

# IDENTIFICAÇÃO E MAPEAMENTO DE ÁREAS DE CULTIVO DE SOJA EM FASES DE DESENVOLVIMENTO FENOLÓGICO DIFERENCIADO A PARTIR DA DINÂMICA ESPECTRAL DA CULTURA

ELÓI LENNON DALLA NORA<sup>1</sup>  
FABIO FERNANDES DA SILVA<sup>2</sup>

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Centro de Ciência do Sistema Terrestre<sup>1</sup>  
Divisão de Sensoriamento Remoto<sup>2</sup>  
eloi.dallanora@igbp.inpe.br  
fsilva@dsr.inpe.br

**RESUMO** - O presente trabalho teve como proposta avaliar a identificação e o mapeamento das áreas vinculadas ao cultivo de soja na região norte do Estado do Rio Grande do Sul. O estudo foi desenvolvido partir de dados multiespectrais do sensor TM/Landsat-5 e espectros de referência das diversas fases de desenvolvimento fenológico da cultura. O algoritmo de classificação supervisionada *Spectral Angle Mapper* (SAM) foi aplicado com sucesso em uma cena do sensor TM/Landsat-5 pré-processada. O procedimento adotado revelou-se eficiente em relação à capacidade de identificar em um único período áreas pertencentes a uma mesma classe mesmo sob condições de desenvolvimento diferenciadas. O processo de classificação permitiu verificar que 42,66% da área está associada ao cultivo da soja e que o algoritmo SAM apresenta grande potencial para estimativas de áreas de cultivo e produtividade de safras.

**ABSTRACT** - The objective of the present work was to evaluate, identify and map the area under soya bean cultivation in the northern region of the State of the Rio Grande do Sul. The study was developed based on multispectral data from the TM/Landsat-5 sensor and reference spectra of the various phases of phenological development of culture. The algorithm of supervised classification *Spectral Angle Mapper* (SAM) was applied successfully in one pre-processed TM/Landsat-5 sensor image. The procedure showed efficient capacity to identify in one period areas pertaining to one class, same under differentiated conditions of development. The classification process showed that approximately 42.66% of the area is under soya bean cultivation and that the SAM algorithm presents great potential to estimating the area under cultivation and the productivity of the crop.

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil, ao longo de sua história econômica apresentou vários momentos nos quais um determinado produto foi fundamental para um conjunto de transformações que influenciaram não só a economia, mas também a política, a sociedade, a demografia, a cultura e a ocupação e valorização de determinados espaços geográficos. Os ciclos da cana-de-açúcar e do café são, em relação a produtos agrícolas, os dois melhores exemplos (Dall’Agnol et al., 2008).

Na segunda metade do século XX, especialmente em suas três últimas décadas, um “novo” produto agrícola, a soja, foi responsável por profundas modificações no campo brasileiro. O crescimento da produção dessa oleaginosa foi tão expressivo desde a década de 1970, que colocou em pouco tempo o Brasil entre os maiores produtores e exportadores mundiais não

só da soja em grão, mas também de alguns de seus derivados (Dall’Agnol et al., 2008).

Na safra 2008/2009 a área de soja cultivada no Brasil foi de 21,73 milhões de hectares, 2% superior à área cultivada na safra passada. Esse incremento ocorreu basicamente nos principais estados produtores, como Mato Grosso, Goiás e Paraná (CONAB, 2009). No Estado do Rio Grande do Sul a área de cultivo estimada foi de 3,73 milhões de hectares e com uma expectativa de produção total de 7,67 milhões de toneladas que representam aproximadamente 13,44% da produção nacional (EMATER, 2009).

Estes valores, entretanto, representam apenas uma estimativa das áreas cultivadas e dos valores de produção. O monitoramento e previsão da safra da soja no Brasil, assim como das demais culturas, é tradicionalmente subsidiado a partir de dados oriundos de levantamentos empíricos realizados por entidades ligadas à produção

agrícola. Os dados coletados em nível municipal e estadual são posteriormente agrupados em toda a extensão do território nacional. Apesar da grande importância destes dados para a economia, na maioria das vezes a subjetividade na avaliação por entrevistas determina certo grau de incerteza nas informações geradas (Epiphanyo et al., 2002; Ippoliti-Ramilo et al., 2003)

Com base nestas dificuldades, nas últimas décadas diversas instituições públicas e privadas tem direcionado esforços para otimizar os trabalhos de estimativas de áreas cultivadas utilizando dados proveniente de sensores orbitais. As imagens de satélites obtidas por uma constelação de sensores remotamente situados com características variadas representam a base de todos os métodos propostos com objetivos de geoestimativas de áreas de cultivo (Huete et al., 2002; Lobell et al., 2003; Motta et al., 2003).

Os dados obtidos por sensoriamento remoto representam uma grande alternativa aos métodos tradicionalmente utilizados devido ao baixo custo e a velocidade com que estas informações podem ser disponibilizadas aos setores ligados ao agronegócio. Entretanto, as maiores dificuldades associadas a esta abordagem, além da ocasional presença de nuvens é a resolução espacial dos dados utilizados que são em alguns casos, quilométricas e as variações do calendário agrícola (Huete et al., 2002; Kastens et al., 2005; Xiao et al., 2002).

Trata-se de um verdadeiro dilema já que dados que apresentam uma resolução espacial melhorada possuem uma resolução temporal reduzida desfavorecendo o acompanhamento de todas as fases de desenvolvimento da planta. Como o calendário agrícola é diversificado mesmo em regiões muito próximas, muitas áreas podem ser subestimadas pela baixa frequência na obtenção de imagens. Já os sensores de alta resolução temporal, disponíveis atualmente, com períodos diários de revisita, a presença de nuvens passa a ser contornada, porém, a resolução espacial máxima é reduzida substancialmente devido à altitude do sensor. Esta condição apresenta sérias restrições de aplicação a determinadas regiões como o norte do Estado do Rio Grande do Sul (Doraiswamy et al., 2004).

Esta região, objeto deste estudo, representa a área de maior produção da cultura de soja do estado. Entretanto, trata-se de uma região marcada por propriedades relativamente pequenas, muitas das quais trabalhando em regime de economia familiar (Mantelli, 2000). Diante da heterogeneidade espacial das áreas de cultivo em função do tamanho das propriedades, da tecnologia empregada e do calendário agrícola diferenciado, os métodos de classificação demasiadamente utilizados atualmente apresentam dificuldade para discriminar diferentes culturas. Esta condição culmina em problemas de exatidão na quantificação de áreas que podem tornar estes métodos inviáveis ou apenas meras aproximações.

Entretanto, a utilização de um classificador automático de imagens orbitais de resolução espacial

melhorada capaz de quantificar áreas de cultivo de soja em diferentes estágios de desenvolvimento em um único período (cena) seria capaz de otimizar substancialmente este tipo de estudo e aumentar a confiabilidade das estimativas de áreas de cultivo. Neste caso, a alta resolução espacial das imagens permitiria identificar áreas de cultivo sob condições diferenciadas, mesmo em pequenas propriedades e a baixa resolução temporal do sensor seria compensada pela capacidade do algoritmo em mapear áreas em estágios fenológicos distintos.

Baseado nesta perspectiva, este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho do classificador supervisionado *Spectral Angle Mapper* na região norte do Estado do Rio Grande do Sul para o mapeamento da cultura da soja. Este algoritmo que utiliza dados espectrais dos alvos para discriminar uma classe específica foi subsidiado com espectros de referência de todas as fases de desenvolvimento fenológico da cultura da soja objetivando produzir uma estimativa da área de cultivo total em uma única passagem do sensor TM/Landsat-5.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Localização e descrição da área de estudo

Esta abordagem foi desenvolvida utilizando como base a área geográfica de oito municípios localizados na região norte do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1), representando uma área total de aproximadamente 410.598 hectares. Esta região está situada entre as coordenadas geográficas 27°34' e 28°17' de latitude sul e 54°03' e 52°54' de longitude oeste. Trata-se de uma área caracterizada como a maior produtora de soja do estado e apresenta um padrão similar na distribuição espacial das características físicas.

Na área de estudo o clima é classificado como mesotérmico e úmido sujeito a bruscas mudanças de tempo em qualquer época do ano. A temperatura média anual situa-se em torno de 18°C com amplitude térmica de cerca de 11°C. Apresenta uma precipitação média anual geralmente entre 1.800 e 2.100 mm, sendo bem distribuídos ao longo do ano (Eletrosul, 1979).

O relevo apresenta patamares estruturais modelado em rochas basálticas da formação Serra Geral. O basalto constitui a maior unidade geológica, apresentando-se disposto em seqüências de derrames sub-horizontais com espessura que varia de 300 a 1000 metros. Nesta área predominam latossolos profundos, porosos com condições adequadas para um bom desenvolvimento radicular em profundidade (Eletrosul, 1979).

### 2.2 Processamento e análise dos dados TM/Landsat-5

A cena do sensor TM utilizada no processo de identificação e classificação das áreas de cultivo de soja foi obtida na passagem do dia 04/02/2008. Neste período, na área de estudo as variedades de ciclo longo,

implantadas em grande parte durante o mês de novembro, encontram-se na fase de desenvolvimento máximo cobrindo completamente o solo. Entretanto, as variedades

tardias, implantada após a colheita das culturas de trigo ou milho primeira safra, encontram-se em fases iniciais de desenvolvimento fenológico.

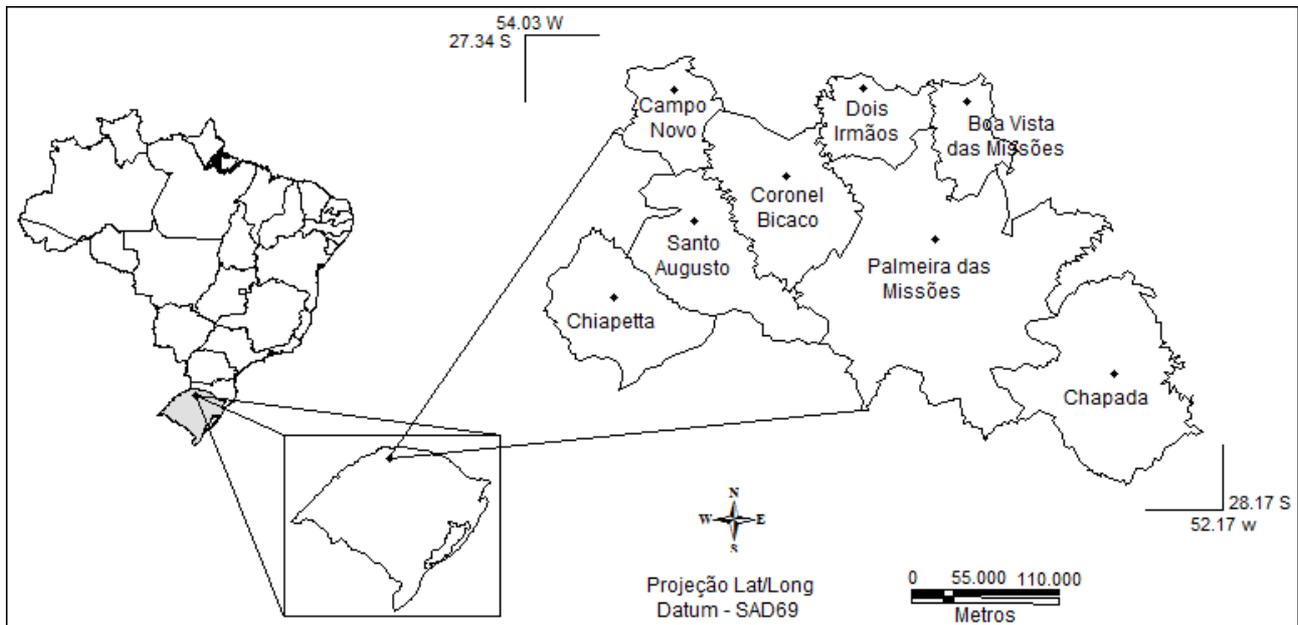


Figura – Localização da área de estudo.

Previamente aos processos de classificação da cena do sensor TM, os dados de radiância foram convertidos para valores de reflectância de superfície, portanto corrigidos dos efeitos de espalhamento e absorção atmosférica, com o auxílio do aplicativo Flaash-Correcting Multispectral Data, que tem como base o modelo de transferência radiativa MODTRAN.

O algoritmo de classificação supervisionada *Spectral Angle Mapper*, está implementado no software de processamento de imagens ENVI, versão 4.5 (Sulsoft, 2009). Este classificador espectral baseia-se na comparação do espectro da imagem com um espectro de referência, proveniente de bibliotecas espectrais ou de membros finais das imagens. A comparação é realizada por intermédio de um critério de similaridade, desta forma, a identificação do material procurado é feita segundo o ajuste obtido entre as duas curvas espectrais. Quanto melhor for o ajuste, maior será a probabilidade da existência do material de referência no pixel da imagem. Basicamente procura-se identificar a existência ou não do espectro de referência. A formulação matemática do SAM (Kruse et al., 1993) é oriunda da equação 1 sendo expressa na forma de ângulo em vez de porcentagem.

$$SAM = \alpha = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^{i=nb} ER_i EI_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=nb} (EI_i)^2 \sum_{i=1}^{i=nb} (ER_i)^2}}$$

(1)

Desta forma, temos que o valor do SAM é expresso em radianos, sendo que, quanto menor o ângulo  $\alpha$ , maior é a similaridade entre as curvas. O ângulo  $\alpha$ , determinado pela função arco-coseno apresenta uma variação entre 0° até 90°.

Neste trabalho utilizou-se a metodologia de Boardman e Kruse (1994) para a detecção dos membros de referência utilizados no processo de classificação. O procedimento pode ser dividido em três etapas: (a) redução da dimensão espectral (Minimum Noise Fraction - MNF) (Carvalho Júnior et al., 2002; Green et al., 1988), (b) redução da dimensão espacial (Purity Pixel Index - PPI), e (c) identificação manual (utilizando um visualizador n-dimensional). Essa metodologia visa eliminar os fatores redundantes, tanto espaciais como espectrais, que nada alteram o conjunto de soluções viáveis para os membros de referência.

A avaliação da confiabilidade do processo de classificação realizado foi obtida através da verificação das áreas mapeadas em campanhas de campo. Um trajeto de aproximadamente 800 km foram percorridos com o apoio de um GPS (Sistema de Posicionamento Global) de navegação mediante o qual pontos amostrais foram coletados e posteriormente tabulados em uma matriz de confusão para estimar o valor percentual de acurácia do mapeamento.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aspecto heterogêneo que caracteriza o padrão de distribuição espacial dos elementos da paisagem fica evidenciado pela presença de áreas de cultivo de soja em

fases de desenvolvimento fenológico distintos na imagem do sensor TM. O perfil espectral apresentado na figura 2 ilustra este padrão onde é possível observar as variações na dinâmica espectral exibida pelas variedades de cultivo de soja. Estas disparidades estão associadas às condições de plantio e manejo diferenciados e mais intimamente relacionadas às datas de cultivo variadas.

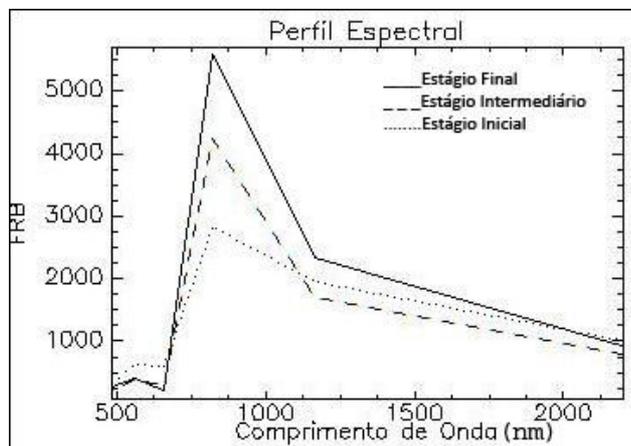


Figura 2 – Dinâmica espectral exibida pela cultura da soja nas diferentes fases de desenvolvimento fenológico na imagem do sensor TM/Landsat-5.

É possível observar que as maiores disparidades entre as diferentes fases de desenvolvimento das plantas se estabelecem na região do espectro eletromagnético situado entre o vermelho (660 nm) e o infravermelho próximo (820 a 1165 nm). Áreas em fase final de desenvolvimento (maturação) apresentam os valores mais baixos de reflectância na região do vermelho em função da absorção deste comprimento de onda principalmente pela clorofila durante o processo fotossintético. Neste estágio, o solo apresenta-se completamente coberto pela cultura, refletindo completamente a radiação eletromagnética situada na região do infravermelho próximo (820 nm), a qual as formações vegetais apresentam-se incapazes de absorver ou transmitir (Ponzoni e Shimabukuro, 2007).

Nas fases de desenvolvimento inicial e intermediário é possível observar variações graduais nos valores de reflectância. Estas variações são proporcionais a interferência do solo na resposta espectral de cada pixel. As áreas que apresentam um dossel esparsa, em função da fase de desenvolvimento, apresentam aumentos nos valores de reflectância na região do visível e reduções na região do infravermelho. Esta característica se manifesta em decorrência baixa disponibilidade de pigmentos fotossintetizantes (biomassa vegetal) e da interferência espectral do solo que tipicamente apresenta valores de reflectância superiores aos apresentados pelas formações vegetais.

A classificação por ângulo espectral das áreas de cultivo de soja obtida por meio de espectros de referência e do algoritmo *Spectral Angle Mapper* foi executada com um ângulo espectral máximo igual a 0,08 radiano. Esse

valor foi selecionado após serem testados diferentes valores angulares, maiores e menores, pelo fato de ser o de melhor resultado na delimitação das áreas de cultivo de soja identificadas visualmente na imagem. Isso significa que 0,08 radiano é o valor angular máximo aceitável entre o vetor definido pelos espectros de referência (amostras da classe) e o vetor definido pelo valor espectral do pixel que está sendo classificado. O resultado final deste processo pode ser analisado na figura 3.

Na área de estudo os resultados revelam que aproximadamente 175.160,78 hectares estão atualmente sendo utilizados para o cultivo de soja. Estes valores demonstram a importância desta cultura na matriz agrícola e no desenvolvimento econômico regional já que representa aproximadamente 42,66% da área total da paisagem.

A área estimada é composta por talhões em fases de desenvolvimento diferenciados, característica esta que realça a capacidade do classificador por ângulo espectral no monitoramento integral das áreas de cultivo. O procedimento adotado revela-se eficiente em relação a sua capacidade de identificar em um único período, áreas pertencentes a uma mesma classe mesmo sob condições de desenvolvimento diferenciadas. Além disso, observa-se que o algoritmo utilizado minimiza os efeitos de iluminação já que a intensidade de brilho não interfere no processo de classificação.

O bom desempenho apresentado pelo classificador SAM mesmo em locais com nível elevados de mistura espectral o revela como uma alternativa aos classificadores supervisionados e não supervisionados tradicionalmente utilizados. A mistura espectral, ocasionada pela fase de desenvolvimento da cultura e os demais elementos que constituem a reflectância média o pixel, torna muitos destes classificadores capazes de identificar com sucesso apenas culturas em estágios específicos (maturação) de desenvolvimento. Nesta condição torna-se necessário uma série de classificações multitemporais durante o ano-safra.

De acordo com LAMPARELLI et al., (2008), para a estimativa da área de cultivo de soja na região oeste do Estado do Paraná com base nos algoritmos de classificação “paralelepípedo” e “máxima verossimilhança” foram necessárias 6 imagens do sensor TM/Landsat-5 para a estimativa da área de cultivo no ano-safra avaliado. Esta condição de avaliação demanda tempo e trabalho tanto para classificações sucessivas como para a edição das séries de dados que acabam provocando atrasos na disponibilização dos dados e no planejamento do agronegócio.

Para esta abordagem, a resolução espacial do sensor TM permitiu a definição de membros de referência mais “puros” o que minimiza os efeitos associados à mistura espectral do pixel. Neste caso é importante ressaltar a existência de uma relação direta entre a consistência dos resultados obtidos e a qualidade dos dados orbitais utilizados, além dos pré-processamentos adotados.

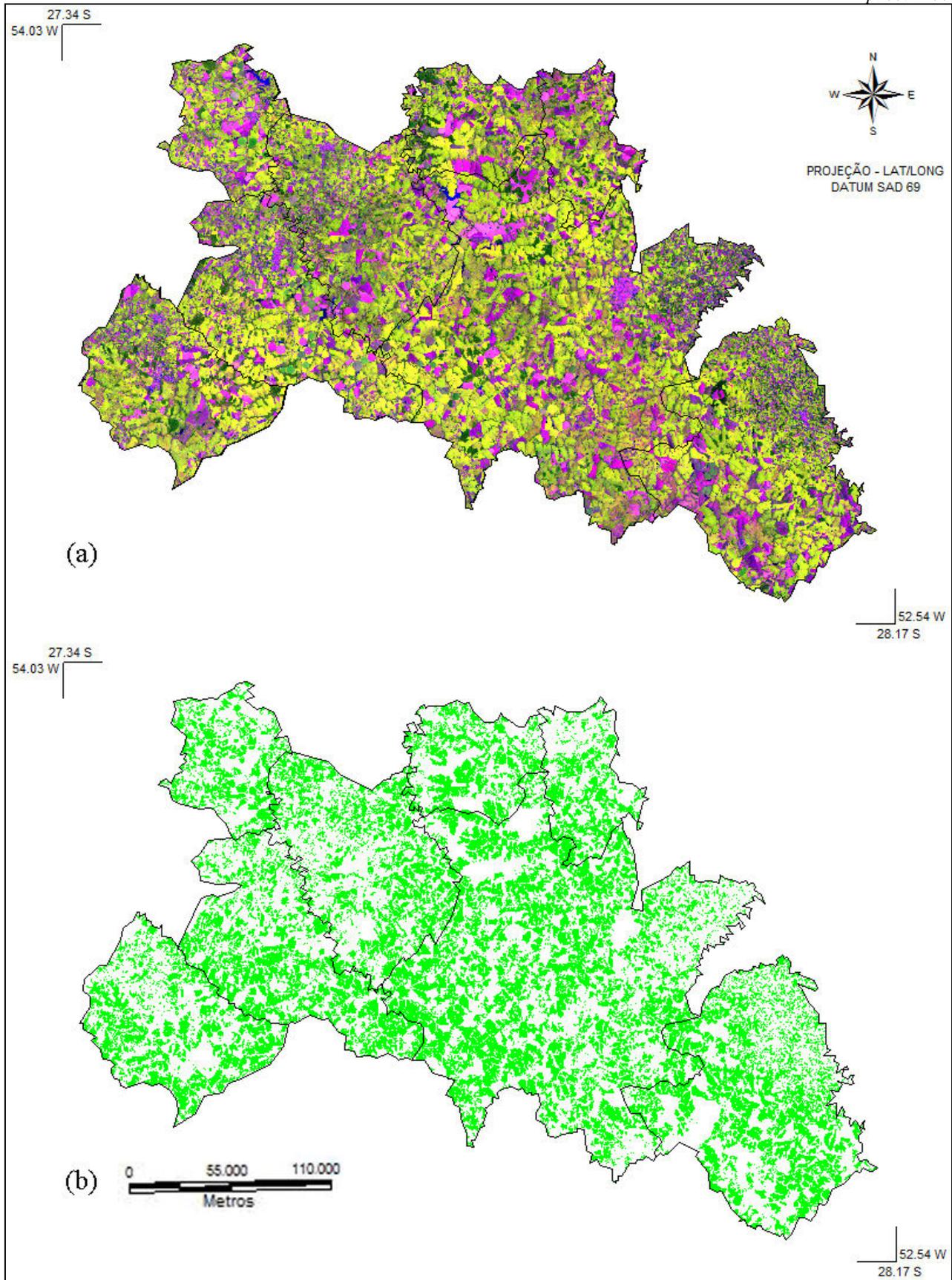


Figura 3 – Composição colorida falsa cor R(5)G(4)B(3) da cena do sensor TM/Landsat-5 (a) e distribuição espacial da classificação das áreas de cultivo de soja obtida pelo algoritmo *Spectral Angle Mapper* (b).

Diversos autores têm registrado as dificuldades de mapeamento de cultivares agrícolas na região sul do Brasil com sensores de resolução espacial mais grosseira devido ao tamanho das propriedades e das variações topográficas (Yi et al., 2007). Segundo estes autores, nestas regiões, a utilização de sensores de resolução espacial moderada são incapazes de fornecer estimativas precisas de áreas de cultivo em função das peculiaridades locais. Esta condição também foi registrada por Lamparelli et al., (2008), demonstrando valores inferiores na acurácia da classificação da soja utilizando imagens de resolução espacial moderada e classificadores supervisionados.

Entretanto, os resultados produzidos não apresentaram uma exatidão total, já que em alguns locais foram identificadas incompatibilidades na classificação (Tabela 1). A maior imprecisão ainda está associada às

áreas onde a cobertura do solo é muito esparsa e o comportamento espectral do solo sobrepõe ao espectro característico da cultura da soja no período em que a imagem foi obtida. Esta mistura espectral produzida configura-se como o fator mais restritivo, entretanto, na cena obtida pelo sensor TM em sua passagem seguinte este problema poderia ser minimizado.

A validação do método de classificação proposto para a identificação de áreas de cultivo de soja foi avaliada durante campanhas de campo realizados na área de estudo durante o mês de fevereiro de 2009. Embora a verificação de campo tenha sido realizada durante o ano-safra seguinte aos processamentos realizados, a área de estudo praticamente não apresentou grandes modificações em sua matriz agrícola, já que historicamente é caracterizada como um grande centro produtor da cultura da soja.

Tabela 1 – Matriz de confusão e correlação global obtida no processo de classificação.

Áreas de cultivo de soja		CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA		
		Cultivo Presente	Cultivo Ausente	TOTAL
C A M P O	Cultivo Presente	378	9	472
	Cultivo Ausente	12	51	28
	<b>TOTAL</b>	390	60	450

Durante as análises de campo foram coletados um total de 450 pontos amostrais distribuídos em todo o limite ocupado pela área de estudo. A matriz de confusão elaborada a partir destes dados e confrontados com os valores obtidos em laboratório revela uma acurácia global de 95,33% demonstrando uma alta correlação da carta apresentada na figura 3 em relação a sua distribuição espacial no campo.

#### 4 CONCLUSÃO

- 1) A resolução espacial/espectral oferecida pelo sensor TM/Landsat-5 permite a obtenção de perfis espectrais capazes de caracterizar estágios distintos de desenvolvimento fenológico da cultura da soja.
- 2) A utilização do algoritmo *Spectral Angle Mapper* com base em espectros de referência permite a identificação e mapeamento efetivo das áreas de cultivo de soja mesmo sob condições de manejo e desenvolvimento fenológico distintos.
- 3) O classificador por ângulo espectral, em comparação com os dados disponíveis na bibliografia, revela-se como uma alternativa com potencial ganho em relação as técnicas tradicionalmente utilizadas na estimativa de áreas de cultivo.
- 4) A metodologia apresentada é capaz de fornecer estimativas precisas a respeito das áreas de cultivo subsidiando em tempo hábil a elaboração de modelos de produtividade de safras e o planejamento do agronegócio.

#### REFERÊNCIAS

- DORAISWAMY, P.C.; HATFIELD, J.L.; JACKSON, T.J.; AKHMEDOV, B.; PRUEGER, J.; STERN, A. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, n.4, p.548-59, 2004.
- ELETROSUL-Centais Elétricas do Sul do Brasil-SA. **Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai: Estudo de Inventário Hidroenergético**. CNEC. Apêndices I e II. 1979.
- EMATER. **Relatório de acompanhamento da safra 2008/2009 no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da agricultura, pecuária, pesca e do agronegócio, 2009. 7p. (Boletim Técnico, 3).
- EPIPHANIO, J.C.N.; LUIZ, A.J.B.; FORMAGGIO, A.R. Estimativa de áreas agrícolas municipais utilizando sistema de amostragem simples sobre imagens de satélite. **Bragantia**, v.61, n.2, p.187-97, 2002.
- GREEN, A.A.; BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M.D. A transformation for ordering multispectral data in terms of images quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.26, n.1, p.65-74, 1988.
- HUETE, A.R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v.83, n.2, p.195-213, 2002.

- IPPOLITI-RAMILO, G.A.; EPIPHÂNIO, J.C.N.; SHIMABUKURO, Y.E. Landsat 5 thematic mapper data for pre-planting crop area evaluation in tropical countries. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n.7, p.1521-1534, 2003.
- KASTENS, J.H.; KSTENS, T.L.; KSTENS, D.L.A.; PRICE, K.P.; MARTINKO, E.A.; LEE, R.Y. Image masking for crop forecasting using AVHRR NDVI time series imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.99, n.3, p.341-356, 2005.
- KRUSE, F.A., LEFKOFF, A.B., BOARDMAN, J.W., HEIEDBRECHT, K.B., SHAPIRO, A.T., BARLOON, P.J., GOETZ, A.F.H. The spectral image processing system (SIPS) – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, vol. 283, n. 2, p.145-163, 1993.
- LAMPARELLI, R. A. C.; CARVALHO, W. M. O.; MERCANTE, E. Mapeamento de semeaduras de soja mediante dados Modis/Terra e TM/Landsat-5: Um comparativo. **Revista Engenharia Agrícola**. v.28, n.2, p.334-344, 2008.
- LOBELL, D.B.; ASNER, J.I.; ORTIZ-MONASTERIO, J. I.; BENNING, T.L. Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.94, n.2, p.205-20, 2003.
- MANTELLI, J. **Evolução e tendências do setor agrário na região noroeste do Estado de Rio Grande do Sul: uma proposta de análise**. 2000. 202f. Tese (Doutorado em Geografia Humana) - Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- MOTTA, J. L. G.; FONTANA, D. C.; WEBER, E. Evolução temporal do NDVI/NOAA em áreas cobertas por pixels com proporções variáveis de soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v.11, n.2, p.353-369, 2003.
- PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. 1.ed. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 128p.
- SULSOFT PROCESSAMENTO DE DADOS. **Guia do ENVI em português**. Versão 4.5. Porto Alegre. Disponível em: <http://www.envi.com.br>. Acesso em: 15 jun. 2009.
- XIAO, X.; BOLES, S.; FROLKING, S.; SALAS, W.; MOORE, B.; LI, C.; HE, L.; ZHAO, R. Landscape-scale characterization of cropland in China using VEGETATION sensor data and Landsat TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.18, p.3579-3594, 2002.