59' 24.00 s e 19° 59' 24.00 s; longitude: 65° 16' 13.00 o e 42° 32' 2.00 o, para o projeto modelo_mistura.

Dentro do modelo de dados foram criadas 26 categorias do tipo imagem, cada uma destas com seus referidos planos de informação.

3.4. Modelo Linear de Mistura Espectral

Neste trabalho foi utilizado o modelo linear de mistura espectral, expresso através da equação 1, implementado no programa Spring 4.3.3.

Os dados de entrada para a implementação do modelo linear de mistura espectral foram as bandas do vermelho (R), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (MIR), do produto MOD13 (NDVI). A utilização destas bandas deve-se ao comportamento espectral diferencial dos alvos vegetação, solo e água, nessas regiões do espectro.

Para a geração das 3 novas bandas (vegetação, solo e sombra/água) foi utilizada a técnica de decomposição de *pixels* (Shimabukuro & Smith, 1991), seguindo as seguintes etapas:

Inicialmente, foram identificados os denominados “*pixels* puros” de vegetação, solo e água. Esta seleção foi feita com base na resposta espectral dos *pixels*, verificado

se os valores de reflectância coletados eram coerentes com as respostas espectrais teórica padrão destes alvos.

Com base nas informações obtidas através da seleção de “*pixels* puros”, foi gerado o modelo linear de mistura para cada um dos 12 conjuntos de imagens MODIS, o que deu origem a três novas imagens denominadas de imagens fração, que correspondem as frações de solo, vegetação e água, em cada um dos 12 conjuntos de imagens.

Finalmente, sobre áreas cultivadas com a cultura do arroz irrigado foi verificada a resposta espectral das 3 bandas oriundas do modelo linear de mistura espectral nos 12 períodos analisados. Isto possibilitou a análise da evolução temporal da quantidade de solo, vegetação e água presentes nestas áreas ao longo do ciclo fenológico da cultura.

3.5. Classificação

A classificação das imagens para o cálculo da área cultivada com arroz foi feita utilizando o algoritmo ISODATA, implementado no aplicativo Spring, versão 4.3.3, sendo utilizado para classificar regiões de uma imagem segmentada. É um algoritmo de agrupamento de dados não-supervisionado, o que permite através de algoritmos automatizar a busca dos grupos de *pixels* espectralmente homogêneos e assumir que estes grupos correspondem às classes de interesse quando aplicado sobre o conjunto de regiões, que por sua vez são caracterizadas por seus atributos estatísticos de média, matriz de covariância, e também pela área (Centeno, J.A.S., 2004). A classificação estatística é o procedimento convencional mais utilizado para a análise digital de imagens e constitui num processo de análise de pixel de forma isolada. A análise pontual neste processo é considerada uma limitação por ser baseada unicamente em atributos espectrais. Para superar estas limitações propõe-se o uso de segmentação de imagens antes do processo de classificação, onde são extraídos os objetos relevantes para a aplicação desejada. No programa computacional utilizado, Spring 4.3.3, usa-se a segmentação da imagem antes da classificação, neste processo, a imagem é dividida em regiões que devem corresponder as áreas de interesse da aplicação, estas regiões são entendidas como sendo um conjunto de *pixels* contíguos que se espalham bidirecionalmente e que apresentam uniformidade. Neste processo de segmentação é utilizada a abordagem de crescimento de regiões. Inicialmente neste processo de segmentação, cada *pixel* é rotulado como uma região distinta, empregando-se um

critério de similaridade, *pixels* são agrupados em regiões (crescimento de regiões) gerando desta forma segmentos.

Sendo assim, o processo foi feito em duas etapas: a segmentação e a classificação propriamente dita.

3.5.1. Segmentação:

Para a segmentação das imagens foi utilizada a banda do NDVI, tendo em vista que esta imagem é suficiente para identificar o tipo de uso do solo (formações vegetais) e que após uma segmentação adequada é possível separar as diferentes formações vegetais encontradas. Desta forma, devido as diferentes informações espectrais encontradas nas diferentes datas analisadas, foram feitos vários testes em diferentes datas com diferentes limiares de área e similaridade visando separar o alvo de interesse, que neste caso era a cultura de arroz irrigado. Foram testados a imagem de NDVI do mês de dezembro, primeira quinzena, com um limiar de 1 *pixel* para área e similaridades 12 níveis de cinza e 8 níveis de cinza; mês de janeiro, primeira quinzena, com limiares de 12 *pixels* para área e 6 níveis de cinza para similaridade; mês de novembro, segunda quinzena, com limiares de 6 *pixels* para área e 12 níveis de cinza para similaridade; a imagem de máximo NDVI da cultura mais a banda do MLME da água, da segunda quinzena de novembro. Estas datas foram escolhidas de acordo com o ciclo da cultura, o objetivo desta etapa foi testar os resultados obtidos para que fosse escolhida a melhor data para a classificação.

3.5.2. Classificação:

Para a classificação foram utilizadas as imagens fração de solo, água e vegetação, obtidas através do MLME (modelo linear de mistura espectral).

As imagens utilizadas nos testes de segmentação foram também classificadas com a finalidade de comparar os resultados obtidos e escolher a melhor imagem classificada, para definir a data possível de mapear a cultura do arroz.

Nesta etapa foram feitos testes com algumas classes obtidas, onde após a análise detalhada do resultado da classificação, foram excluídas algumas classes com a finalidade de obter-se um resultado mais preciso, tendo em vista que a classificação realizada pelo programa Spring 4.3.3 gera várias classes sendo necessária a intervenção através de uma análise visual das classes no final desta etapa. Neste caso a análise dessas classes foi feita a partir de um mapeamento realizado com imagens Landsat,

onde constavam áreas de arroz do mesmo período, permitindo assim melhorar o resultado da classificação e uma melhor identificação das áreas classificadas com as imagens MODIS. Os passos realizados neste item são demonstrados na Figura 6, através de um fluxograma.

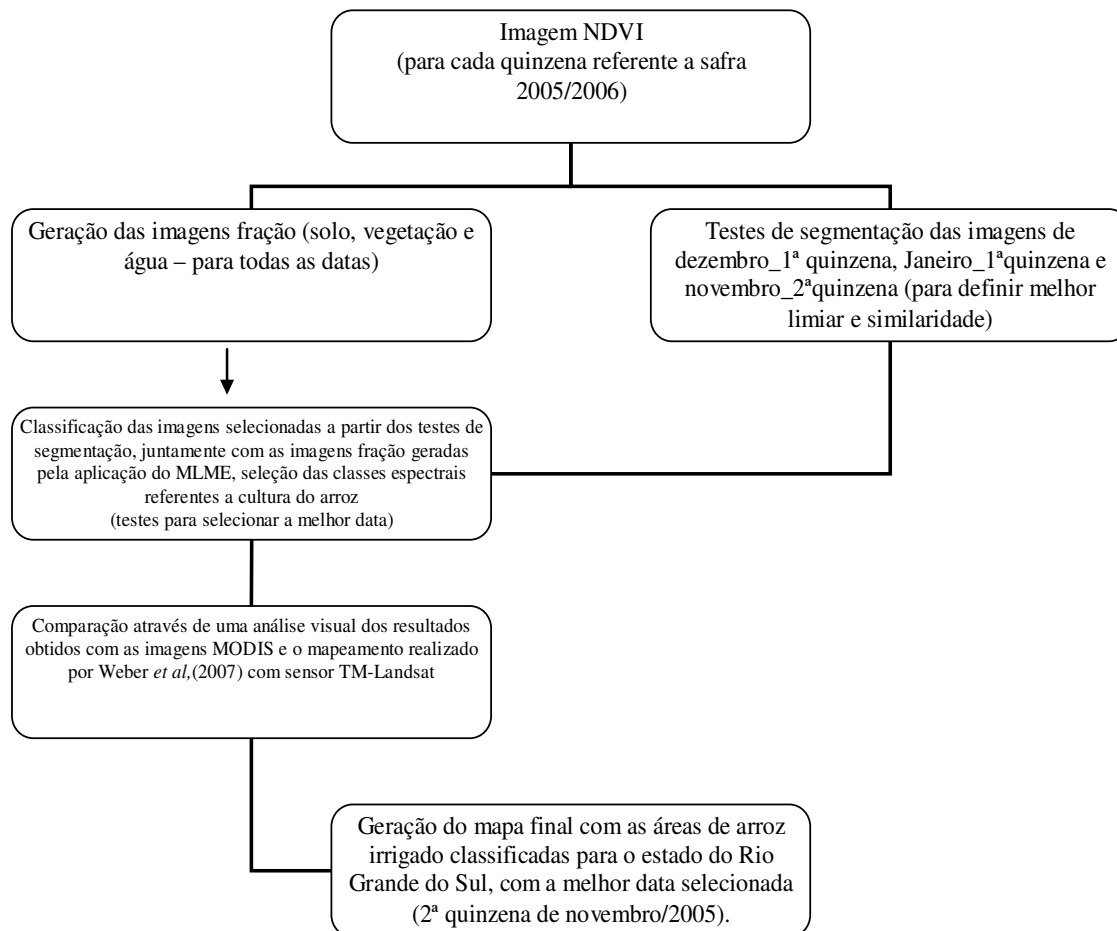


Figura 6: Fluxograma dos passos adotados para classificação das imagens de NDVI até a obtenção do mapa final com as áreas de arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul.

Além disso, foram eliminados do mapa final as áreas dos municípios que não produzem arroz, localizadas na região Norte do Estado, que devido a altitude não é possível o cultivo desta cultura.

3.6. Análise dos Resultados

Para avaliar a qualidade dos resultados e eliminar confusões geradas pelo algoritmo de classificação automática com áreas úmidas não relacionadas ao cultivo de arroz, a área classificada como arroz irrigado neste trabalho foi comparada ao mapeamento feito com imagens Landsat para o mesmo ano-safra 2005/2006, realizado por Weber *et al.* (2007). A Figura 7 mostra a localização das áreas de arroz

identificadas, salientando-se que a ausência de áreas de cultivo de arroz irrigado na região do Litoral foi devido a grande presença de nuvens, dificultando assim aquisição de cenas Landsat adequadas para estas áreas.

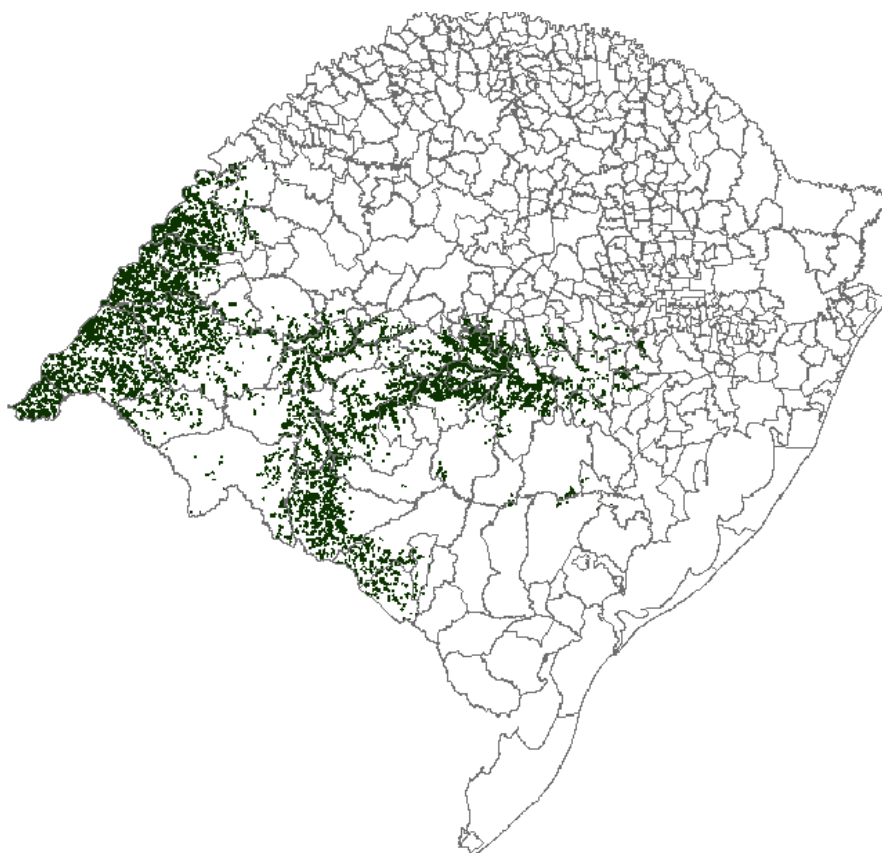


Figura 7: Localização das áreas cultivadas com arroz irrigado no Rio Grande do Sul na safra 2005/2006, mapeadas através de imagens Landsat – no Litoral não foi feita o mapeamento devido à nebulosidade persistente (Fonte: Weber *et al.*, 2007).

Os resultados da classificação foram comparados, ainda, com os dados oficiais do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA), os quais são divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, set/2006) e com os dados do Instituto Riograndense do Arroz (IRGA/2006).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 8 são apresentadas as curvas espectrais dos *pixels* selecionados como puros na imagem de novembro/2005, 1º e 2º quinzena. Verifica-se que a resposta encontrada para os três alvos é coerente com o esperado.

Os corpos d'água apresentaram baixa reflectância, menor do que 0,05 em todas as bandas e datas avaliadas, sendo encontrado o maior valor de reflectância na região do visível, padrão que está de acordo com o encontrado na literatura (Moreira, 2005).

O “*pixel* puro” de solo manteve os valores de reflectância sempre abaixo de 0,3, com um pico na região do infravermelho próximo, diminuindo gradativamente conforme avançava a região do espectro, em todas as datas selecionadas. Este padrão foi descrito como característico de solo por outros autores (Galvão *et al.*, 2006).

Com relação a vegetação, os valores máximos de reflectância obtidos mantiveram-se entre 0,45 e 0,60 de acordo com a data analisada. A reflectância oscilou devido ao período analisado, tendo em vista que a época de primavera-verão é o período em que a vegetação cultivada (lavouras anuais) tem seu ciclo de desenvolvimento. Os valores baixos de reflectância na região do visível devem-se a grande absorção da radiação solar pelos pigmentos presentes nas folhas, mais precisamente nos cloroplastos (clorofilas carotenóides e xantofilas), que absorvem a radiação na região do azul e vermelho (Ponzoni & Shimabukuro, 2007). Na região do infravermelho próximo foram encontrados os valores mais altos de reflectância para a vegetação. Isto se deve ao fato de que é nesta região do espectro que ocorre um considerável espalhamento interno da radiação nas folhas, sendo, portanto, a reflectância o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo (Gates *et al.*, 1965). Por fim os valores de reflectância obtidos na região do infravermelho médio decresceram, o que condiz com o esperado. Este decréscimo deve-se a absorção da água líquida presente na folha que afeta a reflectância nesta região do espectro. A água absorve consideravelmente a radiação incidente na região espectral compreendida entre 1,3 μm a 2,0 μm , em termos

mais pontuais, a absorção se dá em 1,1 μm ; 1,45 μm ; 1,95 μm e 2,7 μm (Ponzoni & Shimabukuro, 2007).

Nas demais figuras observa-se um comportamento semelhante dos alvos selecionados, exceto na Figura 10, 2º quinzena de fevereiro, cujo o comportamento da vegetação atingiu o seu maior valor de reflectância. Isto deve-se ao fato de que as culturas de verão atingem o maior acúmulo de biomassa neste período, a medida que o ciclo se completa estes valores começam a diminuir, como pode ser observado nas Figuras 12 e 13.

Os *pixels* puros foram selecionados diretamente na imagem de NDVI a partir de uma análise visual, comparando curva obtida com os valores encontrados em literatura. O alvo selecionado para a obtenção dos *pixels* puros foi o mesmo para todas as datas, ou seja, procurou-se obter sempre o mesmo *pixel* de acordo com a coordenada geográfica obtida, senão o mesmo o mais próximo possível.

Sendo assim, observando as curvas espectrais obtidas a partir da seleção dos “*pixels* puros” pode-se afirmar que os valores de reflectância coletados nesses *pixels* correspondem com as respostas espectrais padrão dos alvos selecionados para cada conjunto de imagens.

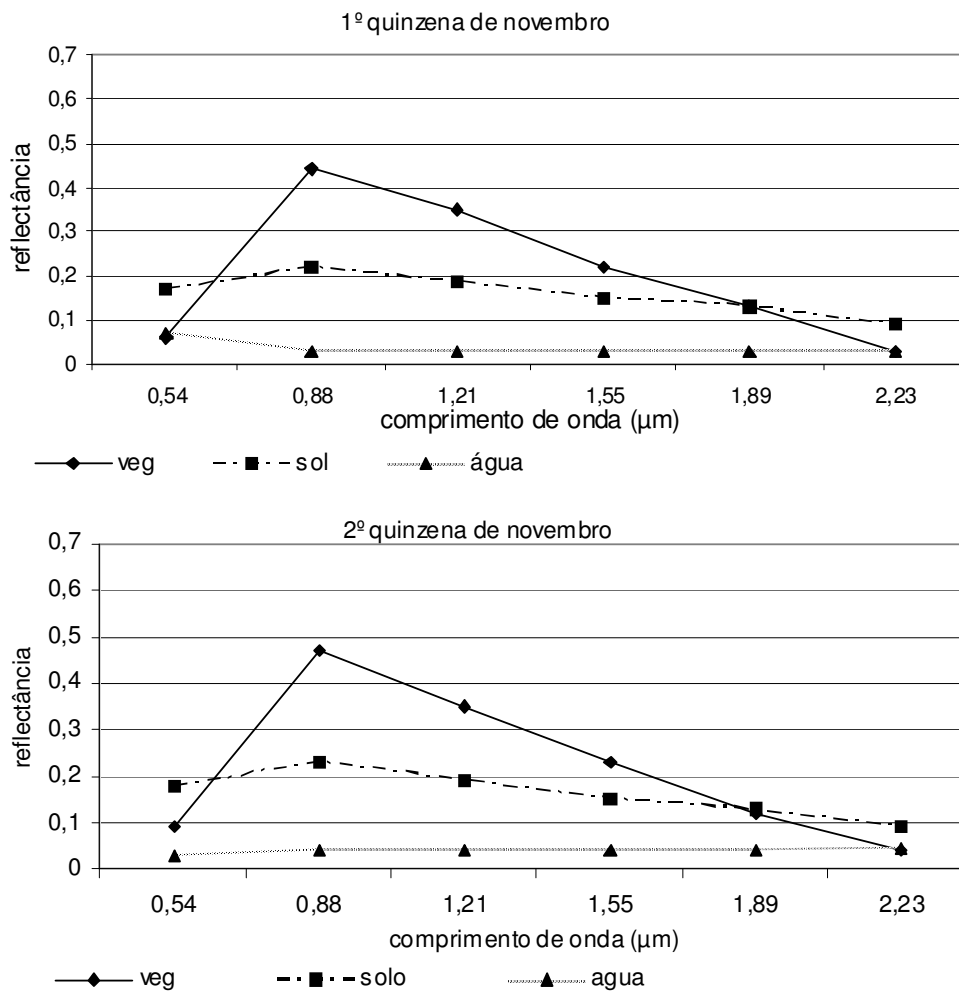


Figura 8: Curvas espectrais dos “pixels puros” (vegetação, solo e água) da imagem MODIS de novembro de 2005, 1º e 2º quinzena, no Estado do Rio Grande do Sul.

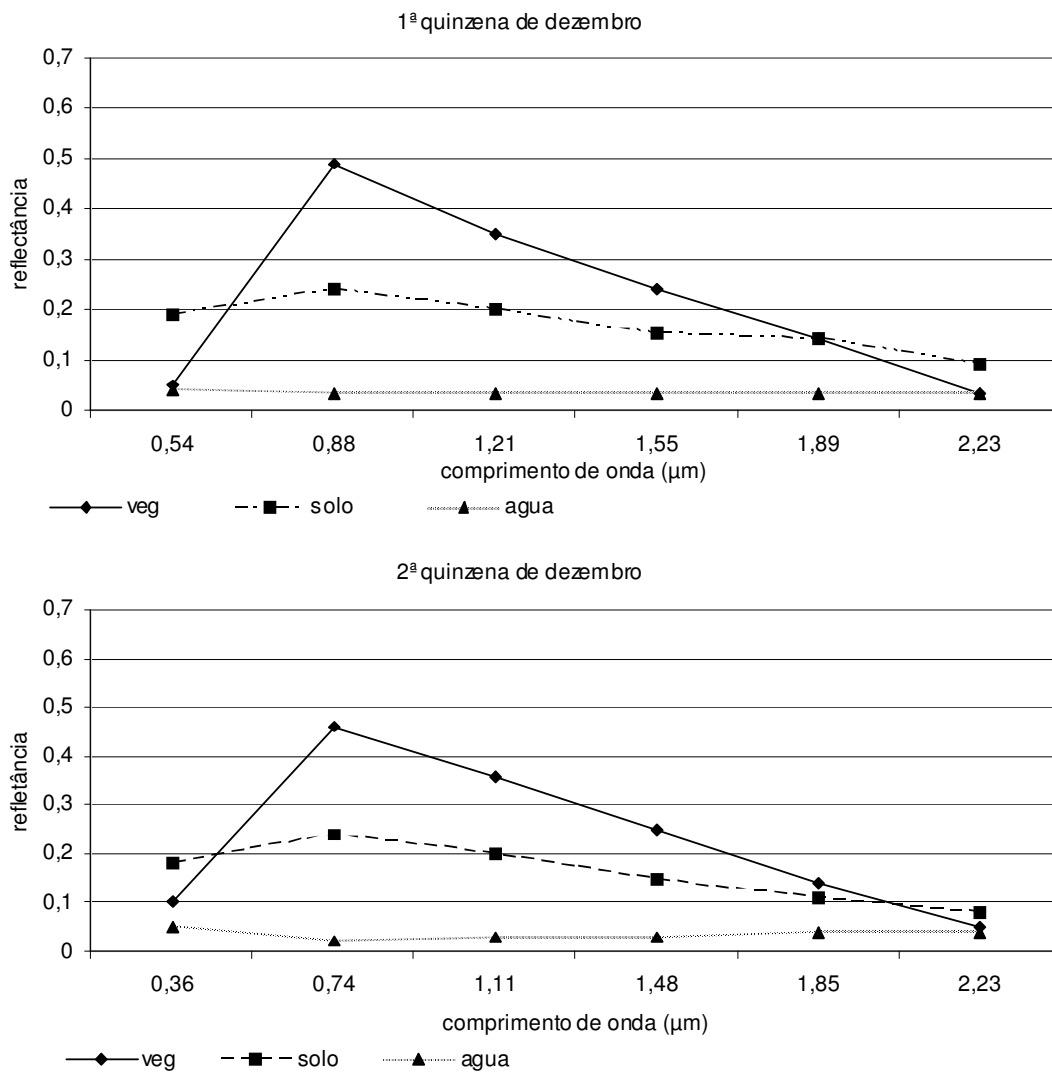


Figura 9: Curvas espectrais dos “*pixels* puros” (vegetação, solo e água) da imagen MODIS de dezembro de 2005, 1º e 2º quinzena, no Estado do Rio Grande do Sul.

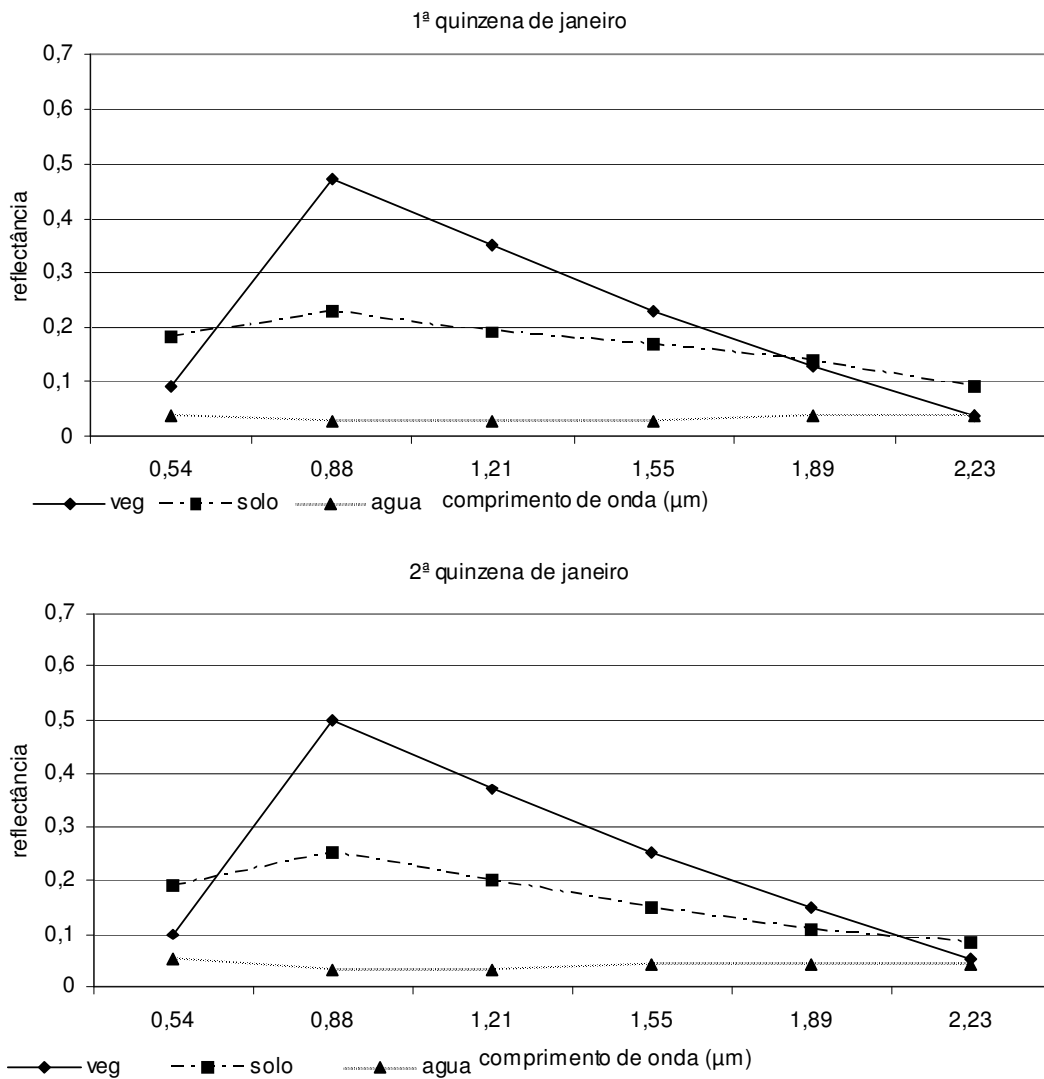


Figura 10 Curvas espectrais dos “pixels puros” (vegetação, solo e água) da imagem MODIS de janeiro de 2006, 1º e 2º quinzena, no Estado do Rio Grande do Sul.

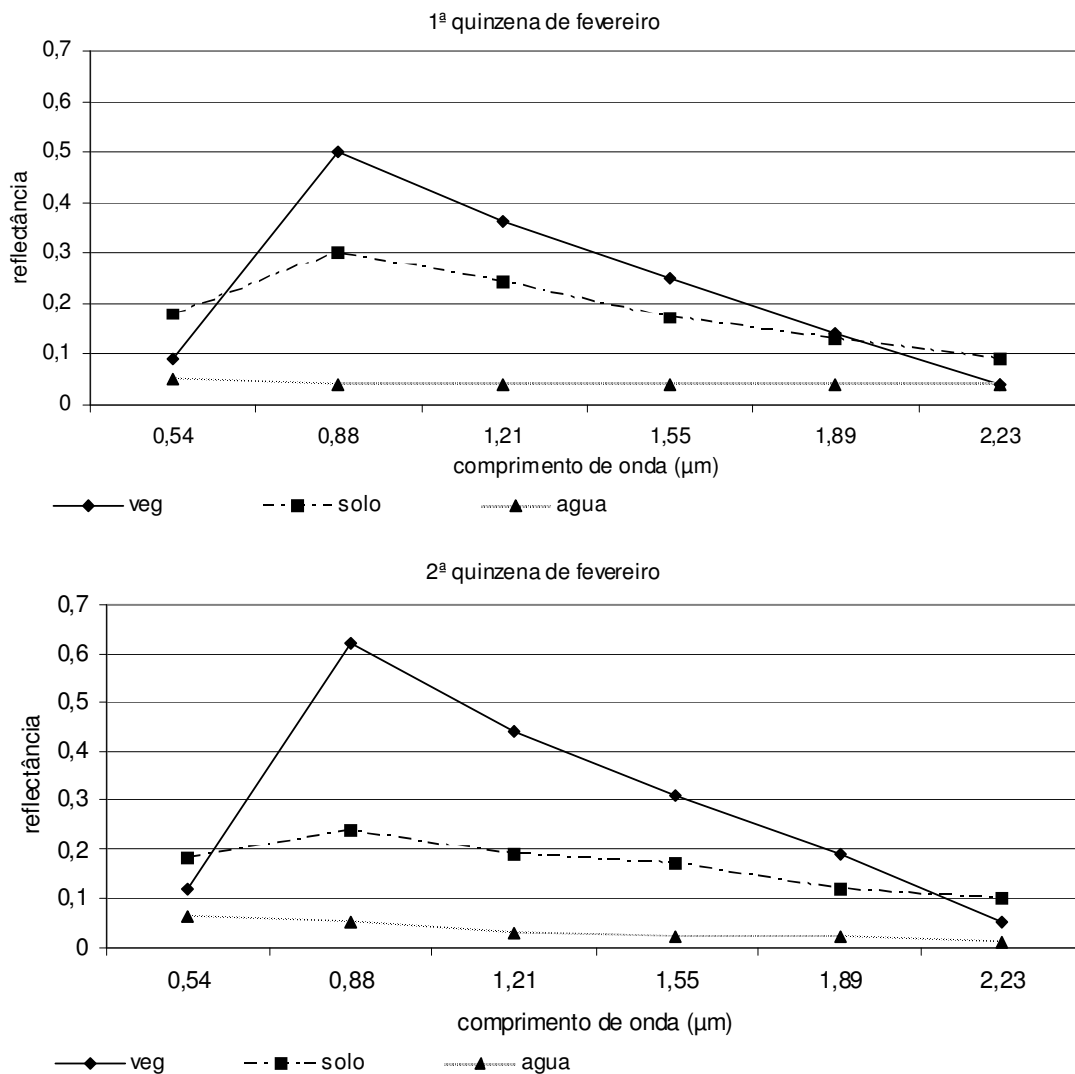


Figura 11: Curvas espectrais dos “*pixels* puros” (vegetação, solo e água) para a imagem MODIS de fevereiro de 2006, 1º e 2º quinzena, no Estado do Rio Grande do Sul

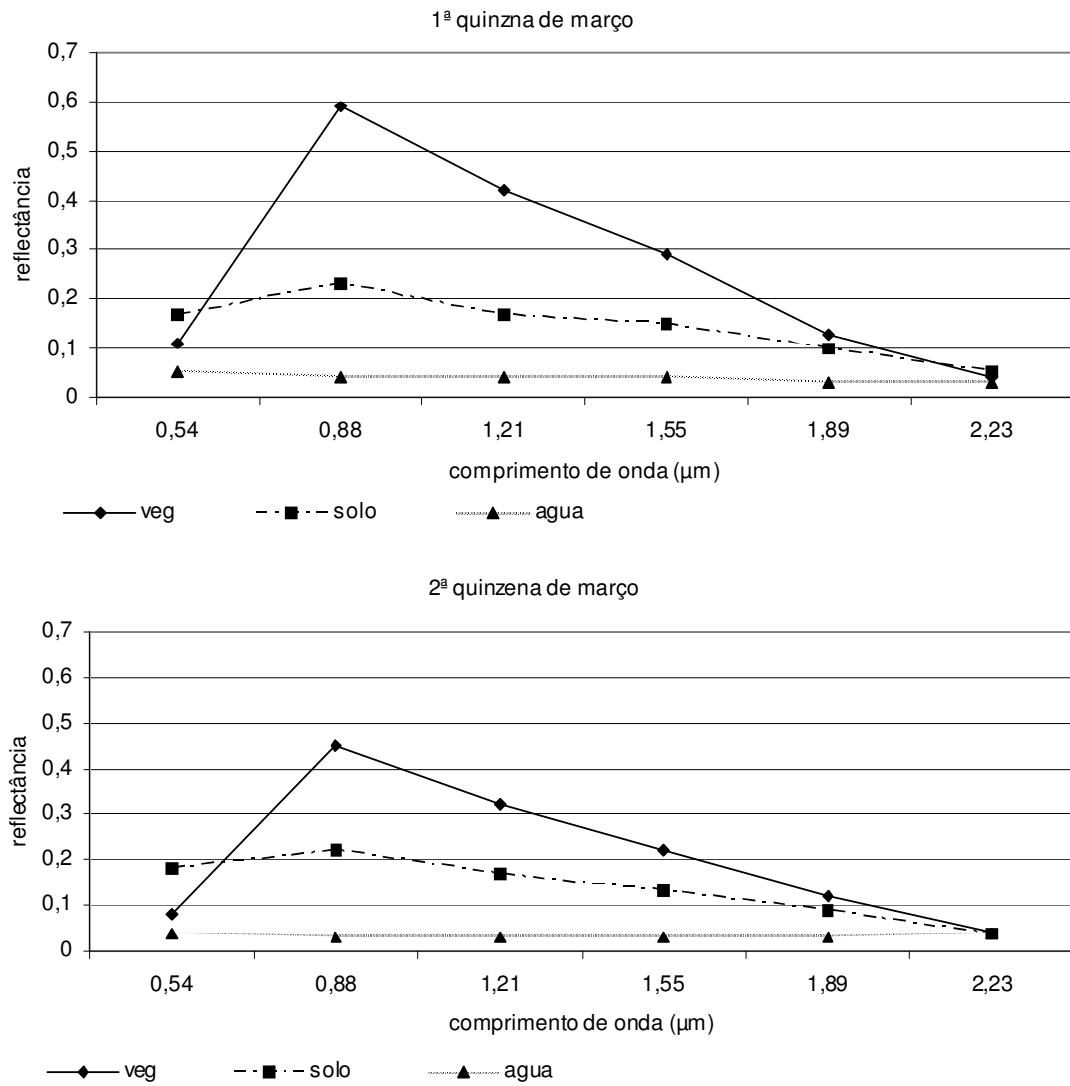


Figura 12: Curvas espectrais dos “*pixels* puros” (vegetação, solo e água) para a imagem MODIS de março de 2006, 1º e 2º quinzena, no Estado do Rio Grande do Sul

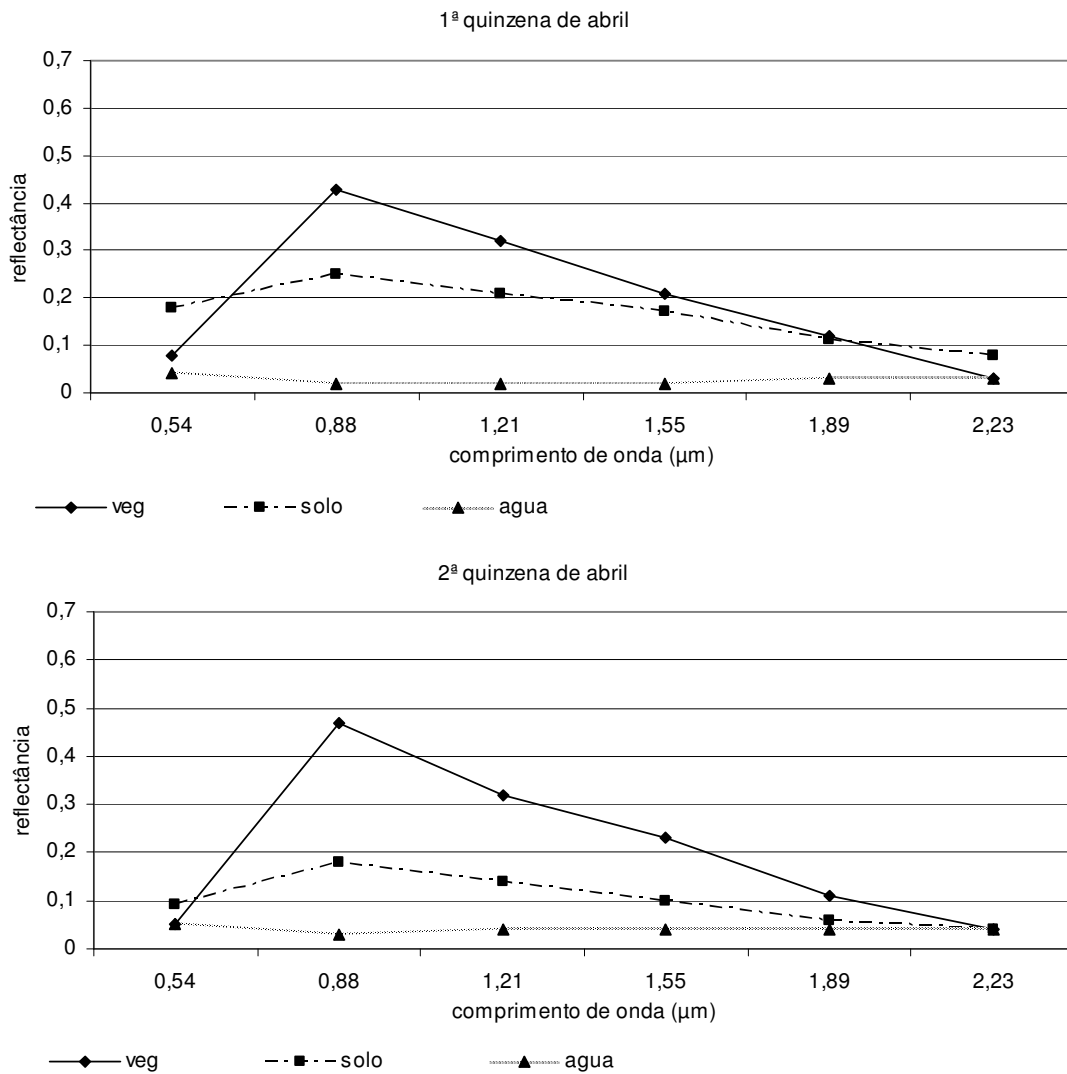


Figura 13: Curvas espectrais dos “*pixels* puros” (vegetação, solo e água) para a imagem MODIS de abril de 2006, 1º e 2º quinzena, no Estado do Rio Grande do Sul.

4.1. Geração das imagens fração

A aplicação do modelo linear de mistura espectral gerou para cada uma das 12 datas três novas imagens, denominadas de imagens fração, as quais visam identificar os alvos de interesse, a partir das proporções da mistura espectral. As imagens geradas podem ser consideradas como uma forma de redução da dimensionalidade dos dados e também como uma forma de realce das informações (Ponzoni & Shimabukuro, 2007).

Nas figuras a seguir, são mostradas as imagens fração de água (a), solo (b), e vegetação (c), para três períodos: 2ª quinzena de novembro/2005 (Figura 14), quando ocorre entrada de água na lavoura, 1ª quinzena (Figura 15) e 2ª quinzena (Figura 16) de janeiro/2006, quando a cultura encontrava-se em pleno desenvolvimento.

Segundo Ponzoni & Shimabukuro (2007) a imagem fração de água, solo e vegetação realçam, respectivamente, os corpos d'água e/ou superfícies com alto teor de umidade e/ou regiões sombreadas, solo descoberto e as áreas de cobertura vegetal. Na Figura 14 os tons mais claros de cinza estão associadas aos componentes água (a), as áreas com solo exposto (b) e vegetação (c).

Observa-se que as áreas claras na imagem fração de solo corresponderam a áreas escuras na imagem fração de vegetação, o que provavelmente representaram áreas de solos que estavam sendo preparados para a semeadura de culturas de primavera-verão. O contrário, áreas escuras na fração solo e claras na imagem fração de vegetação, corresponderam a áreas onde predominaram florestas (norte do Estado) ou campos.

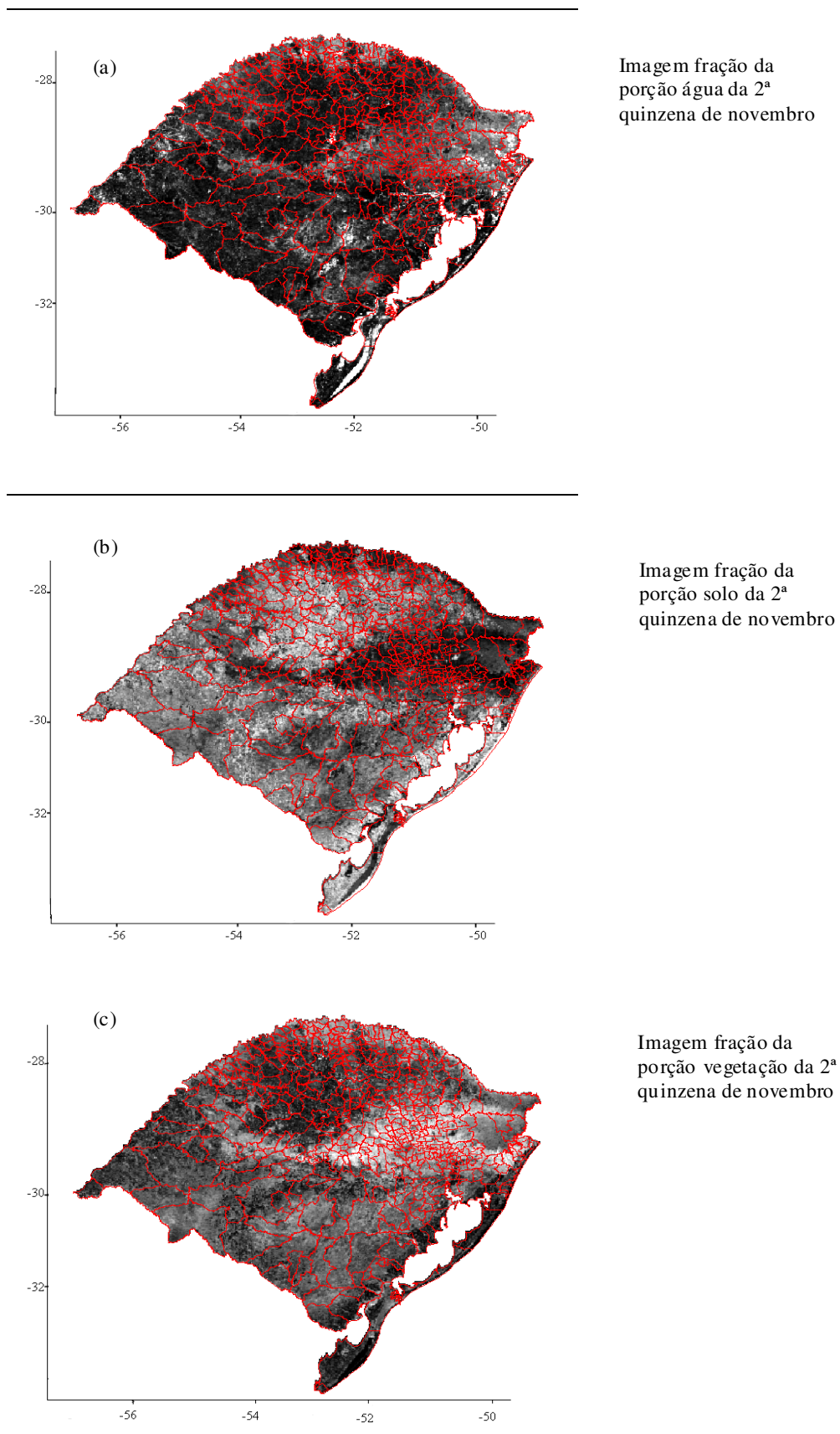


Figura 14. Imagens fração geradas pelo MLME, para a 2ª quinzena de novembro/2005, correspondentes as frações de água (a), solo (b) e vegetação (c). Estado do Rio Grande do Sul, safra 2005/2006.

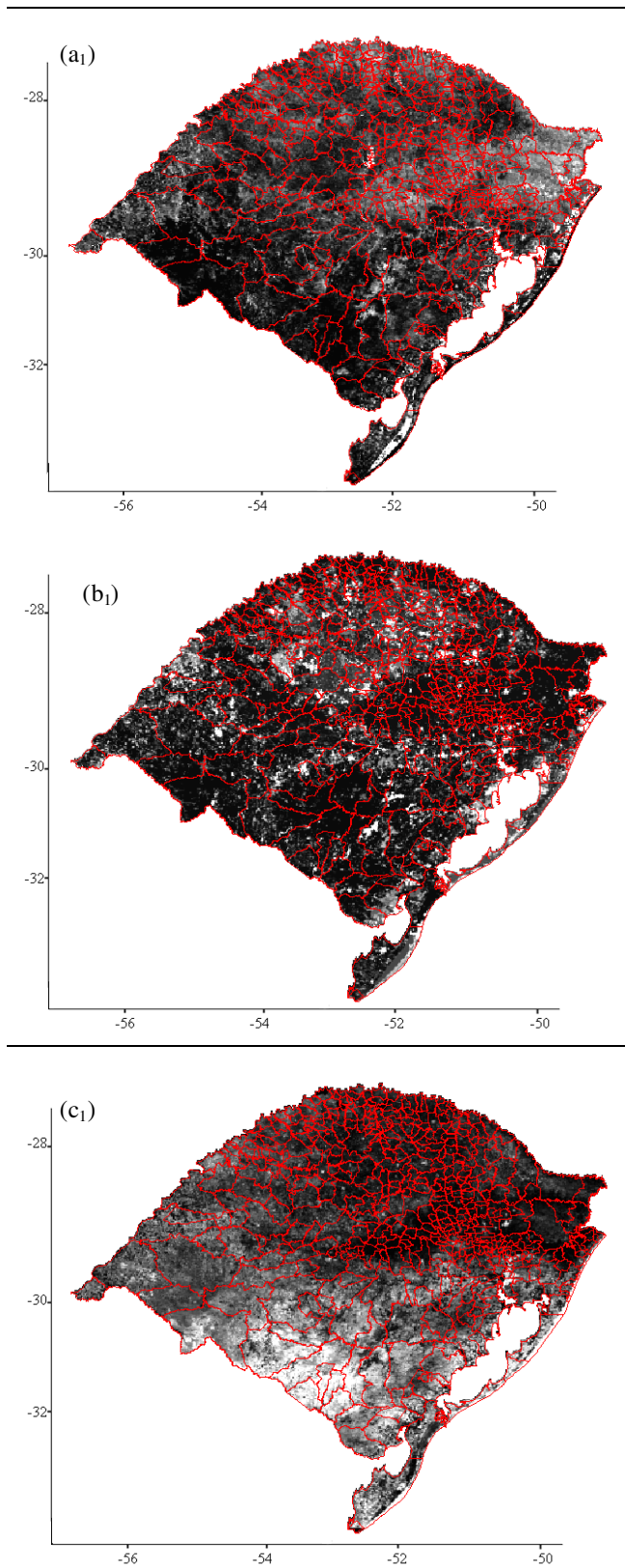


Imagem fração da porção
água da 1ª quinzena de
janeiro/2006

Imagem fração da porção
solo da 1ª quinzena de
janeiro/2006

Imagem fração da porção
vegetação da 1ª quinzena
de janeiro/2006

Figura 15: Imagens fração geradas pelo MLME, para a 1ª quinzena de janeiro/2006, correspondentes as frações de água (a₁), solo (b₁) e vegetação (c₁). Estado do Rio Grande do Sul, safra 2005/2006.

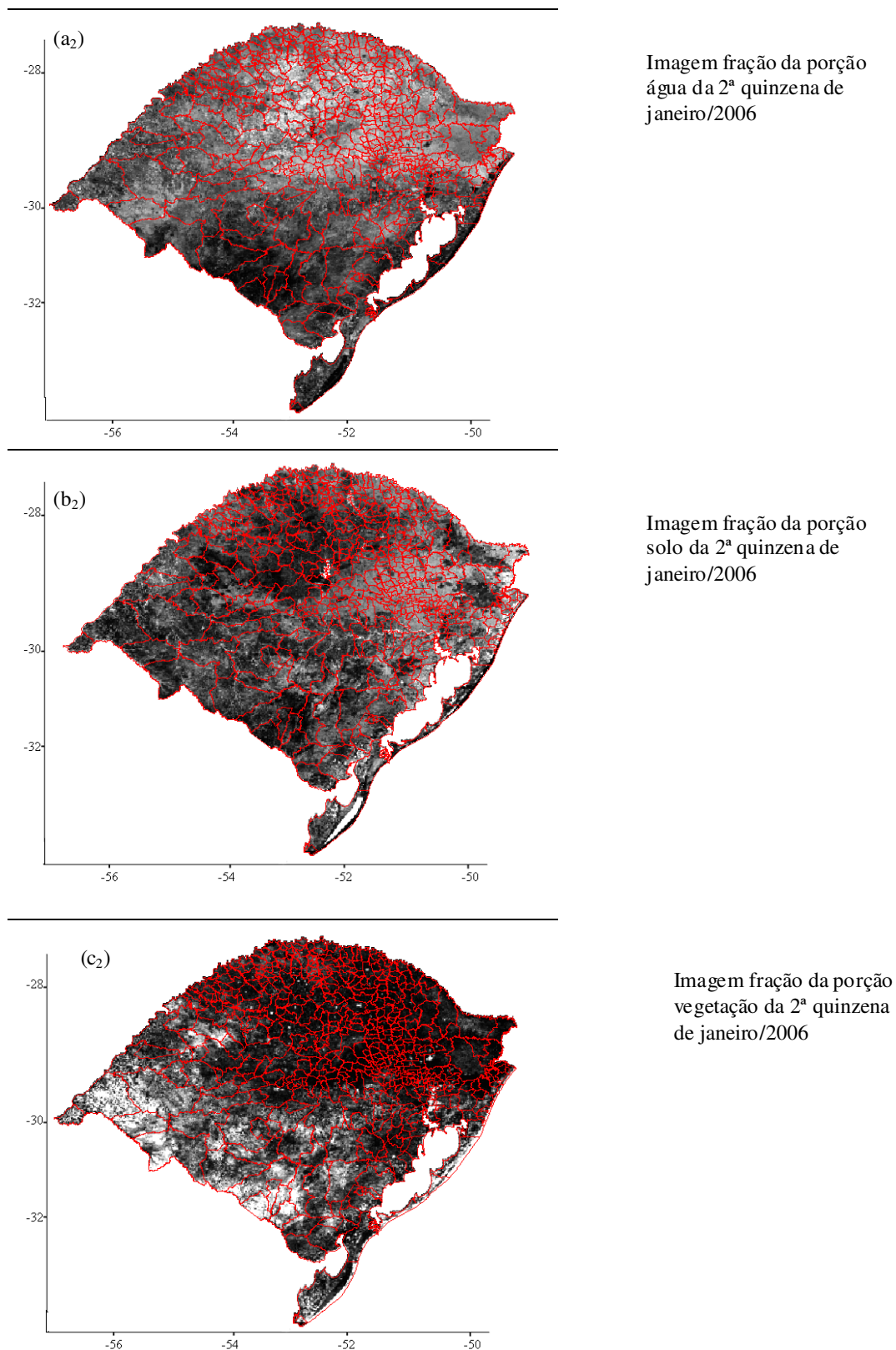


Figura 16: Imagens fração geradas pelo MLME, para a 1ª quinzena de janeiro/2006, correspondentes as frações de água (a₂), solo (b₂) e vegetação (c₂). Estado do Rio Grande do Sul, safra 2005/2006.

A medida que analisamos as demais imagens (Figura 14 e 15), pode-se verificar as mudanças ocasionadas devido ao avanço no desenvolvimento das culturas de primavera-verão. As áreas realçadas nas imagens de solo diminuem devido ao desenvolvimento da vegetação, e na imagem fração de vegetação estas áreas aumentam. Este padrão foi observado até o momento da colheita, onde começa a haver um decréscimo das áreas de vegetação e aumento das áreas de solo (março/2006 a abril/2006).

4.2. Variação temporal da reflectância dos “*pixels* puros”

A Figura 17 mostra a evolução temporal da reflectância dos “*pixels* puros” solo, água e vegetação, selecionados na safra 2005/2006. Observa-se a ocorrência de estabilidade temporal da reflectância nas três bandas para os “*pixels* puros” de água, com valores entre 0 e 0,1 durante todo o período. Isto indica que neste período, possivelmente, não ocorreram mudanças substanciais nas propriedades físico, química e/ou biológica do alvo que alterassem seu comportamento espectral. Verifica-se, entretanto, que na segunda quinzena de novembro ocorreu uma redução no valor da reflectância no vermelho sobre o “*pixel* puros” de água. Neste período, de acordo com manejo desta cultura no Estado do Rio Grande do Sul, ocorre a entrada de água nas lavouras.

A estabilidade temporal também caracterizou os “*pixels* puro” de solo, sendo que em todo o período avaliado a reflectância foi inferior a 0,3. Entretanto, os valores de reflectância foram diferentes entre as bandas analisadas. No infravermelho próximo os valores são maiores do que no vermelho, o que é consequência dos materiais constituintes dos solos, como presença de óxidos de ferro, teor de matéria orgânica e conteúdo de umidade. Conforme Moreira (2005), solos que apresentam óxidos de ferro em sua composição, dependendo da quantidade, terá os seus espectros de energia refletida, principalmente na região do infravermelho próximo bastante atenuados. Com relação ao teor de matéria orgânica, pode-se assumir que quanto maior a quantidade e mais decomposto este material estiver na composição do solo, maior será a absorção da radiação eletromagnética e por consequência menor será a reflectância, principalmente na região do vermelho. O mesmo ocorre com solos que apresentam um alto teor de umidade, a reflectância é menor do que em solos secos, visto que a água apresenta um potencial de absorção muito grande, apresentando assim uma baixa reflectância na faixa que corresponde de 400 a 2.600nm (Moreira, 2005).

No caso dos “*pixels* puros” de vegetação foi observada maior diferença entre as bandas e menor estabilidade temporal, especialmente na banda do infravermelho próximo. No vermelho e infravermelho médio a reflectância foi inferior a 0,12, como consequência da alta absorção da radiação pelos pigmentos das plantas (clorofilas, xantofilas e carotenóides), no vermelho e alta absorção da radiação pelas moléculas de água presente nas folhas (Ponzoni & Shimabukuro, 2007). No infravermelho próximo a reflectância foi sempre superior a 0,4, ocorrendo aumento nos valores da reflectância à medida que houve acúmulo de biomassa. Isto pode ser explicado pelo maior espalhamento da radiação no interior das folhas e também entre as camadas de folhas que compõe o dossel, o que é denominado de reflectância aditiva (Ponzoni & Shimabukuro, 2007).

Analisando a Figura 18 é possível avaliar o comportamento da vegetação, solo e água na imagem de NDVI, que é um índice extensamente utilizado no monitoramento da vegetação. Os valores de NDVI para a vegetação no começo de seu desenvolvimento são baixos. A medida que a cultura evolui estes valores tendem a aumentar. Observou-se, entretanto, que na 2ª quinzena de novembro ocorreu um decréscimo, provavelmente pela entrada de água na lavoura. Esta redução também foi mencionada em trabalhos anteriores, como os resultados obtidos por Kreling *et al.*, (2007) no Rio Grande do Sul. No trabalho os autores analisaram a variação dos perfis temporais de NDVI da cultura do arroz irrigado em diversas safras agrícolas, mostrando que existe uma evidente queda nos valores de NDVI na segunda quinzena de novembro, em consequência da entrada de água na lavoura. Ainda na Figura 18 pode-se observar que após a entrada de água os valores de NDVI começaram a crescer novamente até o final do ciclo da cultura, quando tenderam a baixar devido a colheita. Kreling *et al.*, (2007) observaram o mesmo padrão em todas as safras estudadas. D’Arco (2007) ao analisar os perfis temporais obteve o mesmo resultado, observando em uma primeira análise destes perfis a influência da água na resposta espectral do arroz irrigado no início do ciclo, tendo uma redução dos valores de vegetação no início do ciclo.

Ao analisar o comportamento do solo observa-se que no começo do ciclo da cultura, este se apresentava sem cobertura vegetal. Os valores mais elevados em alguns meses pode ser devido ao aparecimento de alguma cobertura vegetal nesta área.

Com relação a água manteve-se com os mesmos valores, com pequenos aumentos em alguns meses do ano, o que pode ser explicado pelo aumento de materiais em suspensão.

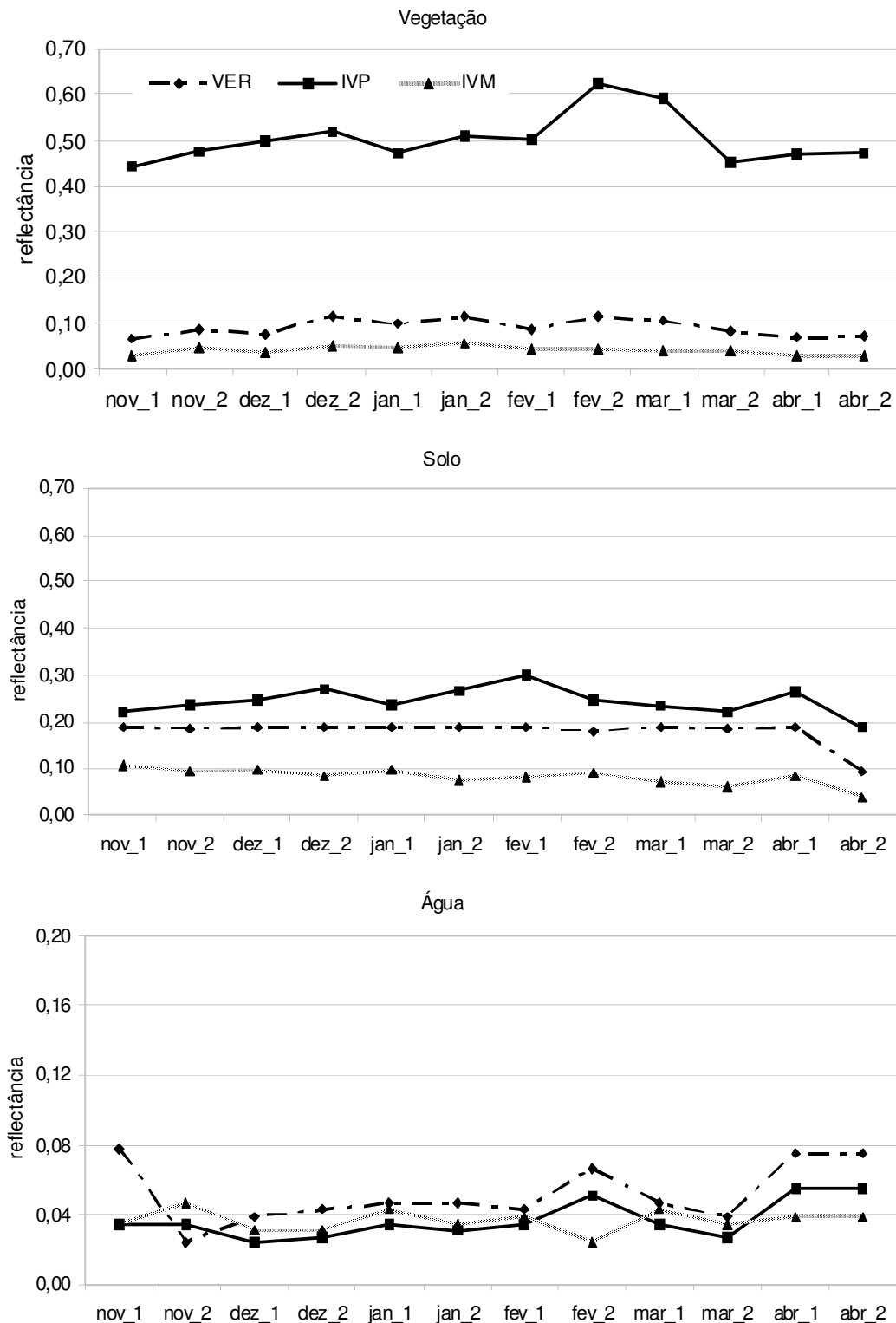


Figura 17: Evolução temporal da reflectância dos “*pixels* puros” de água, solo e vegetação (cultura de arroz), nas porções do vermelho (VER), infravermelho próximo (IVP) e médio (IVM), durante a safra 2005/2006, no Rio Grande do Sul.

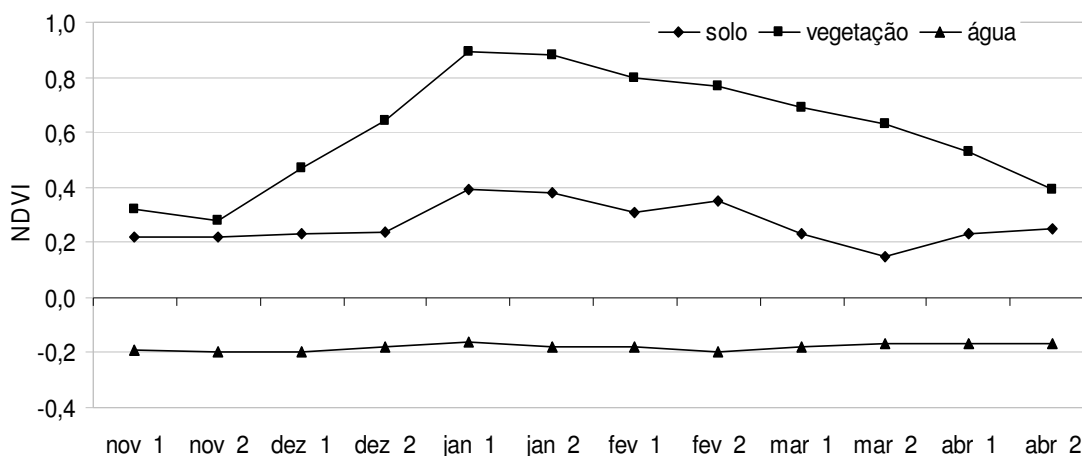


Figura 18: Evolução temporal do NDVI durante o ciclo da cultura de arroz, no Estado do Rio Grande do Sul, para os “*pixels puros*” de vegetação, solo e água, na safra 2005/2006.

4.3. Testes de classificação

4.3.1. imagem da 1ª quinzena de janeiro de 2006 – jan_1 - três imagens fração do MLME (vegetação, solo e água)

O primeiro teste de classificação utilizou a data da 1ª quinzena de janeiro de 2006, com as 3 imagens fração geradas a partir da aplicação do modelo linear de mistura espectral, aplicado a imagem de NDVI. Esta data foi definida por ser o período de máximo desenvolvimento da cultura do arroz, tendo como objetivo testar exclusivamente as imagens fração geradas pelo modelo de mistura espectral. O resultado obtido com esta classificação pode ser observado na Figura 19, onde temos a imagem com a distribuição espacial das áreas classificadas, contendo as 55 classes espectrais geradas pelo processo de classificação automática, ou seja, o resultado bruto deste processo. O processo seguinte foi atribuir os rótulos de **arroz** e **não arroz** a cada uma das 55 classes geradas. Estes rótulos foram atribuídos com base no conhecimento das áreas e na comparação visual com as áreas identificadas através do mapeamento realizado por Weber *et al* (2007), com imagens Landsat. Cabe salientar que este processo é interativo e subjetivo, pois depende do conhecimento do usuário com relação

ao comportamento espectral dos alvos de interesse, que nesse caso específico são as lavouras de arroz. Para esta etapa do processo foram feitos testes de rotulação das 55 classes, variando o número de classes associadas a cultura do arroz, e comparados com o mapeamento feito por Weber *et al.*, (2007). O melhor resultado deste teste é apresentado na Figura 20, onde foram selecionadas somente as classes espectrais correspondentes as áreas de arroz. A nova imagem gerada contém somente duas classes temáticas: **arroz** e **não arroz**. Os pontos em vermelho representam as áreas com arroz irrigado. Verifica-se um número pequeno de áreas rotuladas como arroz. Isto ocorreu porque o algoritmo utilizado, ISOSEG, não foi capaz de discriminar a cultura do arroz dos demais alvos com as imagens fração utilizadas do modelo linear de mistura espectral e a data selecionada, embora pode-se observar que regiões típicas de cultivo de arroz foram classificadas corretamente. A maior confusão ocorreu na parte norte do estado, provavelmente devido ao cultivo de soja nesta região, sendo que com a data selecionada a cultura da soja está em pleno desenvolvimento vegetativo. Analisando a região Sul do Estado, pode-se observar que lagoa mangueira foi classificada como área de arroz, a explicação para este erro deve-se ao fato de que esta lagoa apresenta uma área muito pequena se comparada com as demais lagoas, sendo assim ela não veio zerada na imagem. Os produtos adquiridos do sensor MODIS apresentam valores zero, também chamado de *Fill Value*, para rios de grande porte, lagoas e oceanos, em especial os produtos *Land*, que é o caso do produto MOD13.,

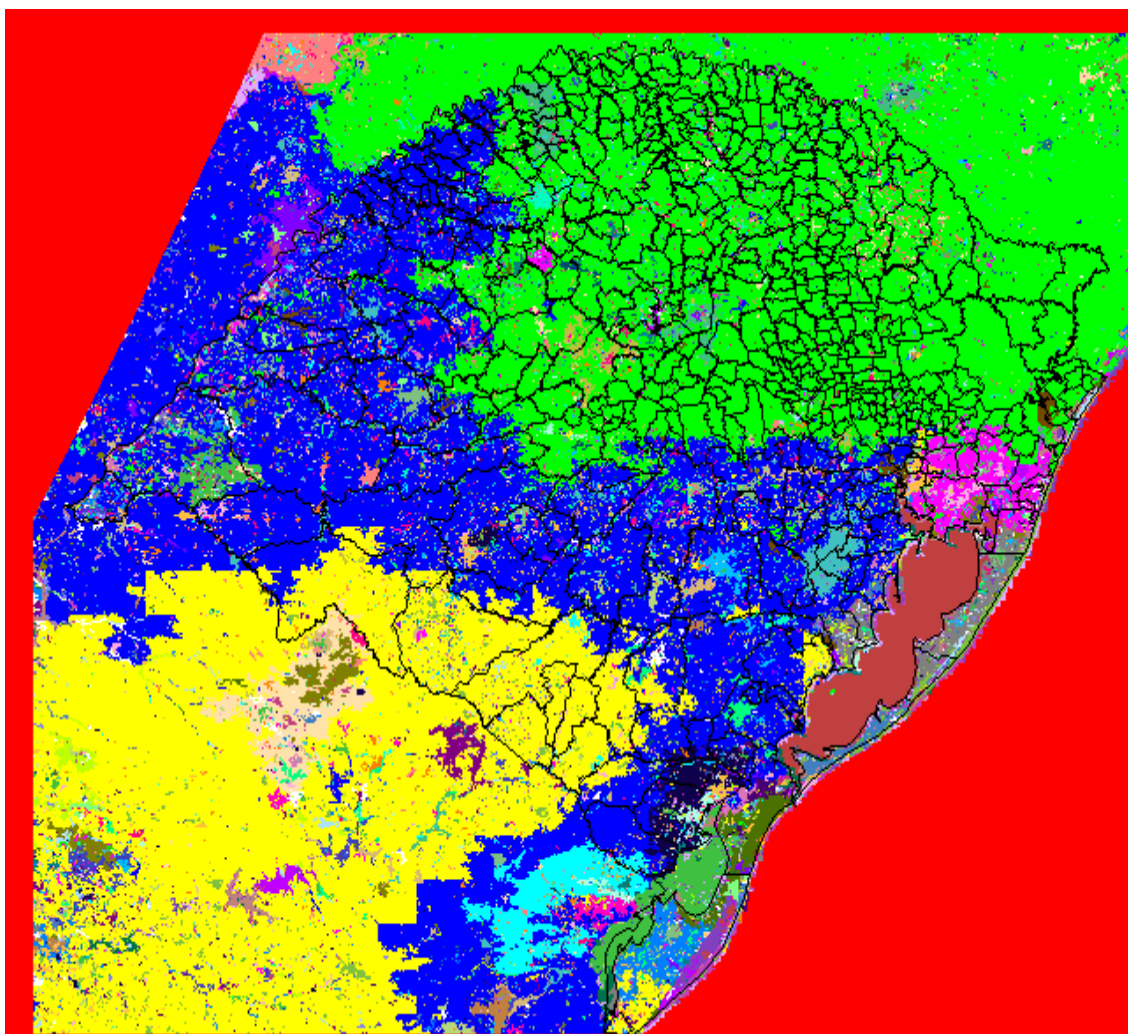


Figura 19: Resultado bruto da classificação automática da imagem da 1ª quinzena de janeiro de 2006, com as três bandas do modelo linear de mistura espectral, contendo as 55 classes espectrais, para o Estado do Rio Grande do Sul.

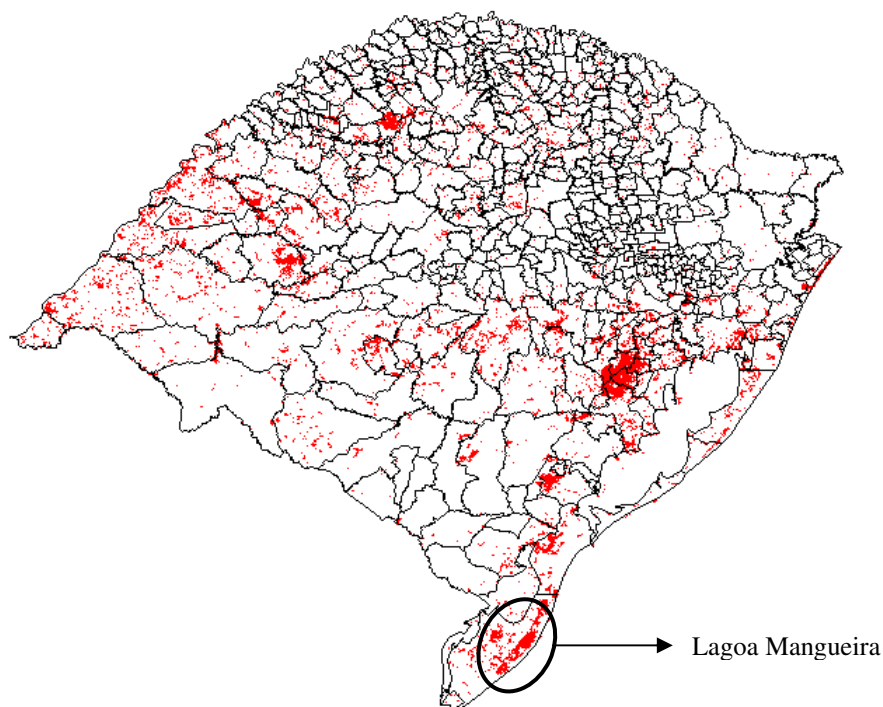


Figura 20: Área classificada como arroz irrigado, obtida a partir da seleção de 12 classes espectrais. Estado do Rio Grande do Sul, safra 2005/2006.

4.3.2. imagem de máximo NDVI do ciclo da cultura e a imagem fração referente a porção água da 2ª quinzena de novembro de 2005

O segundo teste realizado foi com a imagem de máximo NDVI do período de cultivo mais a imagem fração do MLME que representa a água referente a 2ª quinzena de novembro de 2005. A escolha deste período para análise deve-se ao fato de que é nesta época que temos um máximo acúmulo de biomassa verde nas lavouras de arroz, além disso, com base em Kreling *et al.*, (2007), é neste período que ocorre a entrada de água na lavoura, logo após o plantio. A partir do momento que se utilizam imagens de várias datas, têm-se uma classificação multitemporal, conforme Campbell, (2006). Segundo o autor se fizermos uma classificação utilizando o ciclo da cultura, é possível obter o máximo NDVI do período da cultura, temos então um perfil temporal do ciclo. Conforme observado por D'Arco (2007), o arroz por ser cultivado sob inundações, apresenta em sua fase inicial resposta espectral predominante da água, o que o diferencia de outros cultivos de verão, porém pode ocorrer alguma confusão com áreas de banhado, já na fase de maior desenvolvimento vegetativo, onde o dossel da cultura cobre a lâmina de água, esta pode ter respostas espectrais semelhantes a de outros

cultivos, principalmente os que apresentam o mesmo calendário agrícola, que neste caso podemos citar a cultura da soja encontrada em grandes áreas situadas principalmente ao norte do Estado . Neste sentido ao realizarmos uma classificação multitemporal, tem-se a possibilidade de discriminar e mapear a cultura, aproveitando suas diferentes características ao longo do ciclo. Ao introduzirmos a imagem fração da porção água do MLME bem na época em que as lavouras de arroz estão sendo inundadas (2ª quinzena de novembro), têm-se a possibilidade de conseguirmos distinguir áreas cultivadas com soja. Os procedimentos de rotulação das classes são iguais aos citados no item anterior, sendo que para esta imagem foram geradas 53 classes espectrais. Os melhores resultados deste teste são apresentados nas Figuras 21 e 22. Observa-se que as áreas classificadas abrangeram muito a parte norte do Estado, local que devido a sua altitude torna-se impróprio para o cultivo de arroz, este problema ocorreu devido a confusões geradas com as áreas de soja e alguns rios pequenos existentes nestas áreas, mas principalmente áreas de cultivo de soja. Para a região sul do Estado, tendo em vista que a maior concentração de áreas com cultivo de arroz encontra-se nesta região, as áreas classificadas foram poucas. Analisando a região da Campanha o resultado obtido foi condizente, embora ainda com poucas áreas visto que nesta região existem grandes extensões de áreas com o cultivo de arroz e soja, embora ainda predominando a cultura do arroz irrigado. Sendo assim podemos dizer que o diferencial da utilização da imagem fração referente a água, do MLME, foi a possibilidade de separar as culturas arroz/soja em regiões com ambos os cultivos, embora o resultado final obtido não tenha sido satisfatório. De uma maneira geral analisando este resultado observa-se que a distribuição das lavouras foi mais condizente com a realidade de campo, embora a área final obtida tenha ficado bem abaixo da área real.

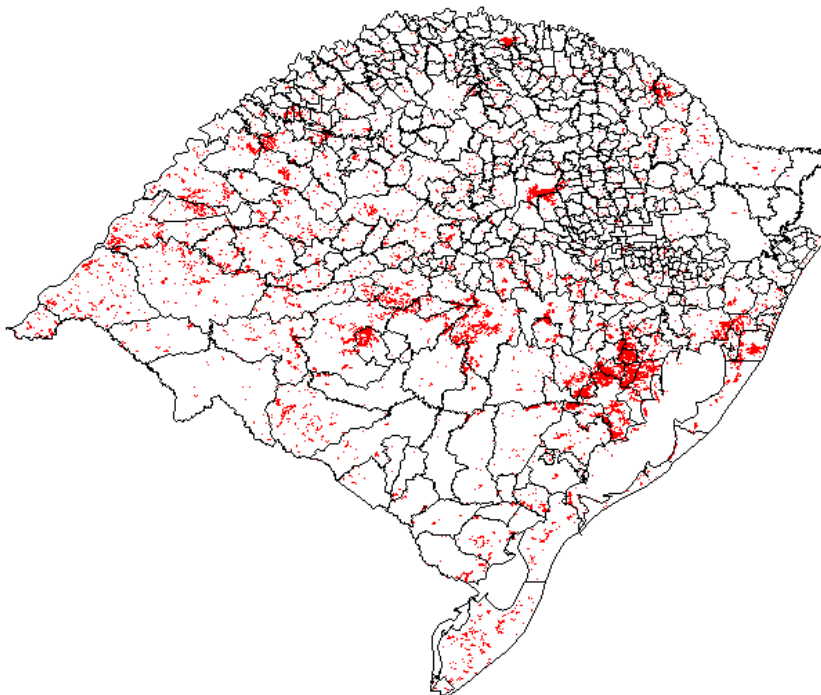


Figura 21: Resultado da classificação da imagem de máximo NDVI do período da cultura e a imagem fração da porção água do MLME, da 2ª quinzena de novembro/2005. Imagem temática, obtida a partir da seleção de algumas classes condizentes a áreas de arroz, onde foram selecionadas 6 classes.

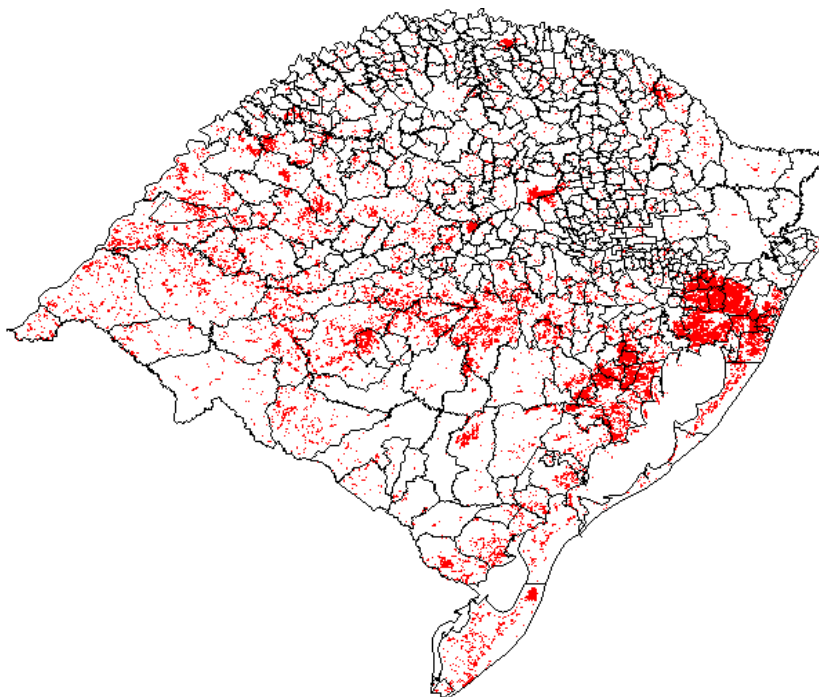


Figura 22: Resultado da classificação da imagem de máximo NDVI do período da cultura e a imagem fração da porção água do MLME, da 2ª quinzena de novembro/2005. Imagem temática, obtida a partir da seleção de algumas classes condizentes a áreas de arroz, onde foram selecionadas 9 classes.

4.3.3. Imagem da 2ª quinzena de novembro de 2005 com as imagens fração geradas pelo MLME (vegetação, solo e água)

Após a avaliação destes dois testes optou-se por fazer um terceiro teste realizando os mesmos procedimentos anteriormente citados para rotulação das classes, mas desta vez, com a imagem da 2ª quinzena de novembro de 2005, utilizando as 3 imagens fração geradas pelo MLME (vegetação, solo e água). A classificação automática para esta imagem rotulou 55 classes espectrais, os procedimentos realizados após o resultado bruto desta classificação foram os mesmos já citados anteriormente. Com as imagens MODIS e para a data escolhida para este teste tornou-se possível a classificação de parte do Litoral de forma condizente a realidade de campo. Já o mapeamento realizado por Weber *et al.*, (2007) com imagens Landsat, não possibilitou o mapeamento do litoral devido a presença de nuvens nesta região. O mesmo ocorreu com o trabalho realizado por D'Arco (2007) onde em suas conclusões o autor colocou que apesar dessas imagens apresentarem uma boa resolução para a realização deste tipo de trabalho, apresenta o inconveniente das imagens que apresentam cobertura de nuvens

serem descartadas. O algoritmo aplicado as imagens MODIS na classificação automática, gerou classes para o litoral norte do Estado, estas classes foram rotuladas como áreas de **arroz** com base em uma análise visual e levando-se em conta o conhecimento da região, salienta-se novamente que o processo para a análise de todas as 55 classes geradas a serem rotuladas como **arroz/não arroz** é um processo interativo e subjetivo, pois depende do conhecimento do usuário com relação ao comportamento espectral dos alvos de interesse. O melhor resultado obtido com este teste é mostrado na Figura 23, visto que os valores de área obtidos chegaram próximos aos divulgados pelos órgãos oficiais, responsáveis pelas estimativas de safras no Brasil e no Estado (IBGE/IRGA).

Com esta imagem, pode-se dizer que as áreas mapeadas ao norte do Estado, onde a ocorrência de lavouras de soja se fazem presentes na maior parte das regiões, foram poucas, bem menos do que nas demais datas testadas anteriormente. Na região da Campanha, onde as culturas de arroz e soja ocorrem concomitantemente, analisando os resultados obtidos e comparados com os demais testes feitos, pode-se dizer que esta metodologia permitiu mapear as áreas de arroz de forma satisfatória. Para a região do Litoral Norte, cabe ressaltar, que foi possível mapear áreas com cultivos de arroz. Pode-se afirmar isto quando analisamos alguns municípios cuja cultura do arroz irrigado é predominante, como exemplo Palmares do Sul, Mostardas e na região Sul, Santa Vitoria do Palmar, que é um importante município desta região responsável pelo cultivo desta cultura.

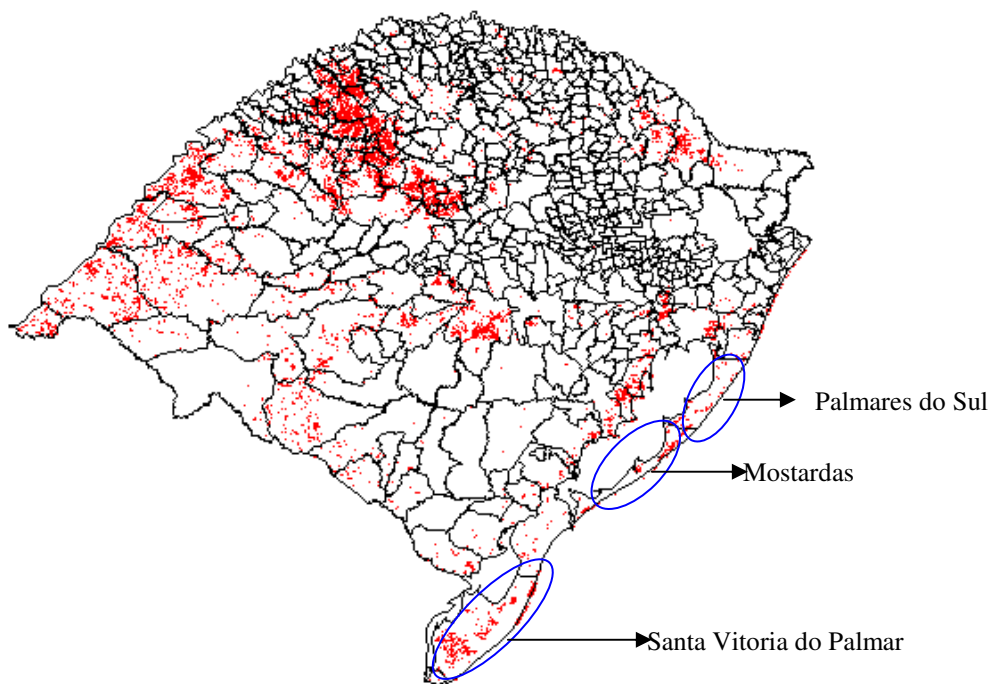


Figura 23: Imagem temática obtida a partir da classificação da imagem da 2ª quinzena de novembro/2005, com as 3 bandas do modelo linear de mistura espectral (vegetação, solo e água).

Avaliando os resultados obtidos com as quatro imagens utilizadas para a classificação automática de lavouras de arroz, a melhor data a ser utilizada é a da 2ª quinzena de novembro de 2005, com as três imagens fração geradas pelo MLME, cuja a discussão apresentada no próximo item, estão baseados no melhor resultado obtido, mostrado na Figura 23.

4.4. Estimativa de área cultivada com arroz irrigado

A área obtida com a classificação da imagem da 2ª quinzena de novembro/05, para a safra 2005/06 foi de 1.146.620.000 ha, aproximando-se dos dados oficiais divulgados pelo IBGE e IRGA que foram de 983.450.000 e 1.028.520.000 ha, respectivamente. Verifica-se uma diferença de estimativa de 11,5% em relação aos dados do IRGA e 16,6% em relação aos dados do IBGE, ambas para mais, conforme pode ser observado na Figura 24. Estes resultados são considerados satisfatórios levando-se em conta a metodologia adotada por estes órgãos para a divulgação das

estimativas de área e levando-se em conta que o resultado foi obtido com imagens de satélites.

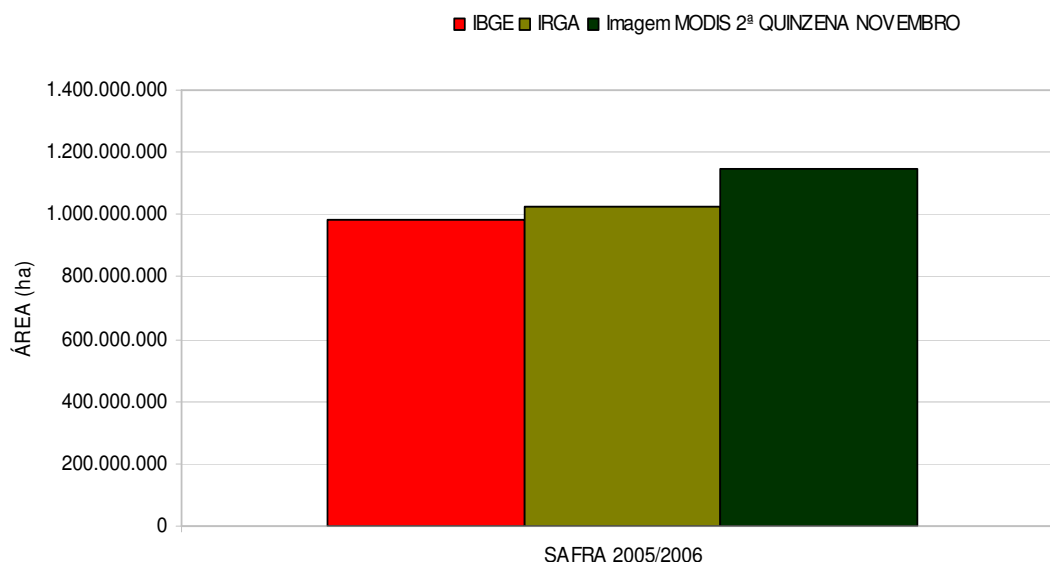


Figura 24: Área cultivada para a safra 2005/2006 com arroz irrigado no Rio Grande do Sul estimada pelo IBGE e partir da classificação da imagem MODIS da 2ª quinzena de novembro de 2005.

Na Figura 25 tem-se o resultado da classificação final da área cultivada com arroz irrigado, dado este considerado como o melhor resultado obtido quando comparado com os dados oficiais. Observa-se que com a imagem MODIS, foi possível classificar a área do Litoral, a área final chegou muito próximo dos dados oficiais, embora os valores obtidos com estas imagens tenham superestimado os oficiais.

As diferenças nos mapeamentos com imagens Landsat (Weber *et al.*(2007) e imagens MODIS podem ser explicadas com base na escala de mapeamento, que vem a ser o tamanho do *pixel* dos diferentes sensores. As imagens Landsat, cuja resolução espacial é de 30 m, abrangem uma área imageada menor, porém apresenta um maior detalhamento (Novo, 2007). Conseqüentemente, foi possível com imagens Landsat a classificação de mais áreas com a presença da cultura de arroz, agregando lavouras de menor tamanho. Já nas imagens MODIS a área imageada com é maior quando comparado com as imagens Landsat, , porém o nível de detalhamento da imagem é menor. Desta forma, os problemas de mistura espectral encontrados dentro de um mesmo *pixel*, em imagens MODIS são maiores, dificultando a identificação de alguns

alvos.. Por este motivo ao compararmos os resultados obtidos por Weber *et al.* (2007) observamos mais áreas mapeadas com arroz do que com o sensor MODIS.

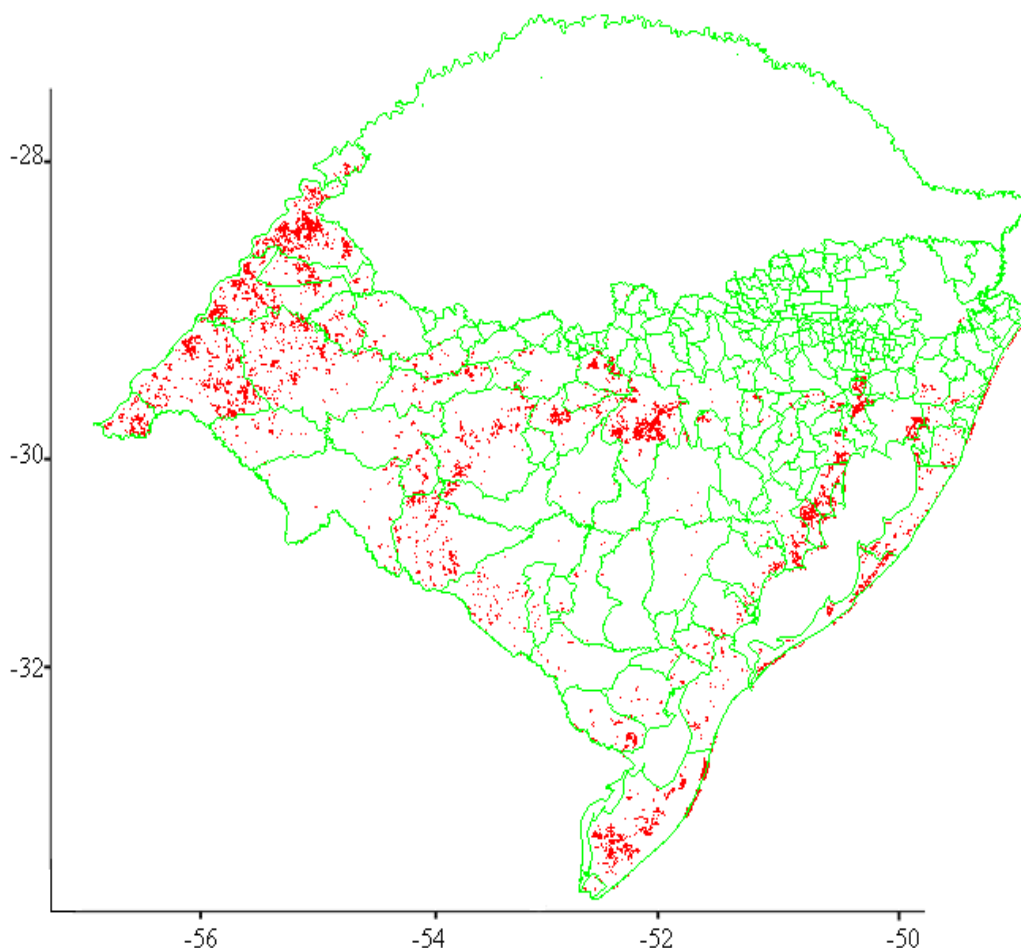


Figura 25: Resultado final da classificação automática mostrando a área de cultivo com arroz (em vermelho) no Estado do Rio Grande do Sul, na safra de 2005/2006.

Na Figura 26 tem-se a comparação entre os dados oficiais divulgados pelo IBGE e o mapeamento realizado com imagens Landsat e com imagens MODIS para alguns municípios grande produtores. É possível observar que a medida que é feita a comparação por município as respostas obtidas começam a gerar diferenças, maiores do que quando a comparação é feita em áreas mais extensas, por exemplo, nível estadual.

Para as diferenças encontradas podem ser levantadas algumas hipóteses, com base nas diferenças existentes entre os dois sensores aqui citados (TM e MODIS), baseando-se na resolução espacial. As imagens MODIS por apresentarem uma moderada resolução espacial (250 m), pode não ter possibilitado separar corretamente

as áreas de arroz com os demais cultivos de verão, o que com as imagens Landsat (30 m), a área estimada ficou próxima para todos os municípios analisados. Sendo assim, uma imagem MODIS permite um detalhamento menor da área observada, mas, por outro lado, permite abranger uma área maior (1200 km x 1200 km) e com uma maior frequência de revisita (2 dias), além de que o problema de nuvens pode ser descartado. Na Figura 24, a diferença encontrada com o dado MODIS para o município de São Borja, provavelmente pode ter ocorrido por uma confusão com alguma área de banhado, se levarmos em conta a época da imagem utilizada (1º quinzena de novembro), começo do ciclo da cultura de arroz. Esta confusão também foi identificada por D'Arco (2007), onde o autor coloca que o inconveniente de trabalhar com uma imagem do começo do ciclo da cultura pode causar confusões na resposta espectral, já que o cultivo de arroz se dá em áreas inundadas e nesta fase a resposta obtida pelo sensor é resposta espectral da água. Levando-se em conta que os demais municípios analisados mostraram valores próximos dos dados oficiais, pode-se dizer que a diferença encontrada com o dado do sensor MODIS para o município de São Borja, foi um dado pontual.

Com base nas características do sensor MODIS, já citadas anteriormente, é possível utilizar estas imagens para fins de estimativa de área cultivada, visto que muitas vezes a disponibilidade de imagens livres de nuvens são impeditivos para a realização do mapeamento de cultivos em extensas áreas, como é o caso das lavouras de arroz. Isto ocorreu no mapeamento feito por Weber *et al.*, (2007) na safra 2005/2006 no Rio Grande do Sul, quando toda a região litorânea não pode ser mapeado em função da indisponibilidade de imagens apropriadas. D'Arco (2007), quando utilizou as imagens Landsat para o ano safra de 2000/2001 e gerou um mapa temático que serviu de referência para as comparações com os dados oficiais e com as classificações automáticas geradas a partir de imagens MODIS, em seu trabalho, encontrou uma grande dificuldade em obter imagens livres de nuvens durante o período de cultivo de arroz.

Os municípios apresentados na Figura 25 foram escolhidos segundo o critério: i) grande volume de produção e ii) ausência de nuvens nas imagens Landsat. A nebulosidade em geral no Rio Grande do Sul não é problema para mapeamentos utilizando as imagens MODIS, já que o produto MOD13 utilizado nas análises é obtido a partir de uma composição de máximo valor de NDVI de 16 dias, o que permite selecionar os *pixels* nas imagens que não apresentam cobertura de nuvens. Sendo assim, a utilização de imagens MODIS para este tipo de trabalho torna-se possível, tendo em

vista que o problema de nuvens pode ser minimizado. Na Figura 27 é mostrada a localização destes municípios no Estado.

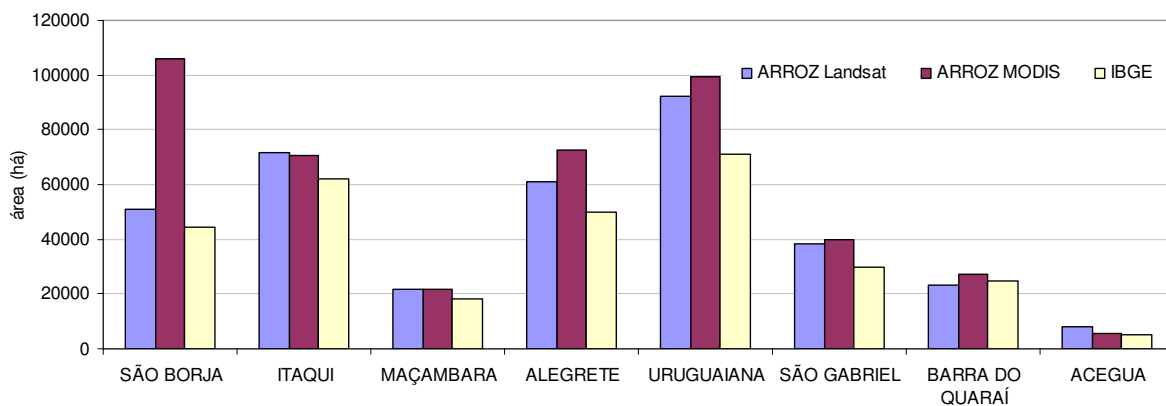


Figura 26: Área cultivada com arroz irrigado na safra 2005/2006, estimada pelo IBGE, Landsat e MODIS a partir da 2ª quinzena de novembro, os municípios apresentados são grandes produtores e apresentaram ausência de nebulosidade.

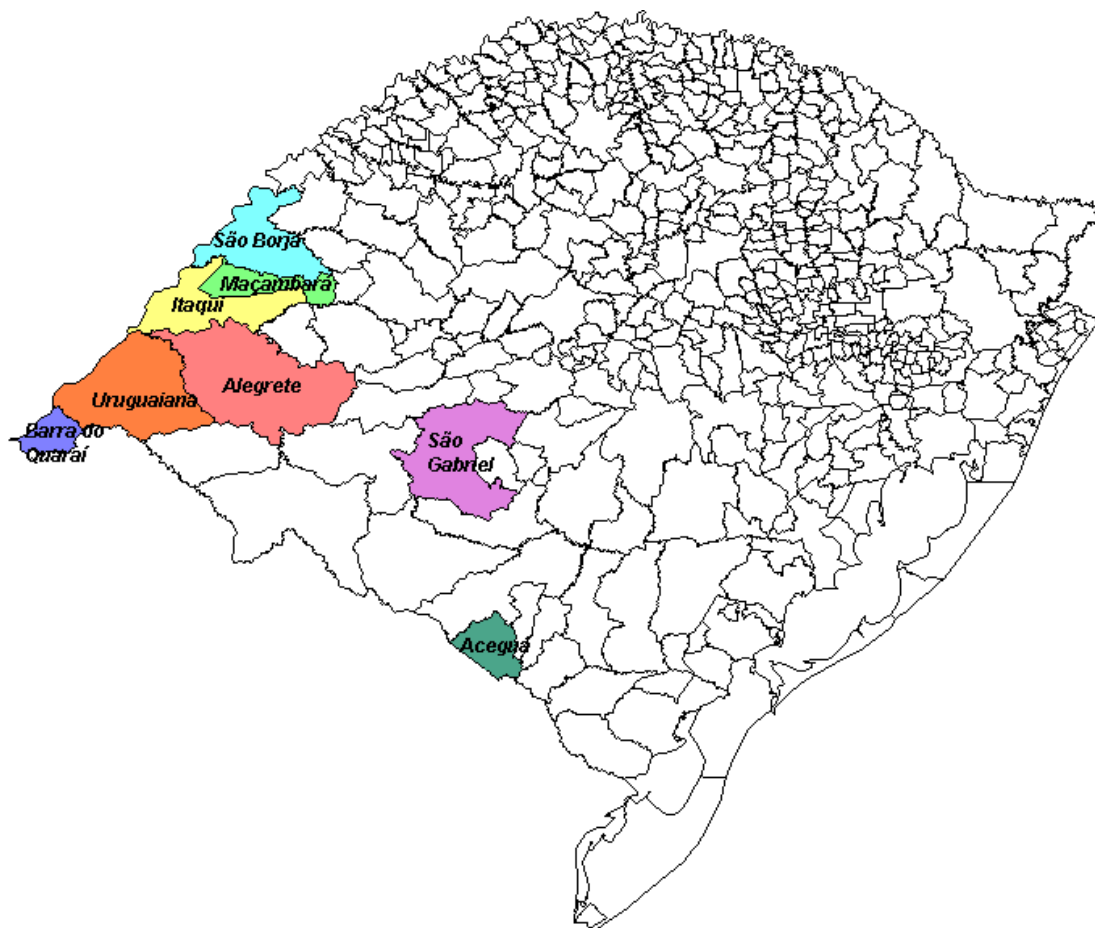


Figura 27. Localização dos municípios grande produtores da cultura de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul, utilizados para comparação dos dados obtidos com sensor TM-Landsat e MODIS.

5. Conclusões

A utilização das imagens MODIS mostra-se como uma alternativa viável, tendo em vista que a área estimada com arroz irrigado aproxima-se dos dados oficiais, tanto em nível regional quanto em nível municipal.

O uso das imagens-fração do modelo de mistura espectral para a classificação automática das áreas cultivadas com arroz é satisfatório, já que as imagens fração geradas permitem definir adequadamente as áreas de solo, vegetação e água.

É possível definir como a melhor data para a classificação automática destas áreas o momento de entrada de água na lavoura, levando-se em conta que neste momento a resposta espectral predominante nestas áreas é a da água. Entretanto, é necessário a realização de testes visando a minimização da confusão observada entre lavouras de arroz e áreas inundadas.

Dada a natureza do produto MODIS, problemas como a nebulosidade não constituem limitação à geração de um mapa para todo o Estado com as áreas de cultivo com arroz irrigado de forma rápida, objetiva e com baixo custo.

A utilização do aplicativo Spring versão 4.3.3 mostrou-se uma boa ferramenta para o desenvolvimento deste tipo de trabalho, é um software prático, de fácil manuseio e entendimento, embora a versão adotada tenha se mostrado um pouco lenta no momento de processamento das imagens, mas mesmo assim mostrou bons resultados. Versões mais atualizadas deste software podem ser encontradas no site <http://www.dpi.inpe.br/spring/>, podendo ser adquiridas de forma gratuita.

Recomendam-se, entretanto, novos testes para tornar possível a utilização operacional do modelo linear de mistura espectral para a estimativa da área cultivada com arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. A adoção da metodologia utilizada neste trabalho pode ser recomendada como mais uma ferramenta para auxiliar em programas de previsão e monitoramento de safras agrícolas, complementando os métodos convencionais utilizados atualmente na previsão de safras no Brasil.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, A. P. D.; SHIMABUKURO, Y. E.; MASCARENHAS, N. D. A. Use of synthetic bands derived from mixing models in the multispectral classification of remote sensing images. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 20, n. 4, p. 647-657, 1999.

ALMEIDA, T. S.; FONSECA, E. L.; FONTANA, D. C. Avaliação da influência da largura e posicionamento das bandas espectrais sobre o valor do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais ...** São José dos Campos: INEP, 2007.

ANDERSON, L. O. **Classificação e monitoramento da cobertura vegetal do Estado do Mato Grosso utilizando dados multitemporais do sensor MODIS**, 2004. 247 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004. Disponível em: <http://www.inpe.br/biblioteca>. Acesso em: 15 ago. 2008.

ARAI, E.; FREITAS, R. M. de.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Análise radiométrica de imagens MOD09 em 16 bits e 8 bits. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais ...** São José dos Campos: INEP, 2005. p. 3983-3990.

ARAI, E.; FREITAS, R. M. de. Pré – processamento. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Org) **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 425 p.

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

CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**, 4th ed. New York: Guilford Press, 2006. 625 p.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais**. Curitiba: Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, 2004. 209 p.

D'ARCO, E. **O uso de geotecnologias para estimativa da área plantada de arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul**. 2007. Tese (Doutorado - Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007. Disponível em: <http://mtc-m17.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/mtc>. Acesso em: 10 ago. 2008.

D'ARCO, E.; RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Análise de combinações dos índices de vegetação EVI e NDVI derivados do sensor MODIS para identificação de áreas de arroz irrigado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais ...** São José dos Campos: INEP, 2005. p. 91-93.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA, 1999. 412 p.

EMBRAPA. Disponível em: <http://www.embrapa.br/> Acesso em: dez/2007.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 127-132, 1997.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. The influence of spectral resolution on discriminating Brazilian sugarcane varieties. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 27, n. 4, p. 769-777, 2006.

GATES, D. M. et al. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, New York, v. 4, n. 1, p. 11-20, 1965.

GOMES, A. S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M. de. (Org.) **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004. 899 p.

GOMES, A. S.; PETRINI, J. A.; FAGUNDES, P. R. R. **Manejo racional da cultura do arroz irrigado**. Pelotas: EMBRAPA, 2004. 203 p.

INFELD, J. A.; SILVA, J. B. da; ASSIS, F. N. de. Temperatura – base e graus – dia durante o período vegetativo de três grupos de cultivares de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 187-191, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento sistemático da produção agrícola**. 2006. Disponível em: www.ibge.gov/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/. Acesso em: 05 maio 2007.

INSTITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ (IRGA). Disponível em: http://www.irga.rs.gov.br/index.php?action=pub_mapa. Acesso em: 08 set. 2007.

JUNGES, A. H.; PINTO, D. G.; FONTANA, D. C. Perfis temporais de NDVI de cereais de inverno no Rio Grande do Sul: uma comparação das coleções MODIS 4 e MODIS 5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais ...** São José dos Campos: INEP, 2009.

JUSTICE, C. O. et al. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 36, n. 4, p. 1228-1247, 1998.

KRELING, E. V. **Avaliação do uso de imagens MODIS na modelagem agrometeorológica – espectral de rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul**, 2007. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2007.

KRELING, E. V. et al. Relação entre os perfis temporais de NDVI/MODIS da cultura do arroz irrigado, a insolação e o rendimento na região da Campanha no Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais ...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 249-254. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.16.00.37/doc/249-254.pdf>. Acesso em: 16 out. 2008.

LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ANDERSON, L. O. Produtos para ecossistemas terrestres (MODLAND). In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Org.) **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 423 p.

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

MELLO, E. M. K. et al. Técnicas de modelo de mistura espectral, segmentação e classificação de imagens TM – Landsat para o mapeamento do desflorestamento da Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais ...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2807-2814. Disponível em: <http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.04.09.08>. Acesso em: 14 ago. 2008.

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. Technical specifications. Washington: NASA, 2003. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specs.html>. Acesso em: 10 nov. 2008.

MOREIRA, M. A. et al. Modelo de mistura espectral para identificar e mapear áreas de soja e milho em quatro municípios do estado de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9., 1998, Santos. **Anais ...** São José dos Campos: INPE, 1998. p. 53–58. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/02.09.10.30>. Acesso em: 14 ago. 2008.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005. 320 p.

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

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

MOTA, F. S. da. Influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre o rendimento e a necessidade de irrigação do arroz na região de Pelotas (RS). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 1.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 23., 1999, Pelotas. **Anais ...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p.169-172.

NASA Disponível em: <http://www.nasa.gov/missions/index.html>. Acesso em: abr/2008

NISHIYAMA, I. et al. Protecting effect of temperature and depth of irrigation water from sterility caused by cooling treatment at the meiotic stage of rice plant. **Proceedings of the Crop Science Society of Japan**, Tokio, v. 38, p. 554-555, 1969.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto – princípios e aplicações**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 363 p.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 425 p.

PINTO, L. F. S.; LAUS NETO, J. A. ; PAULETTO, A. E. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A. S., MAGALHÃES JUNIOR, A. M. de. (Org.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004. 899 p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 127 p.

RIZZI, R.; D'ARCO, E.; RUDORFF, B. F. Índice de vegetação para estimativa de área plantada com arroz irrigado. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Org.). **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 423 p.

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. Estimativa da área de soja no Rio Grande do Sul por meio de imagens Landsat. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 57, n. 3, p. 226-234, 2005. Disponível em: http://www2.prudente.unesp.br/rbc/pdf_57_2005/57_3_06.pdf. Acesso em: 12 out. 2007.

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. **Sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 425 p.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-square mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991.

SHIMABUKURO, Y. E. et al. **Detecção e mapeamento e áreas queimadas na Amazônia utilizando dados de resolução espacial moderada do sensor MERIS**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais ...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6961-6968.

SOARES, J. V.; BATISTA, G. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Histórico e descrição. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Org.). In: **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 423 p.

STEIMENTZ, S. Influência do clima na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: GOMES, A. S., MAGALHÃES JUNIOR, A. M. de. (Org.) **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004. 899 p.

STEINMETZ, S.; BRAGA, H. J. **Zoneamento agroclimático do arroz irrigado por épocas de semeadura no estado do Rio Grande do Sul**. Versão 3. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2001. 31p. (Embrapa Clima Temperado. Documento, 81).

STRAHLER, A. et al. **MODIS land cover product algorithm theoretical basis document (ATBD)**. Version 4.1. Washington: NASA, EOS-MTPE, 1996, 102 p.

TELLES, J.; SAMII, M. V.; DOLL, C. E. Overview of TDRSS. **Advances in space Research**, Oxford, v. 16, n. 12, p. 1267-1276, 1995.

TERRES, A. L. et al. **Arroz irrigado no Rio Grande do Sul: generalidades e cultivares**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. 58 p. (Embrapa Clima Temperado. Circular Técnica, 14).

WEBER, E. et al. Estimativa de área cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul na safra 2005/2006 através de imagens Landsat. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais ...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 465-472.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños: IRRI (International Rice Research Center), 1981. 269 p.