

1 **Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agronômico para estimar a**
2 **produtividade de soja**

3
4 Rodrigo Rizzi^{1*} e Bernardo Friedrich Theodor Rudorff¹

5 ¹ Dr. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Divisão de Sensoriamento Remoto
6 (DSR). Av. dos Astronautas, 1758, CEP: 12.227-010, São José dos Campos, SP. E-mail:
7 *rizzi@dsr.inpe.br, bernardo@dsr.inpe.br.

8 *Autor correspondente.

9 Resumo – As imagens do sensor MODIS são uma alternativa promissora para estimar o
10 índice de área foliar (IAF), que é um importante parâmetro na estimativa de produtividade por
11 meio de modelos agronômicos. Neste trabalho, um modelo agronômico implementado num
12 Sistema de Informação Geográfica (SIG) foi utilizado para estimar a produtividade de soja no
13 Rio Grande do Sul, nas safras de 2000/01 a 2002/03. Duas abordagens foram utilizadas: 1)
14 modelo agronômico (AGRO), com valores de IAF obtidos da literatura; e 2) modelo
15 agronômico-espectral (AGROESPEC), com valores de IAF estimados a partir das imagens
16 MODIS. As estimativas de produtividade obtidas pelo modelo foram comparadas àquelas
17 fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) utilizando-se o teste "t"
18 para pares de observação. Para as safras 2000/01 e 2001/02, não foram observadas diferenças
19 significativas. Para 2002/03, o modelo subestimou o valor de produtividade em 7,87 e 7,04%,
20 para as abordagens AGRO e AGROESPEC, respectivamente, em comparação à produtividade
21 fornecida pelo IBGE. Ambas as abordagens do modelo permitiram uma avaliação objetiva e
22 quantitativa do efeito das condições meteorológicas sobre a produtividade de soja. Entretanto,
23 o AGROESPEC forneceu estimativas mais **detalhadas**, no que se refere à variação espacial da
24 produtividade, devido ao emprego dos valores de IAF estimados a partir das imagens
25 MODIS.

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

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19

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

Abstract – Images from the MODIS sensor are a promising alternative to estimate leaf area index (LAI), which is an important input parameter to estimate crop yield through agronomic models. In this paper, an agronomic crop yield model **implemented** in a Geographic Information System (GIS) was used to estimate **soybean yield** in Rio Grande do Sul State, Brazil, for crop years from 2000/01 to 2002/03. Two approaches were used: 1) agronomic model (AGRO), with LAI obtained from literature; and 2) agronomic-spectral model (AGROESPEC), with LAI estimated from MODIS images. Results were compared with the official estimates provided by the Brazilian Institute for Geography and Statistics (IBGE) using the "t" test for paired observations. For crop years 2000/01 and 2001/02, there were no significant differences. For 2002/03, AGRO and AGROESPEC approaches underestimated in 7.87 and 7.04%, respectively, 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.

20
21
22

Introdução

23 No Brasil, as estimativas oficiais de produtividade agrícola são realizadas
24 predominantemente de forma subjetiva, por meio de entrevistas aplicadas aos produtores,
25 especulações sobre a venda de insumos, análise de safras passadas, observação das condições

1 meteorológicas, dentre outros, os quais não permitem uma análise apurada dos erros
2 envolvidos, dando margem à especulação. Desta forma, torna-se crescente a demanda por
3 metodologias que permitam a obtenção dessas estimativas por meio de métodos objetivos que
4 relacionem a variação meteorológica aos fatores que afetam o desenvolvimento das culturas
5 agrícolas e sua produtividade.

6 Estudos envolvendo estimativa de produtividade vêm sendo desenvolvidos utilizando
7 dados agrometeorológicos, associados ou não às imagens de sensoriamento remoto (SR), por
8 meio de modelos agronômicos (RUDORFF e BATISTA, 1990, 1991; MO et al., 2005). Para
9 que os modelos possam gerar prognósticos em grandes regiões, viabilizando sua aplicação em
10 escalas estadual ou nacional, é fundamental a sua associação aos Sistemas de Informações
11 Geográfica (SIGs) (HARTKAMP et al., 1999; DANG et al., 2000). BERKA et al. (2003)
12 propuseram um modelo agronômico para monitoramento e estimativa da produtividade de
13 soja, implementado a um SIG, que pode ser empregado em qualquer região através da
14 substituição das variáveis de entrada.

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

21 Com o advento do sensor MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer -
22 <http://modis.gsfc.nasa.gov>), a bordo dos satélites TERRA e AQUA, observou-se uma grande
23 melhoria na qualidade das imagens de SR, em especial, no que diz respeito às correções
24 geométrica e atmosférica, além de um significativo aumento da resolução espacial em
25 comparação às imagens do sensor AVHRR, até então utilizadas (LIU e KOGAN, 2002;

1 MELO et al., 2003). A disponibilidade gratuita e ininterrupta das imagens MODIS abre novas
2 possibilidades para o uso das imagens de SR em modelos de estimativa de produtividade de
3 culturas agrícolas.

4 Este trabalho objetivou estimar a produtividade de soja no Rio Grande do Sul, nas safras
5 de 2000/01 a 2002/03 por meio de um modelo agrônômico implementado num SIG, a fim de
6 verificar a contribuição dos valores de IAF, calculados a partir das imagens do sensor
7 MODIS, na estimativa da produtividade de soja. Para tal, foram utilizadas duas abordagens:
8 1) modelo agrônômico (AGRO) com valores de IAF obtidos da literatura e 2) modelo
9 agrônômico-espectral (AGROESPEC) com valores de IAF estimados a partir das imagens do
10 sensor MODIS do satélite TERRA.

11

12

Materiais e Método

13 A área teste escolhida como estudo de caso localizou-se no estado do Rio Grande do Sul,
14 entre as latitudes S 27° 03' e S 30° 13' e as longitudes W 50° 40' e W 56° 20', abrangendo 322
15 municípios (117.628 km²), os quais correspondem a aproximadamente 90% da produção de
16 soja do estado (IBGE, 2003).

17 A produtividade da soja nas safras de 2000/01 a 2002/03 foi estimada por meio de um
18 modelo agrônômico implementado ao SIG do aplicativo SPRING (Sistema de Processamento
19 de Informações Georreferenciadas; Câmara et al., 1996).

20 O modelo agrônômico, baseado no relatório N° 33 da FAO (Food and Agriculture
21 Organization) de DOORENBOS e KASSAM (1979), emprega as variáveis temperatura média
22 do ar (°C), velocidade do vento a 2 metros de altura (km dia⁻¹), umidade relativa do ar (%),
23 insolação (horas dia⁻¹) ou radiação solar (cal cm⁻² dia⁻¹) e precipitação pluvial (mm dia⁻¹).

24 Os dados das variáveis meteorológicas necessários ao modelo foram coletados por 20
25 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Fundação

1 Estadual de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Sul (FEPAGRO). Os dados diários das
2 estações meteorológicas foram organizados em médias quinzenais, salvo os dados de
3 precipitação pluvial, que foram somados quinzenalmente. Em seguida, estes dados foram
4 espacializados considerando-se uma grade regular de 1 km x 1 km e uma interpolação
5 espacial pelo método da *média ponderada por quadrante*, disponível no aplicativo SPRING
6 (Câmara et al., 1996). Desta forma, todas as variáveis foram representadas por meio de uma
7 grade regular (matriz) em que cada célula (pixel) corresponde a uma área de 1 km x 1 km no
8 terreno.

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

12 Outros dados necessários ao modelo são: altitude e capacidade de armazenamento de água
13 disponível no solo (CAD). A altitude foi obtida do modelo digital de elevação global
14 (GTOPO; Global Digital Elevation Model) disponibilizado pelo Eros Data Center-USGS
15 (www.usgs.gov). A CAD foi estimada com base num mapa de classificação de solos na escala
16 de 1:750.000 (BRASIL, 1973) em que os valores de CAD (50, 70 ou 100 mm m⁻¹) foram
17 atribuídos para cada classe pedológica de acordo com EMBRAPA (1999) e FARIAS et al.
18 (2000).

19 O cálculo da produtividade pelo modelo agrônomico foi feito através de duas abordagens:
20 AGRO e AGROESPEC. A abordagem AGRO utilizou valores de IAF obtidos da literatura
21 (FONTANA et al., 1992). Neste caso, o plano de informação do SIG referente ao IAF
22 apresenta o mesmo valor para toda a área de estudo, numa determinada quinzena, conforme
23 apresentado na Tabela 1. A abordagem AGROESPEC fez uso dos valores de IAF estimados a
24 partir das imagens NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*; ROUSE et al., 1974) do
25 sensor MODIS do satélite TERRA. As imagens NDVI foram compostas em períodos de 16

1 dias¹ (produto MOD13Q1, coleção 4.0), desde o início da semeadura em outubro até o fim da
 2 colheita em abril, para as safras de 2000/01 a 2002/03. Neste caso, os valores de IAF podem
 3 variar de célula (ou pixel) para célula em função do valor de NDVI de cada célula das
 4 imagens MODIS. As imagens NDVI do MODIS têm resolução espacial de 250 x 250 m e
 5 foram reamostradas para 1 x 1 km, visando compatibilizá-las à resolução espacial das demais
 6 variáveis empregadas no modelo.

7 Entre os produtos gerados a partir das imagens MODIS e disponibilizados gratuitamente
 8 pela NASA está o IAF (MOD15A2, coleção 4.0). Entretanto, RIZZI et al. (2005) observaram
 9 que durante o período de máximo desenvolvimento vegetativo da soja, os valores de IAF do
 10 MODIS apresentam uma elevada percentagem de valores inválidos, o que impediu o uso
 11 desse produto no AGROESPEC. Desta forma, o cálculo do IAF foi feito a partir das imagens
 12 NDVI do MODIS e consiste, primeiramente, na sua transformação em fração da cobertura do
 13 solo, através do método proposto por CHOUDHURY et al. (1994):

$$14 \quad Fc = 1 - \left(\frac{NDVIMax - NDVI}{NDVIMax - NDVIMin} \right)^{0,6}$$

15 em que, Fc = fração do solo coberto pela cultura; $NDVIMax$ = valor máximo do NDVI da
 16 imagem; $NDVIMin$ = valor mínimo do NDVI da imagem; $NDVI$ = valor do NDVI da célula a
 17 ser contabilizada. Segundo NORMAN et al. (2003), o IAF é estimado por:

$$18 \quad IAF = -2\ln(1-Fc)$$

19 Uma vez estimado o IAF para cada célula de 1 km x 1 km (pixel), este é utilizado no
 20 modelo para o cálculo do fator de compensação de crescimento (Fcc) proposto por
 21 DOORENBOS e KASSAM (1979) como:

$$22 \quad Fcc = 0,515 - e^{(-0,664-(0,515*IAF)}$$

¹ O sensor MODIS recobre o globo terrestre diariamente e a cada 16 dias completa um ciclo de imageamento. No presente estudo foram utilizadas imagens NDVI compostas pelos *pixels* de melhor qualidade radiométrica e geométrica observados em cada ciclo.

1 Afora a estimativa do IAF, as imagens NDVI do MODIS foram utilizadas para determinar
2 o período mais adequado para o cálculo da produtividade pelo modelo. Para tanto, as imagens
3 MODIS da safra 2000/01 foram associadas a um mapa temático referente à área plantada com
4 soja nesta mesma safra (RIZZI & RUDORFF, 2005), visando determinar os valores médios
5 do NDVI ao longo da safra para a soja em toda a região de estudo. A época destinada à
6 implantação da cultura no Rio Grande do Sul ocorre desde a segunda quinzena de outubro até
7 meados de dezembro, embora o período preferencial seja novembro. Já a colheita se estende
8 de março até início de maio. Em função disso, fez-se necessário adequar o modelo às
9 condições médias da região, em relação às datas de semeadura e colheita.

10 De posse das variáveis de entrada para o modelo, definiram-se como parâmetros o
11 coeficiente de cultura (K_c), que expressa a relação entre a evapotranspiração máxima da
12 cultura e a evapotranspiração de referência, o fator de resposta à produtividade (K_y), que diz
13 respeito à resposta da vegetação à disponibilidade hídrica e descreve a diminuição relativa da
14 produtividade em função da diminuição da evapotranspiração (DOORENBOS e KASSAM,
15 1979) e a profundidade do sistema radicular (D) da cultura, que interfere na capacidade de
16 aproveitamento da água disponível no solo e, conseqüentemente, na produtividade final,
17 conforme a Tabela 1.

18 Além destes, o *fator de produtividade agrícola* (FPA) ou índice de colheita, que relaciona
19 a produtividade agrícola com a fitomassa seca total, é o parâmetro que mais afeta o valor da
20 produtividade. O FPA da soja está entre 30 e 40%, ou seja, do total de fitomassa seca da
21 planta 30 a 40% corresponde aos grãos (DOORENBOS e KASSAM, 1979). Os valores de
22 FPA foram ajustados empiricamente em 30,02% para a abordagem AGRO e em 35,67% para
23 a abordagem AGROESPEC, utilizando os dados do primeiro ano safra (2000/01). O FPA da
24 abordagem AGROESPEC é superior ao da abordagem AGRO visto que os valores de IAF
25 calculados a partir das imagens MODIS/NDVI são inferiores aos obtidos da literatura. Além

1 disso, pequenas alterações foram feitas nos valores dos parâmetros do modelo até que fosse
2 alcançado o melhor ajuste dos valores de produtividade estimados pelos modelos em
3 comparação aos fornecidos pelo IBGE. Uma vez efetuado o ajuste dos parâmetros dos
4 modelos com base nos dados do ano safra 2000/01, estes foram mantidos inalterados para a
5 estimativa da produtividade nas safras seguintes.

6 Para o cálculo da produtividade, utilizou-se um mapa temático de áreas de soja, gerado a
7 partir da classificação digital e interpretação visual de imagens dos satélites Landsat-5 e -7,
8 safra 2000/01 (RIZZI & RUDORFF, 2005), para garantir que somente as áreas contendo soja
9 fossem utilizadas no cálculo da produtividade. Posteriormente, foi calculada a média da
10 produtividade da soja em cada município, transcritas em RIZZI (2004) e também para toda a
11 área de estudo.

12 Finalmente, um aspecto a ser considerado na avaliação dos resultados está relacionado à
13 imprecisão das estimativas de área e de produtividade da soja, fornecidos pelo IBGE. É
14 suposto que os valores de produção de soja informados pelo IBGE, ao final de cada safra,
15 estão muito próximos da realidade e podem ser utilizados como dado de referência.
16 Entretanto, o valor da produtividade informada pelo IBGE pode apresentar erros se o valor da
17 área plantada estiver incorreto, conforme constatado por RIZZI (2004). No presente estudo, os
18 dados de produtividade do IBGE foram ajustados em função do valor de produção final
19 informado pelo IBGE e do valor de área plantada estimado por RIZZI (2004) para cada ano
20 safra, conforme a Tabela 2. Os novos valores de produtividade ajustados foram utilizados
21 como dado de referência (Tabela 2) na avaliação do resultado das abordagens AGRO e
22 AGROESPEC pelo teste "t" para pares de observação (STEEL & TORRIE, 1980), onde se
23 verificou a variância das diferenças entre as observações.

24

25

Resultados e Discussão

1 A Figura 1 mostra a evolução temporal do NDVI sobre a soja na área de estudo, safra
2 2000/01. Percebe-se que a variação do NDVI está relacionada aos diferentes estádios
3 fenológicos da soja. Baixos valores de NDVI foram observados durante os meses de
4 novembro e abril, coincidentes com o estabelecimento e a senescência da cultura,
5 respectivamente. O rápido incremento dos valores a partir de dezembro demonstra a
6 sensibilidade do NDVI ao acréscimo da fitomassa por ocasião da fase inicial do ciclo da
7 cultura. A tendência à estabilização manifestada a partir de fevereiro, quando a soja ainda
8 apresenta considerável incremento no IAF, comprova a perda de sensibilidade do NDVI ao
9 acréscimo de fitomassa em estádios fenológicos mais avançados, muito embora os valores
10 mais altos de NDVI coincidam com o período de maior desenvolvimento das plantas. O
11 decréscimo abrupto dos valores de NDVI a partir de março expressa a diminuição da
12 fitomassa verde da soja no final do ciclo. Assim sendo, o período definido para o cálculo da
13 produtividade da soja pelas abordagens AGRO e AGROESPEC, para as três safras estudadas,
14 compreendeu desde a segunda quinzena de novembro até o final de março, totalizando nove
15 quinzenas (135 dias).

16 A Tabela 3 exhibe os valores de produtividade, em nível estadual, estimados pelas
17 abordagens AGRO e AGROESPEC e a sua comparação frente aos valores de produtividade
18 do IBGE ajustado, para cada safra analisada. Os valores em nível municipal estão transcritos
19 em RIZZI (2004).

20 Pela Tabela 3, fica evidente a variação dos valores de produtividade entre as três safras
21 estudadas. As safras 2000/01 e 2002/03 apresentaram condições meteorológicas propícias ao
22 cultivo da soja, proporcionando uma alta produtividade. Em 2001/02, registrou-se
23 prolongados períodos de estiagem em estádios críticos do ciclo fenológico das plantas, o que
24 implicou em perdas muito significativas na produtividade da cultura. No que tange ao
25 desempenho do modelo, na safra 2000/01, as duas abordagens (AGRO e AGROESPEC)

1 retornaram praticamente o mesmo valor de produtividade do IBGE ajustado, não havendo
2 diferença significativa entre a média das estimativas ($t = 0,03$) (Tabela 3). Em 2001/02, a
3 AGROESPEC também foi bastante eficiente na estimativa da produtividade, sendo que o
4 valor de produtividade foi apenas 6 kg ha^{-1} (0,32%) inferior ao do IBGE ajustado. Já a AGRO
5 retornou um valor de produtividade 61 kg ha^{-1} (3,33%) inferior ao do IBGE ajustado.
6 Entretanto, não houve diferença significativa para a média das estimativas de ambas as
7 abordagens em relação àquela estimada pelo IBGE ajustada (Tabela 3).

8 Para a safra 2002/03, ambas as abordagens retornaram valores de produtividade
9 significativamente diferentes aos valores do IBGE ajustado (Tabela 3). Apesar da
10 subestimativa da produtividade em 2002/03, é interessante notar que ambas as abordagens
11 conseguiram acompanhar a tendência das significativas variações da produtividade observada
12 nas três safras estudadas. Isto indica que o modelo agronômico, independentemente da
13 abordagem utilizada, tem sensibilidade e pode auxiliar na estimativa da produtividade da soja
14 em um sistema operacional de estimativa de safra, principalmente no que se refere ao impacto
15 das condições meteorológicas.

16 A Figura 2 apresenta os mapas de produtividade produzidos por ambas as abordagens do
17 modelo para as safras de 2000/01 a 2002/03 e a divisão política municipal. Cabe lembrar que
18 somente as áreas com soja foram computadas no cálculo da produtividade final, o que explica
19 as regiões em branco nos mapas de produtividade. Em 2000/01, percebe-se que a maioria dos
20 talhões de soja apresentou produtividade superior a 2.400 kg ha^{-1} . Apesar disso, na parte
21 centro-sul da área de estudo, observaram-se alguns talhões com produtividade variando entre
22 2.201 e 2.400 kg ha^{-1} . Talhões com produtividade inferior a 2.201 kg ha^{-1} foram pouco
23 frequentes devido às condições meteorológicas favoráveis ao longo dessa safra.

24 Para a safra 2001/02 notou-se uma drástica redução na produtividade para toda a área de
25 estudo em comparação à safra 2000/01, provocada pela forte estiagem ocorrida no estado.

1 Nesta safra foram constatados poucos talhões onde a produtividade esteve acima de 1.901 kg
2 ha⁻¹. Na maioria dos talhões a produtividade da cultura esteve entre 1.600 e 1.900 kg ha⁻¹.
3 Verificou-se, ainda, talhões onde a produtividade foi extremamente prejudicada pelo estresse
4 hídrico, não atingindo 1.600 kg ha⁻¹.

5 Em 2002/03, dadas as excelentes condições meteorológicas, a maioria dos talhões
6 apresentou níveis de produtividade superior a 2.400 kg ha⁻¹, havendo um número considerável
7 de talhões apresentando valores acima de 2.800 kg ha⁻¹. Contudo, foram verificadas regiões
8 onde tais valores estiveram entre 2.201 e 2.400 kg ha⁻¹, sendo inexpressivo o número de
9 talhões com produtividade inferior a 2.201 kg ha⁻¹.

10 A Figura 2 permite visualizar também a distribuição espacial da variação da produtividade
11 modelada pelas duas abordagens. Observa-se que, para uma mesma safra, a abordagem
12 AGROESPEC fornece resultados bem mais detalhados do que a AGRO, no que se refere à
13 variação espacial da produtividade, devido ao emprego dos valores de IAF estimados a partir
14 das imagens MODIS. A menor variação espacial da produtividade estimada pela abordagem
15 AGRO está ligada ao número reduzido de estações meteorológicas que provocam limites
16 abruptos nos mapas das variáveis meteorológicas interpoladas. Por exemplo, na safra 2001/02
17 os valores médios de produtividade estimada pelas abordagens AGRO e AGROESPEC foram
18 praticamente os mesmos. Entretanto, a AGROESPEC apresentou uma variação maior, tanto
19 nos valores de produtividade, quanto na distribuição espacial, quando comparado à
20 abordagem AGRO. Por exemplo, observa-se na Figura 2 que na safra 2001/02, a abordagem
21 AGROESPEC estimou valores abaixo de 1.600 kg ha⁻¹, principalmente na região sudoeste da
22 área de estudo o que não se observa para a abordagem AGRO. Ainda em relação à safra
23 2001/02, percebe-se no mapa gerado pela AGROESPEC a existência de um aumento gradual
24 da produtividade no sentido sudoeste para nordeste da área de estudo. Ou seja, apesar dos
25 baixos valores observados em toda a região estudada, as maiores perdas na produtividade se

1 concentraram na parte sudoeste, comparativamente à parte nordeste da região. Isto condiz
2 com o estudo realizado por CUNHA et al. (1999), que constataram maiores índices de perda
3 de potencial de produtividade da soja por deficiência hídrica nas porções sul e sudeste, em
4 relação às porções norte e nordeste do Estado, para cultivares de ciclo médio semeadas no
5 início da segunda quinzena de novembro. Isto é um forte indicativo que a abordagem
6 AGROESPEC pode fornecer estimativas mais detalhadas da produtividade em relação à
7 abordagem AGRO (por exemplo, municípios, grandes talhões), pois o IAF calculado a partir
8 das imagens NDVI do MODIS torna o modelo mais sensível à variabilidade espacial da
9 produtividade da soja, pois existe uma forte relação entre o NDVI de dosséis de soja e o IAF
10 (DAUGHTRY et al., 1992; DORAISWAMY et al., 2005).

11

12

Conclusões

13 1 - O modelo agronômico que utiliza o IAF estimado a partir das imagens do sensor
14 MODIS/TERRA (AGROESPEC) possibilita a avaliação objetiva e quantitativa do efeito das
15 condições meteorológicas, fornecendo informações mais detalhadas sobre a variação espacial
16 da produtividade da soja em relação ao modelo que utiliza o IAF obtido da literatura (AGRO).

17 2 – A abordagem do IAF estimado pelas imagens do sensor MODIS/TERRA .

18

19

Referências

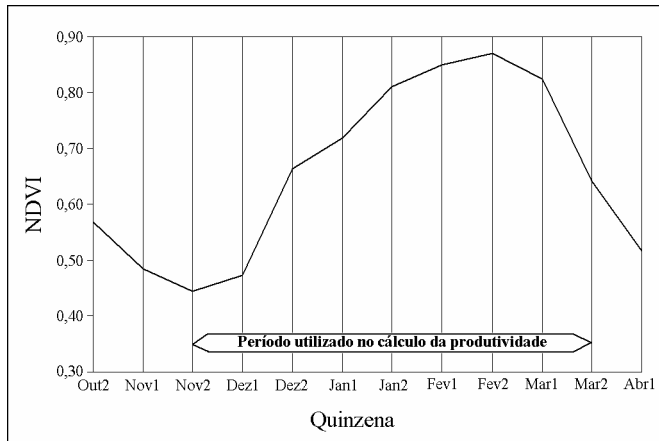
20 BERKA, L.M.S.; RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E. Soybean yield estimation by
21 an agrometeorological model in a GIS. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 3, p. 433-440, July/Sept.
22 2003.

23 BRASIL - Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária.
24 Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do**
25 **Rio Grande do Sul**. Recife, 1973, 431 p. (DNPEA. Boletim Técnico n. 30).Câmara, G.;

- 1 Souza, R.C.M.; Freitas, U.M.; Garrido, J. SPRING: integrating remote sensing and GIS by
2 objectoriented data modelling. **Computers & Graphics**, vol. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.
- 3 CHOUDHURY, B.J.; AHAMED, N.U.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; DAUGHTRY,
4 C.S.T. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model
5 simulations. **Remote Sensing of Environment**, v. 50, n. 1, p. 1-17, 1994.
- 6 CUNHA, G. R. da; HASS, J.C.; DALMAGO, G.A.; PASINATO, A. **Cartas de perda de**
7 **rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica**. Boletim de
8 Pesquisa n. 1, Embrapa Trigo, Passo Fundo, 52p. 1999.
- 9 DANG, A.; WANG, X.; WU, H. GIS based study on the potential grain productivity of
10 China. [CD-ROM]. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS
11 2000, Honolulu, 2000. **Proceedings**. Piscataway: IEEE Publications, 2000.
- 12 DAUGHTRY, C. S. T.; GALLO, K. P.; GOWARD, S. N.; PRINCE, S. D.; KUSTAS, W. P.
13 Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean
14 canopies. **Remote Sensing of Environment**, v. 39, n. 2, p. 141-152, 1992.
- 15 DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture
16 Organization of the United Nations, 1979. 193 p. (FAO-Irrigation and Drainage Paper n. 33).
- 17 DORAISWAMY, P.C.; HATFIELD, J.L; JACKSON, B.; AKHMEDOV, B.; PRUEGER, J.;
18 STERN. A. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. **Remote**
19 **Sensing of Environment**, v. 92, p. 548-559, 2004.
- 20 DORAISWAMY, P.C.; SINCLAIR, T.R.; HOLLINGER, S.; AKHMEDOV, B.; STERN. A.;
21 PRUEGER, J. Application of MODIS derived parameters for regional crop yield assessment.
22 **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p. 192-202, 2005.
- 23 EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de**
24 **classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 1999. 412 p.

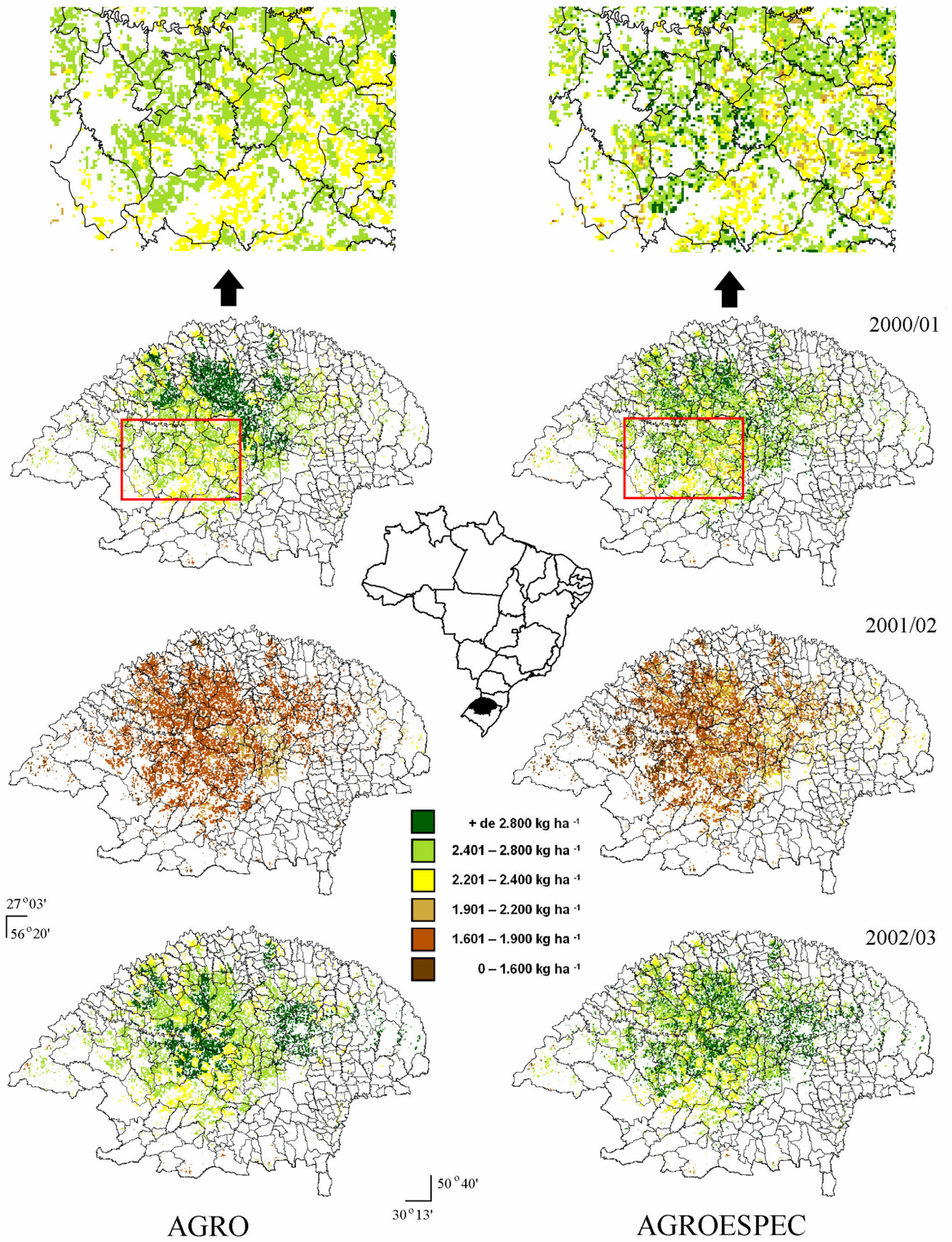
- 1 FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. F.; NEUMAIER, N.; OYA, T. ECOFISIOLOGIA.
2 In: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **A cultura da soja no Brasil.**
3 [CD-ROM]. Londrina: Embrapa Soja, 2000.
- 4 FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Alterações
5 micrometeorológicas na cultura da soja submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa**
6 **Agropecuária Brasileira**, v. 27, n. 5, p. 661-669, 1992.
- 7 HARTKAMP, A.D.; WHITE, J.W.; HOOGENBOOM, G. Interfacing geographic information
8 systems with agronomic modellings: A review. **Agronomy Journal**, v. 91, n. 5, p. 761-722,
9 Sept./Oct. 1999.
- 10 IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da**
11 **Produção Agropecuária**, 2003. Disponível em: <[www.ibge.gov.br/home/](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/IBGE/)
12 [estatistica/indicadores/agropecuaria/IBGE/](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/IBGE/)>. Acesso em: 7 nov. 2003.
- 13 LIU, W.T.; KOGAN, F. Monitoring Brazilian soybean production using NOAA/AVHRR
14 based vegetation condition indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 6, p.
15 1161-1179, 2002.
- 16 MELO, R.W.; FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. Modelo agrometeorológico-espectral de
17 estimativa de rendimento da soja para o Estado do Rio Grande do Sul. In: Simpósio Brasileiro
18 de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais**. São José dos Campos: INPE,
19 2003. p. 173 -179.
- 20 MYNENI, R. B.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W., Estimation of global leaf area index and
21 absorbed par using radiative transfer models. **IEEE Trans. on Geoscience and Remote**
22 **Sensing**, v. 35, n. 6, p. 1380-1393, 1997.
- 23 MO, X.; LIU, S.; LIN, Z.; XU, Y.; XIANG, Y.; MCVICAR, T.R. Prediction of crop yield,
24 water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely
25 sensed data on the North China Plain. **Ecological Modelling**, v. 183, n. 2-3, p. 301-322,
26 2005.

- 1 NORMAN, J.M.; ANDERSON, M.C.; KUSTAS, W.P.; FRENCH, A.N.; MECIKALSKI, J.;
- 2 TORN, R.; DIAK, G.R.; SCHMUGGE, T.J. Remote sensing of evapotranspiration for
- 3 precision-farming applications. International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
- 4 **Proceedings**, Toulouse, France, July 21-25, 2003.
- 5 RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de**
- 6 **caso no Rio Grande do Sul**. 2004-04-30. 214 p. (INPE-12271-TDI/983). Tese (Doutorado
- 7 em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos
- 8 Campos. 2004. <<http://iris.sid.inpe.br:1912/rep-/sid.inpe.br/jeferson/2004/07.02.14.17>>.
- 9 RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T. Estimativa da área de soja no Rio Grande do Sul por meio de
- 10 imagens Landsat. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57 n. 3, p. 226-234, 2005.
- 11 <http://www2.prudente.unesp.br/rbc/_pdf_57_2005/57_3_06.pdf>
- 12 RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMAUKURO, Y. E. Analysis of MODIS leaf area index
- 13 product over soybean areas in Rio Grande do Sul State, Brazil. In: XII Simpósio Brasileiro de
- 14 Sensoriamento Remoto, Goiânia. **Anais**. 2005.
- 15 ROUSE, J.W. JR.; HAAS, R.H.; DEERING, D.W.; SCHELL, J.A.; HARLAN, J.C.
- 16 Monitoring the vernal advancement and retrogration (green wave effect) of natural vegetation,
- 17 **NASA/GSFC type III final report**: Greenbelt, Maryland, NASA, 371p. 1974.
- 18 RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G.T. Yield estimation of sugarcane based on
- 19 Agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n. 3, p. 183-
- 20 192, 1990.
- 21 _____. Wheat yield estimation at the farm level using TM Landsat and agrometeorological data.
- 22 **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 12, p. 2477-2484, 1991.
- 23 STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. **Principles and procedures of statistics**: a biometrical
- 24 approach. New York: McGraw-Hill, 1980. 633p.



1

2 Figura 1



1
2 Figura 2

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

| Quinzena | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Kc | 0,62 | 0,90 | 1,14 | 1,32 | 1,44 | 1,44 | 1,38 | 1,20 | 1,08 |
| Ky | 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 m⁻²) | 0,11 | 0,77 | 2,20 | 3,30 | 5,50 | 6,90 | 5,50 | 3,85 | 1,10 |

4 Fonte: Adaptado de DOORENBOS e KASSAM (1979, p. 25 e 39) para Kc, Ky e D e de
 5 FONTANA et al. (1992) para IAF.

6 **Tabela 2.** Produção (ton), área plantada estimada pelo IBGE e por RIZZI (2004) e
 7 produtividade estimada pelo IBGE e ajustada em função da área plantada (kg ha⁻¹), para a
 8 cultura da soja no Rio Grande do Sul, safras de 2000/01 a 2002/03.

| Safr | Produção* (ton.) IBGE (a) | Área (ha) | | Produtividade (kg ha ⁻¹) | |
|----------------|---------------------------------|-------------|---------------------|--------------------------------------|------------------------|
| | | IBGE (b) | RIZZI (2004) (c) | IBGE (a/b) | IBGE Ajustado (a/c) |
| 2000/01 | 6.538.776 | 2.773.498 | 2.492.880 | 2.358 | 2.623 |
| 2001/02 | 5.113.385 | 3.016.602 | 2.791.253 | 1.695 | 1.832 |
| 2002/03 | 8.646.918 | 3.225.462 | 2.985.409 | 2.680 | 2.896 |

9 * Produção (ton.) = Área plantada (ha) * Produtividade (kg ha⁻¹) / 1000

10 **Tabela 3.** Produtividade estimada pelas abordagens AGRO e AGROESPEC e teste de
 11 significância, em comparação à produtividade do IBGE ajustada, para a cultura da soja no
 12 estado do Rio Grande do Sul, safras de 2000/01 a 2002/03.

| Safr | Método de Estimativa | Produtividade (kg ha ⁻¹) | Diferença | | Teste <i>t</i> |
|----------------|----------------------|---|------------------------|--------|--------------------|
| | | | (kg ha ⁻¹) | (%) | |
| 2000/01 | IBGE ajustado | 2.623 | - | - | - |
| | AGRO | 2.622 | - 1 | - 0,04 | 0,03 ^{ns} |
| | AGROESPEC | 2.622 | - 1 | - 0,04 | 0,03 ^{ns} |
| 2001/02 | IBGE ajustado | 1.832 | - | - | - |
| | AGRO | 1.771 | - 61 | - 3,33 | 1,90 ^{ns} |
| | AGROESPEC | 1.826 | - 6 | - 0,32 | 0,21 ^{ns} |
| 2002/03 | IBGE ajustado | 2.896 | - | - | - |
| | AGRO | 2.668 | - 228 | - 7,87 | 8,21* |

| | | | | |
|-----------|-------|-------|--------|-------|
| AGROESPEC | 2.692 | - 204 | - 7,04 | 7,32* |
|-----------|-------|-------|--------|-------|

1 ^{ns} (não-significativo) *(Significativo para $\alpha = 0,05$).

2 **Lista de figuras**

3

4 **Figura 1.** Perfil Temporal do MODIS/NDVI para a média das áreas com soja durante a safra
5 2000/01 e o período selecionado para o cálculo da produtividade.

6

7 **Figura 2.** Localização da área de estudo e mapas temáticos referente à produtividade da soja
8 estimada pelas abordagens AGRO e AGROESPEC, safras de 2000/01 a 2002/03.

9