

Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agrônomo para estimar a produtividade de soja

Rodrigo Rizzi⁽¹⁾ e Bernardo Friedrich Theodor Rudorff⁽¹⁾

⁽¹⁾Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Sensoriamento Remoto, Av. dos Astronautas, nº 1758, CEP 12227-010 São José dos Campos, SP. E-mail: rizzi@dsr.inpe.br, bernardo@dsr.inpe.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi estimar a produtividade de soja no Rio Grande do Sul, nas safras de 2000/2001 a 2002/2003, por meio de um modelo agrônomo implementado em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Duas abordagens foram utilizadas: o modelo agrônomo (AGRO), com valores de índice de área foliar (IAF) obtidos da literatura; e o modelo agrônomo-espectral (AGROESPEC), com valores de IAF estimados a partir das imagens MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer). As estimativas de produtividade obtidas pelo modelo foram comparadas àquelas fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com o uso do teste t para pares de observação. Nas safras 2000/2001 e 2001/2002, não foram observadas diferenças significativas. Para 2002/2003, o modelo subestimou o valor de produtividade em 7,87 e 7,04%, nas abordagens AGRO e AGROESPEC, respectivamente, em comparação à produtividade fornecida pelo IBGE. Ambas as abordagens do modelo permitiram avaliação objetiva e quantitativa do efeito das condições meteorológicas sobre a produtividade de soja. Entretanto, o AGROESPEC forneceu estimativas mais detalhadas, no que se refere à variação espacial da produtividade, em razão do emprego dos valores de IAF estimados a partir das imagens MODIS.

Termos para indexação: estatísticas agrícolas, modelagem, sensoriamento remoto, índice de área foliar.

MODIS sensor images associated with an agronomic model to estimate soybean grain yield

Abstract – The objective of this work was to estimate soybean yield in Rio Grande do Sul State, Brazil, for crop years of 2000/2001 to 2002/2003 through an agronomic crop yield model implemented in a geographic information system (GIS). Two approaches were used: an agronomic model (AGRO), with leaf area index (LAI) obtained from literature, and an agronomic-spectral model (AGROESPEC), with LAI estimated from MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) images. Results were compared with the official estimates provided by Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), using the t test for paired observations. For crop years 2000/2001 and 2001/2002, there were no significant differences. For 2002/2003, AGRO and AGROESPEC approaches underestimated the yield in 7.87 and 7.04%, respectively, in relation to the official data provided by IBGE. Both approaches allowed a practical and quantitative evaluation of weather effects on soybean yield. However, the AGROESPEC provided more detailed estimates, in terms of soybean yield spatial variation, due to the use of LAI values from MODIS images.

Index terms: agricultural statistics, modeling, remote sensing, leaf area index.

Introdução

No Brasil, as estimativas oficiais de produtividade agrícola são realizadas predominantemente de forma subjetiva, por meio de entrevistas aplicadas aos produtores, informações sobre a venda de insumos, análise de safras passadas, observação das condições meteorológicas, entre outros, o que não permite uma análise apurada dos erros envolvidos e dá margem a especulações. Assim, torna-se crescente a demanda por

métodos objetivos para obtenção dessas estimativas, que relacionem a variação meteorológica aos fatores que afetam o desenvolvimento das culturas agrícolas e sua produtividade.

Estudos que envolvem estimativas de produtividade vêm sendo desenvolvidos com uso de dados agrometeorológicos, associados ou não às imagens de sensoriamento remoto (SR), por meio de modelos agrônomo (Rudorff & Batista, 1990, 1991; Mo et al., 2005). Para que os modelos possam gerar prognósticos

em grandes regiões e viabilizem sua aplicação em escalas estadual ou nacional, é fundamental a sua associação aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (Hartkamp et al., 1999). Berka et al. (2003) propuseram um modelo agronômico para monitoramento e estimativa da produtividade de soja, implementado em um SIG, que pode ser empregado em qualquer região, pela substituição das variáveis de entrada.

Uma variável relevante na estimativa da produtividade agrícola por meio de modelos é o índice de área foliar (IAF) (Dorayswamy et al., 2004), que reflete as condições de crescimento impostas pelo efeito conjunto das variáveis agrometeorológicas e de cultivo, ao longo do ciclo da cultura. Como as alterações no IAF são manifestadas na reflectância espectral dos dosséis agrícolas, este índice pode ser estimado para grandes regiões por meio de imagens de SR (Myneni et al., 1997).

Com o advento do sensor MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer), a bordo dos satélites Terra e Aqua, observou-se uma grande melhoria na qualidade das imagens de SR, em especial no que diz respeito às correções geométrica e atmosférica, além de um significativo aumento da resolução espacial, em comparação às imagens do sensor AVHRR (advanced high resolution radiometer), até então utilizadas (Liu & Kogan, 2002; Melo et al., 2003). A disponibilidade gratuita e ininterrupta das imagens MODIS abre novas possibilidades para o uso das imagens de SR em modelos de estimativa de produtividade de culturas agrícolas.

O objetivo deste trabalho foi estimar a produtividade de soja no Rio Grande do Sul, nas safras de 2000/2001 a 2002/2003, por meio de um modelo agronômico implementado em um SIG, a fim de se verificar a contribuição dos valores de IAF, calculados a partir das imagens do sensor MODIS.

Material e Métodos

Foram utilizadas duas abordagens: um modelo agronômico (AGRO), com valores de IAF obtidos da literatura, e um modelo agronômico-espectral (AGROESPEC), com valores de IAF estimados a partir das imagens do sensor MODIS do satélite TERRA.

A área teste escolhida como estudo de caso localiza-se no Estado do Rio Grande do Sul, entre 27°03'S e 30°13'S e 50°40'W e 56°20'W, e abrange 322 municípios (117.628 km²), que produzem, aproximadamente, 90% da soja do Estado (IBGE, 2003).

A produtividade da soja nas safras de 2000/2001 a 2002/2003 foi estimada por meio de um modelo

agronômico implementado ao SIG do aplicativo SPRING (sistema de processamento de informações georreferenciadas) (Câmara et al., 1996).

O modelo agronômico, baseado no relatório nº 33 da FAO (Food and Agriculture Organization), de Doorenbos & Kassam (1979), emprega as variáveis temperatura média do ar (°C), velocidade do vento a 2 m de altura (km dia⁻¹), umidade relativa do ar (%), insolação (horas dia⁻¹) ou radiação solar (cal cm⁻² dia⁻¹) e precipitação pluvial (mm dia⁻¹).

Os dados das variáveis meteorológicas, necessários ao modelo, foram coletados em 20 estações meteorológicas, do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) e da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Sul (Feprago). Os dados diários das estações meteorológicas foram organizados em médias quinzenais, salvo os de precipitação pluvial, que foram somados quinzenalmente. Em seguida, esses dados foram espacializados, tendo-se considerado uma grade regular de 1x1 km e uma interpolação espacial, pelo método da média ponderada por quadrante, disponível no aplicativo SPRING (Câmara et al., 1996). Desta forma, todas as variáveis foram representadas por meio de uma grade regular (matriz) em que cada célula (pixel) correspondia a uma área de 1x1 km no terreno.

O modelo calculou, então, a produtividade da soja para cada célula a cada 15 dias, desde a sua implantação até a senescência da planta. A produtividade final foi resultado do somatório das produtividades parciais.

Outros dados necessários ao modelo foram: altitude e capacidade de armazenamento de água disponível no solo (CAD). A altitude foi obtida do modelo digital de elevação global (GTOPO, Global Digital Elevation Model), disponibilizado pelo Eros Data Center-USGS. A CAD foi estimada com base num mapa de classificação de solos, na escala de 1:750.000 (Brasil, 1973), em que os valores de CAD (50, 70 ou 100 mm m⁻¹) foram atribuídos para cada classe pedológica, de acordo com Embrapa (1999) e Farias et al. (2000).

O cálculo da produtividade pelo modelo agronômico foi feito por meio de duas abordagens: AGRO e AGROESPEC.

A abordagem AGRO utilizou valores de IAF obtidos da literatura (Fontana et al., 1992). Neste caso, o plano de informação do SIG, referente ao IAF, apresenta o mesmo valor para toda a área de estudo, numa determinada quinzena, conforme apresentado na Tabela 1.

A abordagem AGROESPEC fez uso dos valores de IAF, estimados a partir das imagens NDVI (normalized difference vegetation index) (Rouse et al., 1974), do sensor MODIS do satélite TERRA, que recobre o globo terrestre diariamente e, a cada 16 dias, completa um ciclo de imageamento. As imagens NDVI foram compostas em períodos de 16 dias, compostas pelos pixels de melhor qualidade radiométrica e geométrica observados em cada ciclo (produto MOD13Q1, coleção 4), desde o início da semeadura, em outubro, até o fim da colheita, em abril, para as safras de 2000/2001 a 2002/2003. Neste caso, os valores de IAF podem variar de célula (ou pixel) para célula, em função do valor de NDVI de cada célula das imagens MODIS. As imagens NDVI do MODIS têm resolução espacial de 250x250 m e foram reamostradas para 1x1 km, para serem compatibilizadas com a resolução espacial das demais variáveis empregadas no modelo.

Entre os produtos gerados a partir das imagens MODIS, disponibilizados gratuitamente pela NASA, está o IAF (MOD15A2, coleção 4). Entretanto, Rizzi et al. (2006) observaram que durante o período de máximo desenvolvimento vegetativo da soja, os valores de IAF do MODIS apresentam uma elevada porcentagem de valores inválidos, o que impediu o uso deste produto no AGROESPEC. Assim, o cálculo do IAF foi feito a partir das imagens NDVI do MODIS e consiste, primeiramente, na sua transformação em fração da cobertura do solo, pelo método proposto por Choudhury et al. (1994):

$$F_c = 1 - [(NDV_{Imax} - NDVI)/(NDV_{Imax} - NDV_{Imin})]^{0,6} \quad (1)$$

em que: F_c é a fração do solo coberto pela cultura; NDV_{Imax} é o valor máximo do NDVI da imagem; NDV_{Imin} é o valor mínimo do NDVI da imagem; $NDVI$ é o valor do NDVI da célula a ser contabilizada. O IAF é estimado por:

$$IAF = -2\ln(1 - F_c).$$

O IAF estimado para cada célula de 1x1 km (pixel) é utilizado no modelo para o cálculo do fator de compensação de crescimento (F_{cc}), proposto por Doorenbos & Kassam (1979) como:

$$F_{cc} = 0,515 - e^{(-0,664 - 0,515IAF)}.$$

Além da estimativa do IAF, as imagens NDVI do MODIS foram utilizadas para determinar o período mais adequado para o cálculo da produtividade pelo modelo. Para tanto, as imagens MODIS da safra 2000/2001 foram associadas a um mapa temático referente à área plantada com soja nesta mesma safra (Rizzi & Rudorff, 2005), com o fim de se determinarem os valores médios do NDVI para a soja, ao longo da safra, em toda a região de estudo. A época destinada à implantação da cultura no Rio Grande do Sul é da segunda quinzena de outubro até meados de dezembro, embora o período preferencial seja novembro. A colheita se estende de março ao início de maio. Por isso, fez-se necessário adequar o modelo às condições médias da região, em relação às datas de semeadura e colheita.

Após a obtenção das variáveis de entrada para o modelo, definiram-se como parâmetros: o coeficiente de cultura (k_c), que expressa a relação entre a evapotranspiração máxima da cultura e a evapotranspiração de referência; o fator de resposta à produtividade (k_y), que diz respeito à resposta da vegetação à disponibilidade hídrica e descreve a diminuição relativa da produtividade, em função da diminuição da evapotranspiração (Doorenbos & Kassam, 1979); e a profundidade do sistema radicular (D) da cultura, que interfere na capacidade de aproveitamento da água disponível no solo e, conseqüentemente, na produtividade final, conforme a Tabela 1.

Além destes, o fator de produtividade agrícola (FPA) ou índice de colheita, que relaciona a produtividade agrícola com a fitomassa seca total, é o parâmetro que mais afeta o valor da produtividade. O FPA da soja está entre 30 e 40%, ou seja, do total de fitomassa seca da

Tabela 1. Coeficiente de cultura (k_c), fator de resposta à produtividade (k_y), profundidade do sistema radicular (D) e índice de área foliar (IAF) para a cultura da soja, utilizados no modelo de produtividade em cada quinzena⁽¹⁾.

Variável	Quinzena								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
k_c	0,62	0,90	1,14	1,32	1,44	1,44	1,38	1,20	1,08
k_y	0,20	0,30	0,50	0,90	0,90	0,90	1,00	1,00	1,00
D (m)	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,60	0,75	0,75	0,75
IAF (m^2)	0,11	0,77	2,20	3,30	5,50	6,90	5,50	3,85	1,10

⁽¹⁾ Adaptado de Doorenbos & Kassam (1979) para k_c , k_y e D , e de Fontana et al. (1992) para IAF.

planta, 30 a 40% correspondem aos grãos (Doorenbos & Kassam, 1979). Os valores de FPA foram ajustados, empiricamente, em 30,02% para a abordagem AGRO e em 35,67% para a abordagem AGROESPEC, tendo-se utilizado os dados da primeira safra (2000/2001). O FPA da abordagem AGROESPEC foi superior ao da abordagem AGRO, pois os valores de IAF calculados a partir das imagens MODIS/NDVI foram inferiores aos obtidos da literatura. Além disso, pequenas alterações foram feitas nos valores dos parâmetros do modelo, até que fosse alcançado o melhor ajuste dos valores de produtividade estimados pelos modelos, em comparação aos fornecidos pelo IBGE. Uma vez efetuado o ajuste de seus parâmetros, os modelos foram mantidos inalterados para a estimativa da produtividade nas safras seguintes.

Para o cálculo da produtividade, utilizou-se um mapa temático de áreas de soja, gerado a partir da classificação digital e interpretação visual de imagens dos satélites Landsat-5 e Landsat-7, na safra 2000/2001 (Rizzi & Rudorff, 2005), para garantir que somente as áreas com soja fossem utilizadas no cálculo da produtividade. Posteriormente, foi calculada as médias da produtividade da soja em cada município, transcritas em Rizzi (2004) e, também, para toda a área de estudo.

Um aspecto a ser considerado na avaliação dos resultados está relacionado à imprecisão das estimativas de área e de produtividade da soja, fornecidas pelo IBGE. Supõe-se que os valores de produção de soja, informados pelo IBGE, ao final de cada safra, estejam muito próximo da realidade e possam ser utilizados como dado de referência. Entretanto, o valor da produtividade informada pelo IBGE pode apresentar erros, se o valor da área plantada estiver incorreto, conforme constatado por Rizzi (2004). No presente estudo, os dados de produtividade do IBGE foram ajustados em função do valor de produção final, informado pelo IBGE, e do valor de área plantada estimado por Rizzi (2004), para cada ano/safra, conforme a Tabela 2. Os novos valores de produtividade ajustados foram utilizados como dado de

referência, na avaliação do resultado das abordagens AGRO e AGROESPEC, pelo teste t para pares de observação (Steel & Torrie, 1980), em que se verificou a variância das diferenças entre as observações.

Resultados e Discussão

A Figura 1 mostra a evolução temporal do NDVI sobre a soja na área de estudo, na safra 2000/2001. Percebe-se que a variação do NDVI está relacionada aos diferentes estádios fenológicos da soja. Baixos valores de NDVI foram observados durante os meses de novembro e abril, coincidentes, respectivamente, com o estabelecimento e a senescência da cultura.

O rápido incremento dos valores a partir de dezembro demonstra a sensibilidade do NDVI ao acréscimo da fitomassa, por ocasião da fase inicial do ciclo da cultura. A tendência à estabilização manifestada a partir de fevereiro, quando a soja ainda apresentava considerável incremento no IAF, comprova a perda de sensibilidade do NDVI ao acréscimo de fitomassa em estádios fenológicos mais avançados, embora os valores mais altos de NDVI coincidam com o período de maior desenvolvimento das plantas. O decréscimo abrupto dos valores de NDVI, a partir de março, expressa a diminuição da fitomassa verde da soja no final do ciclo. Assim, o período definido para o cálculo da produtividade da soja, pelas abordagens AGRO e AGROESPEC, para as três safras estudadas, compreendeu desde a segunda quinzena de novembro até o final de março, num total de nove quinzenas (135 dias).

Os valores de produtividade, em nível estadual, estimados pelas abordagens AGRO e AGROESPEC, e a sua comparação frente aos valores de produtividade do IBGE ajustado, para cada safra analisada, estão apresentados na Tabela 3. Os valores em nível municipal estão transcritos em Rizzi (2004).

As safras 2000/2001 e 2002/2003 apresentaram condições meteorológicas propícias ao cultivo da soja, o

Tabela 2. Produção, área plantada estimada pelo IBGE e por Rizzi (2004), e produtividade estimada pelo IBGE e ajustada em função da área plantada, para a cultura da soja, no Rio Grande do Sul, safras de 2000/2001 a 2002/2003.

Safra	Produção (t)		Área (ha)		Produtividade (kg ha ⁻¹)	
	IBGE (a)	IBGE (b)	Rizzi (2004) (c)	IBGE(a/b)	IBGE ajustado (a/c)	
2000/2001	6.538.776	2.773.498	2.492.880	2.358	2.623	
2001/2002	5.113.385	3.016.602	2.791.253	1.695	1.832	
2002/2003	8.646.918	3.225.462	2.985.409	2.680	2.896	

que resultou em alta produtividade. Em 2001/2002, registraram-se prolongados períodos de estiagem, em estádios críticos do ciclo fenológico das plantas, o que implicou em perdas muito significativas na produtividade da cultura. No que tange ao desempenho do modelo, na safra 2000/2001, as duas abordagens, AGRO e AGROESPEC, retornaram praticamente o mesmo valor de produtividade do IBGE ajustado, não tendo havido diferença significativa entre as médias das estimativas ($t = 0,03$) (Tabela 3). Em 2001/2002, a AGROESPEC também foi eficiente na estimativa da produtividade, cujo valor foi apenas 6 kg ha^{-1} (0,32%) inferior ao do IBGE ajustado. A abordagem AGRO retornou um valor de produtividade 61 kg ha^{-1} (3,33%) inferior ao do IBGE ajustado. Entretanto, não houve diferença significativa entre a média das estimativas de ambas

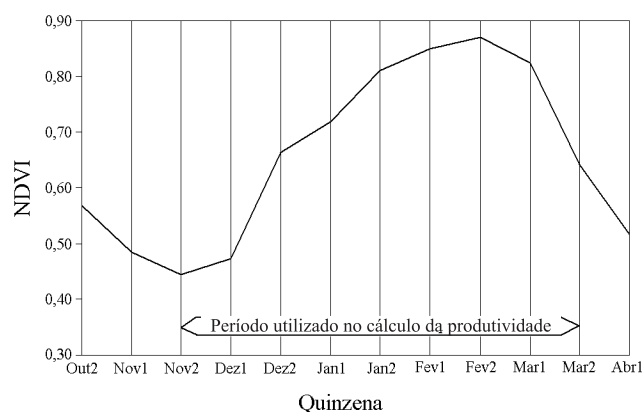


Figura 1. Perfil temporal do MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer)/NDVI (normalized difference vegetation index) para a média das áreas com soja, durante a safra 2000/2001 e o período selecionado para o cálculo da produtividade.

as abordagens e aquela estimada pelo IBGE ajustada (Tabela 3).

Para a safra 2002/2003, ambas as abordagens retornaram valores de produtividade significativamente diferentes dos valores do IBGE ajustados (Tabela 3). Apesar da subestimativa da produtividade em 2002/2003, é interessante notar que ambas as abordagens conseguiram acompanhar a tendência das variações da produtividade, observadas nas três safras estudadas. Isto indica que o modelo agrônomo, independentemente da abordagem utilizada, tem sensibilidade e pode auxiliar na estimativa da produtividade da soja em um sistema operacional de estimativa de safra, principalmente no que se refere ao impacto das condições meteorológicas.

A Figura 2 apresenta os mapas de produtividade, produzidos por ambas as abordagens do modelo para as safras de 2000/2001 a 2002/2003, e pela divisão política municipal. Cabe lembrar que somente as áreas com soja foram computadas no cálculo da produtividade final, o que explica as regiões em branco nos mapas de produtividade. Em 2000/2001, a maioria dos talhões de soja apresentou produtividade superior a 2.400 kg ha^{-1} . Apesar disso, na parte centro-sul da área de estudo, observaram-se alguns talhões com produtividade entre 2.201 e 2.400 kg ha^{-1} . Talhões com produtividade inferior a 2.201 kg ha^{-1} foram pouco frequentes, em consequência das condições meteorológicas favoráveis ao longo dessa safra.

Na safra 2001/2002 notou-se uma drástica redução da produtividade, em toda a área de estudo, em comparação à safra 2000/2001, provocada pela forte estiagem ocorrida no Estado. Nesta safra, foram constatados poucos talhões, onde a produtividade esteve acima de 1.901 kg ha^{-1} . Na maioria dos talhões, a

Tabela 3. Produtividade estimada pelas abordagens AGRO e AGROESPEC e teste de significância, em comparação à produtividade do IBGE ajustada, para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul, safras de 2000/2001 a 2002/2003.

Safra	Método de estimativa	Produtividade (kg ha^{-1})	Diferença		Teste t
			(kg ha^{-1})	(%)	
2000/2001	IBGE ajustado	2.623	-	-	-
	AGRO	2.622	-1	-0,04	0,03 ^{ns}
	AGROESPEC	2.622	-1	-0,04	0,03 ^{ns}
2001/2002	IBGE ajustado	1.832	-	-	-
	AGRO	1.771	-61	-3,33	1,90 ^{ns}
	AGROESPEC	1.826	-6	-0,32	0,21 ^{ns}
2002/2003	IBGE ajustado	2.896	-	-	-
	AGRO	2.668	-228	-7,87	8,21*
	AGROESPEC	2.692	-204	-7,04	7,32*

^{ns}Não-significativo. *Significativo a 5% de probabilidade.

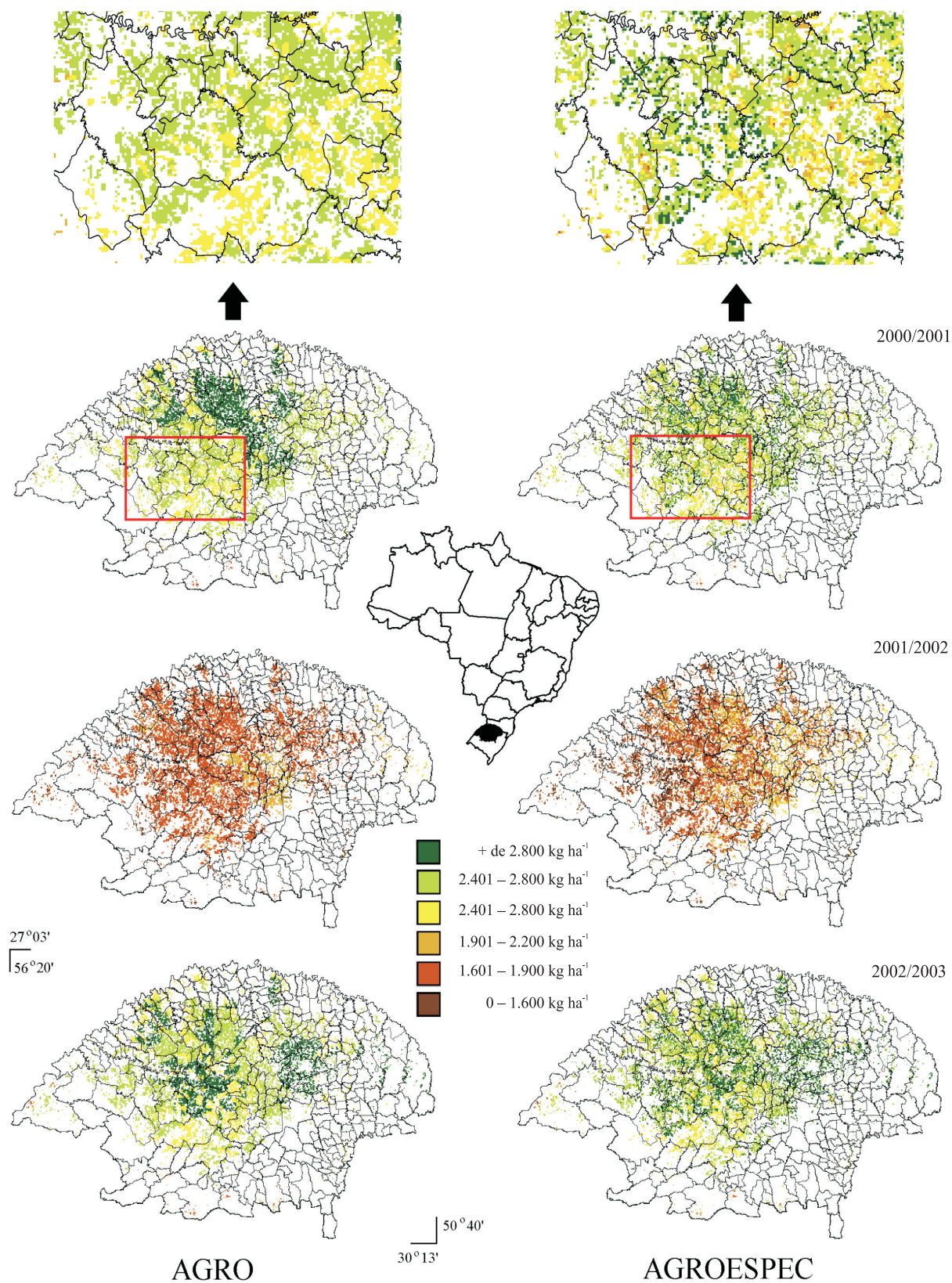


Figura 2. Localização da área de estudo e mapas temáticos referentes à produtividade da soja, estimada pelas abordagens AGRO e AGROESPEC, das safras de 2000/2001 a 2002/2003.

produtividade da cultura esteve entre 1.600 e 1.900 kg ha⁻¹. Verificou-se, ainda, talhões onde a produtividade foi extremamente prejudicada pelo estresse hídrico, e que não atingiram 1.600 kg ha⁻¹.

Em 2002/2003, dadas as excelentes condições meteorológicas, a maioria dos talhões apresentou níveis de produtividade superiores a 2.400 kg ha⁻¹, tendo havido um número considerável de talhões com valores acima de 2.800 kg ha⁻¹. Contudo, foram verificadas regiões, onde tais valores estiveram entre 2.201 e 2.400 kg ha⁻¹, e foi inexpressivo o número de talhões com produtividade inferior a 2.201 kg ha⁻¹.

A Figura 2 permite visualizar, também, a distribuição espacial da variação da produtividade modelada pelas duas abordagens. Observa-se que, para uma mesma safra, a abordagem AGROESPEC fornece resultados bem mais detalhados do que a AGRO, no que se refere à variação espacial da produtividade, em razão do emprego dos valores de IAF estimados a partir das imagens MODIS.

A menor variação espacial da produtividade, estimada pela abordagem AGRO, está ligada ao número reduzido de estações meteorológicas, que também provoca limites abruptos nos mapas das variáveis meteorológicas interpoladas. Por exemplo, na safra 2001/2002, os valores médios de produtividade estimada pelas abordagens AGRO e AGROESPEC foram praticamente os mesmos. Entretanto, a AGROESPEC apresentou uma variação maior, tanto nos valores de produtividade, quanto na distribuição espacial, quando comparada à abordagem AGRO.

Observa-se que na safra 2001/2002, a abordagem AGROESPEC estimou valores abaixo de 1.600 kg ha⁻¹, principalmente na região sudoeste da área de estudo, o que não se observa na abordagem AGRO. Ainda em relação à safra 2001/2002, percebe-se no mapa gerado pela AGROESPEC a existência de um aumento gradual da produtividade, no sentido sudoeste para nordeste da área de estudo. Ou seja, apesar dos baixos valores observados em toda a região estudada, as maiores perdas na produtividade se concentraram na parte sudoeste, comparativamente à parte nordeste da região. Isto condiz com o estudo realizado por Cunha et al. (1999), que constataram maiores índices de perda de potencial de produtividade da soja por deficiência hídrica, nas porções sul e sudeste, em relação às porções norte e nordeste do Estado, para cultivares de ciclo médio semeadas no início da segunda quinzena de novembro. Isto é um forte

indicativo de que a abordagem AGROESPEC pode fornecer estimativas mais detalhadas da produtividade, em relação à abordagem AGRO (por exemplo, municípios, grandes talhões), pois o IAF, calculado a partir das imagens NDVI do MODIS, torna o modelo mais sensível à variabilidade espacial da produtividade da soja, já que há forte relação entre o NDVI de dosséis de soja e o IAF (Holben & Tucker, 1980; Doraiswamy et al., 2004, 2005).

Conclusões

1. As abordagens do modelo permitem a avaliação objetiva e quantitativa do efeito das condições meteorológicas sobre a produtividade de soja.
2. A abordagem AGROESPEC fornece estimativas mais detalhadas da variação espacial da produtividade, em razão do emprego dos valores de IAF estimados a partir das imagens do sensor MODIS do satélite TERRA.

Referências

- BERKA, L.M.S.; RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E. Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS. *Scientia Agricola*, v.60, p.433-440, 2003.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 431p. (DNPEA. Boletim técnico, 30).
- CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers and Graphics*, v.20, p.395-403, 1996.
- CHOUDHURY, B.J.; AHMED, N.U.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; DAUGHTRY, C.S.T. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, v.50, p.1-17, 1994.
- CUNHA, G.R. da; HASS, J.C.; DALMAGO, G.A.; PASINATO, A. **Cartas de perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica**. Passo Fundo: Embrapa-CNPT, 1999. 52p. (Boletim de pesquisa, 1).
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979. 193p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 33).
- DORAISWAMY, P.C.; HATFIELD, J.L.; JACKSON, B.; AKHMEDOV, B.; PRUEGER, J.; STERN, A. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. *Remote Sensing of Environment*, v.92, p.548-559, 2004.
- DORAISWAMY, P.C.; SINCLAIR, T.R.; HOLLINGER, S.; AKHMEDOV, B.; STERN, A.; PRUEGER, J. Application of MODIS derived parameters for regional crop yield assessment. *Remote Sensing of Environment*, v.97, p.192-202, 2005.

- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 1999. 412p.
- FARIAS, J.R.B.; NEPOMUCENO, A.F.; NEUMAIER, N.; OYA, T. Ecofisiologia. In: EMBRAPA SOJA. **A cultura da soja no Brasil**. Londrina, 2000. 1 CD-ROM.
- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Alterações micrometeorológicas na cultura da soja submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.27, p.661-669, 1992.
- HARTKAMP, A.D.; WHITE, J.W.; HOOGENBOOM, G. Interfacing geographic information systems with agronomic modelling: a review. **Agronomy Journal**, v.91, p.761-772, 1999.
- HOLBEN, B.N.; TUCKER, C.J.; FAN, C.J. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.46, p.651-655, 1980.
- IBGE. **Levantamento sistemático da produção agropecuária**. 2003. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/IBGE/>>. Acesso em: 7 nov. 2003.
- LIU, W.T.; KOGAN, F. Monitoring Brazilian soybean production using NOAA/AVHRR based vegetation condition indices. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, p.1161-1179, 2002.
- MELO, R.W.; FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento da soja para o Estado do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais**. São José dos Campos: Inpe, 2003. p.173-179.
- MO, X.; LIU, S.; LIN, Z.; XU, Y.; XIANG, Y.; McVICAR, T.R. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. **Ecological Modelling**, v.183, p.301-322, 2005.
- MYNENI, R.B.; RAMAKRISHNA, R.; NEMANI, R.R.; RUNNING, S.W. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.35, p.1380-1393, 1997.
- RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004. 214p. Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T. Estimativa da área de soja no Rio Grande do Sul por meio de imagens Landsat. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.57, p.226-234, 2005.
- RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; DORAISWAMY, P.C. Assessment of MODIS LAI retrievals over soybean crop in Southern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, p.4091-4100, 2006.
- ROUSE JUNIOR, J.W.; HAAS, R.H.; DEERING, D.W.; SCHELL, J.A.; HARLAN, J.C. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. Greenbelt: Nasa, 1974. 371p.
- RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Wheat yield estimation at the farm level using TM Landsat and agrometeorological data. **International Journal of Remote Sensing**, v.12, p.2477-2484, 1991.
- RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Yield estimation of sugarcane based on Agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v.33, p.183-192, 1990.
- STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. **Principles and procedures of statistics: a biometrical approach**. New York: McGraw-Hill, 1980. 633p.

Recebido em 3 de março de 2006 e aprovado em 17 de outubro de 2006