Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Avaliação do Impacto de Ondas de Calor em Safras de Verão por Integração de Dados dos Satélites Aqua e Terra/MODIS

Aníbal Gusso^{1,2,3}, Jorge Ricardo Ducati², Mauricio Roberto Veronez^{3,4},
Leonardo Campos Inocêncio³

¹ Engenharia Ambiental, UNISINOS, Email: anibalg@unisinios.br

² Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, UFRGS, Email: ducati@if.ufrgs.br

³ Vizlab, Advanced Visualization Laboratory, UNISINOS, Email: lcinocencio@unisinios.br

⁴ Programa de Pós-Graduação em Geologia, UNISINOS, Email: veronez@unisinios.br

Artigo recebido em 19/11/2013 e aceite em 28/03/2014

RESUMO

Este estudo aborda o efeito da ocorrência de temperaturas elevadas sobre a variabilidade da produtividade da soja. São estudadas as safras entre o período de 2003 a 2012 no Estado do Rio Grande do Sul. Para a análise da temperatura no dossel da vegetação, em área agrícola, foram utilizadas séries temporais de LST (Land Surface Temperature), produto MYD11A2, coleção-5 do sensor MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) no satélite Aqua. A identificação de áreas agrícolas e o monitoramento da evolução dos estádios fenológicos foram efetuados com a aplicação do EVI (Enhanced Vegetation Index), produto MOD13Q1 do MODIS no satélite Terra. Foram gerados mapas obtidos da interpolação espacial pelo método de krigagem ordinária para suavizar os dados em nível municipal da produção da soja provenientes do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e de precipitação ocorrida, acumulada entre outubro e fevereiro, provenientes de 15 estações pluviométricas da FEPAGRO (Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Sul). A média geral da LST sobre o dossel ocorrida no período foi de 31,9 °C com desvio padrão de 2,1 °C. A média geral da produtividade suavizada foi de 2003 kg ha⁻¹ com desvio padrão de 309 kg ha⁻¹. A média da precipitação acumulada foi de 775 mm com desvio padrão de 38 mm. Em nível estadual, os resultados apontam que eventos de queda severa de produtividade estão associados à ocorrência de LST-dossel acima da média, em fevereiro (DOY 033), conjugada com precipitação abaixo da média, por uma relação inversa não linear, tendo R²=0,73 e RMSD=17,8%.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Vulnerabilidade; Agricultura; Soja; Temperatura; Estiagem.

Integrating Aqua and Terra/MODIS satellite Data for the Evaluation of Heat Stress Impacts on Summer Crops

ABSTRACT

In this study we analyze the relationship between the occurrence of high temperatures and the variability of soybean yield. The study covers the crop years from 2003 to 2012 in Rio Grande do Sul State. For the analysis of temperature over the vegetation canopy in agricultural areas, we used a LST (Land Surface Temperature) time series, product MYD11A2 collection -5 of sensor MODIS (Moderate -Resolution Imaging Spectroradiometer) on board the Aqua satellite. Crop area mapping, identification and monitoring of development during phenological stages were performed with application of EVI (Enhanced Vegetation Index) data series product MOD13Q1, collection-5 of MODIS on board the Terra satellite. Ordinary kriging methodology was used for data smoothing of spatial distribution of soybean yield at municipal level, obtained from IBGE; accumulated rainfall, between October and February, came from data of 15 meteorological stations from FEPAGRO (Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária). The overall average LST over crop canopy in the studied period was 31.9 °C with standard deviation 2.1 °C. The overall average of the smoothed yield was 2003 kg ha⁻¹ with standard deviation 309 kg ha⁻¹. The average of cumulative rainfall was 775 mm with a standard deviation of 38 mm. At the state level analysis, results indicate that severe decreases in productivity are coupled events effect of canopy-LST above average during February (DOY 033), associated to below average rainfall by means an inverse nonlinear relationship with R² = 0.73 and RMSD = 17,8%.

Keywords: Remote sensing; Vulnerability; Agriculture; Soybean; Temperature; Drought.

Introdução

O monitoramento e o gerenciamento agrícola têm um papel importante frente ao aumento da demanda por produtos agrícolas e as incertezas quanto às flutuações das condições ambientais. Na última década, intensas flutuações das condições agrometeorológicas causaram efeitos severos na produção de alimentos e na economia, principalmente no sul do país. As culturas mais afetadas foram as de soja e milho, sendo que na safra da soja em 2005 a produção apresentou uma redução de 75% na produção de grãos, quando comparada à safra de 2003 (IBGE, 2012). Liu e Kogan (2002), em uma análise da produção brasileira com imagens de satélite, salientam que mesmo com clima geralmente favorável na maior parte das áreas de cultivo ocorrem grandes variações na produção agrícola de um ano para outro. No Estado do Rio Grande do Sul (RS) a frequência e a intensidade das chuvas, no período que vai da semeadura até a colheita, têm sido variáveis e frequentemente são insuficientes para o pleno desenvolvimento da cultura (Matzenauer *et al.*, 2002). A grande variabilidade interanual da precipitação, verificada principalmente em função dos fenômenos El Niño e La Niña, é o principal fator responsável pelas oscilações de produtividade na região sul (Ferreira, 2010), sendo que as culturas mais afetadas geralmente são as da soja e do milho (Fontana *et al.*, 2002) na safra de verão. Entretanto, a ocorrência de altas temperaturas e ondas de calor, associadas ou não à ocorrência de

estiagem, tem sido de interesse em publicações científicas (Batistti e Naylor, 2009) devido à necessidade de caracterização da vulnerabilidade e sustentabilidade dos processos agrícolas (Gusso, 2013). Lobell e Asner (2003), analisando um período de 17 anos entre 1982 a 1998, observaram que a perda de produtividade das culturas agrícolas de verão nos Estados Unidos da América (EUA) esteve associada ao aumento das temperaturas durante o período de desenvolvimento da safra, indicando a ocorrência de stress térmico sobre as culturas. Em um panorama de risco na produção de alimentos em decorrência de flutuações do clima, parâmetros físicos da superfície terrestre como disponibilidade hídrica e evapotranspiração devem sofrer alterações nas próximas décadas (Siqueira *et al.*, 2000; Peterson *et al.*, 2012) restringindo as condições de evolução dos cultivos e a produção (Lobell *et al.*, 2008; UNEP, 2009). Como resultado, distorções e incertezas nas políticas agrícolas devem acentuar perdas e estabelecer barreiras para o financiamento agrícola (FAO, 2011), pela imprevisibilidade de políticas agrícolas governamentais que tm maior influência na volatilidade dos preços nos países do que as flutuações do mercado internacional (UNEP, 2009). Desta maneira, a aplicação de metodologias simplificadas para o monitoramento das condições de evolução dos cultivos proporciona uma caracterização mais detalhada sobre a vulnerabilidade e sustentabilidade da agricultura no Brasil

(Gusso *et al.*, 2013). Tais desenvolvimentos são necessários frente à probabilidade e intensidade da ocorrência de altas temperaturas (Wheeler *et al.*, 2000), para a elaboração de prognósticos mais precisos (Lobell e Asner, 2003), e no aumento da capacidade de gerenciamento na produção das *commodities* agrícolas (Schlenker e Roberts, 2009; Gusso *et al.*, 2013). Dados de sensoriamento remoto associados a ferramentas geoestatísticas têm sido aplicados em estudos agrícolas. Tipicamente, dados de imagens dos satélites Terra e Aqua do programa EOS-MODIS (Earth Observing System - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) têm sido aplicados no monitoramento e modelagem de processos bioclimáticos, de ciclos de desenvolvimento das culturas, e em estimativa da produção agrícola (Huete *et al.*, 2002; Shimabukuru *et al.*, 2009; Gusso *et al.*, 2012). Trabalhos recentes têm evidenciado o efeito da ocorrência de temperaturas elevadas sobre a queda de produtividade das principais *commodities* agrícolas, como soja, milho e algodão. Estudos com séries temporais de dados de satélites têm evidenciado que os danos causados às plantas, com diminuição do desenvolvimento da cultura, podem estar associados à vulnerabilidade frente a ocorrência de ondas de calor (Nemani e Running, 1997; Liu e Kogan, 2002; Schlenker e Roberts, 2009; Gusso, 2013). Prejuízos na produtividade da soja ocorrem mesmo quando as temperaturas médias atingem apenas um ou

dois graus acima do ideal para a cultura (Lobell e Asner, 2003; Sedyama, 2009), seja pela redução na atividade fotossintética no dossel da vegetação em situação de estresse térmico (Board e Kahlon, 2007; Carmo-Silva *et al.*, 2012), seja pelo aumento da demanda evaporativa (Hope *et al.*, 1986; Nemani e Running, 1997), ou pela alteração na duração do período de florescimento (Rodrigues *et al.*, 2001). Mesmo tendo sido observado que o período de florescimento é mais sensível à temperatura do que ao estresse hídrico (Liu e Kogan, 2002; Board e Kahlon, 2007; Craufurd e Wheeler, 2009; Batistti e Naylor, 2009; Carmo-Silva *et al.*, 2012), os impactos de ondas de calor na produtividade ainda não são bem conhecidos (Salvucci, 2008; Meerburg *et al.*, 2009; Schlenker e Roberts, 2009). Neste sentido, este estudo tem como objetivo investigar a relação entre a ocorrência de temperaturas elevadas no dossel da vegetação e a queda na produtividade na cultura da soja no Rio Grande do Sul, utilizando dados dos sensores MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua.

Material e Métodos

A área estudada foi o território do Estado do Rio Grande do Sul (RS) com 496 municípios agrupados em dez regiões definidas pela EMATER (Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural). O clima predominante é subtropical úmido (*Cfa* e *Cfb*) com quatro estações bem definidas (Köppen, 1948). A Figura 1 mostra a área de estudo.

O período analisado foi os meses de outubro a fevereiro das safras de 2003 até 2012. A precipitação acumulada é relativamente bem distribuída ao longo do ano com média de 1554 mm e sem período seco, especialmente na metade norte do estado onde o cultivo da soja é dominante.

A temperatura média anual é 18,1 °C, mas ocorrem máximas absolutas elevadas em janeiro com 42,2 °C, 39,6 °C em fevereiro e 38,7 °C em março (INMET, 2009). Tipicamente, a precipitação acumulada neste período, que compreende a safra de verão é 647 mm, com desvio padrão 106 mm (INMET, 2009). No período entre as safras de 2003 e 2012 houve três ocorrências de estiagens nas safras de verão de 2004, 2005 e 2012, que afetaram a produtividade em diferentes níveis de intensidade.

Figura 1. Área de estudo, Estado do Rio Grande do Sul com suas áreas administrativas regionais da EMATER.

Nesse sentido, vários níveis de informação aliados aos dados de satélite foram aplicados de maneira a configurar adequadamente a distribuição espacial das grandezas envolvidas, conforme segue:

i) dados do índice de vegetação EVI obtidos do sensor MODIS a bordo do satélite Terra, o produto MOD13Q1-coleção 5, foram utilizados na seleção das áreas agrícolas e posterior análise da temperatura sobre o dossel da vegetação (LST-dossel). Neste estudo, os dados EVI em 250 metros também são utilizados como dados de entrada para o algoritmo de estimativa de área de soja MCDA (MODIS Crop Detection Algorithm) na seleção dos pixels representativos sobre áreas de cultivo agrícola com soja. Na coleção 5, o EVI é obtido por uma composição de máximo valor MVC (Maximum Value Composite) associada aos menores ângulos de visada do imageamento (Didan e Huete, 2006). O EVI é representativo do vigor da

vegetação por estar fundamentado na reflectância característica do dossel, e foi desenvolvido de maneira a minimizar os efeitos de contaminação da reflectância residual do solo e da influência atmosférica em observações feitas por satélites (Huete *et al.* 2002; Justice *et al.* 2002). Este produto está inserido no produto MOD13Q1-V005 que é estruturado como uma combinação das melhores medidas radiométricas e geométricas dos pixels que formam a imagem na composição de 16 dias. A equação que calcula o valor de EVI é dado por: $2.5 (Nir - Red) / (Nir + 6 Red - 7.5 Blue + 1)$, onde Nir, Red, e Blue são as reflectâncias superficiais corrigidas atmosféricamente das bandas de detecção posicionadas sobre as faixas do infravermelho próximo, do vermelho e do azul respectivamente (Huete *et al.*, 2002);

ii) dados de temperatura da superfície terrestre LST (Land Surface Temperature) produto MYD11A2, coleção-5 do sensor MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo do satélite Aqua do mês de fevereiro, tipicamente associado ao período da floração no Rio Grande do Sul (Pinto e Fontana, 2011), foram utilizados para a obtenção das médias e derivação dos desvios da temperatura sobre o dossel nas safras de 2003 a 2012. Os dados de LST do satélite Aqua foram escolhidos por serem coletados durante a passagem da tarde, momento do dia em que são registradas as maiores temperaturas;

iii) Normal Climatológica, utilizada na parametrização do modelo para localizar espacialmente as áreas com maior disponibilidade hídrica no período das safras de verão e seus desvios;

iv) dados de precipitação ocorrida no RS, obtidos da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO) para a análise dos desvios em relação à Normal Climatológica;

v) dados estatísticos oficiais e históricos de área ocupada, obtidos do IBGE, foram utilizados para comparação com a variabilidade na produtividade da soja;

vi) dados estatísticos oficiais e históricos da produção de soja e área municipal, do IBGE, para geração dos dados de produtividade municipal.

Extração dos dados

Os produtos MODIS são extraídos pelo aplicativo MODIS Reprojection Tool (MRT) que permite aos usuários ler e converter arquivos de dados no formato distribuído pela NASA (HDF-EOS) e especificar um recorte geográfico e o conjuntos de dados/produtos específicos. Este aplicativo também permite executar a transformação para um diferente sistema de coordenadas e projeção cartográfica (LPDAAC, 2011). Os produtos EVI e LST são distribuídos em formato de 16 bits e é necessário convertê-los para os valores de índice de vegetação e temperatura. Para a obtenção da área de cobertura do Estado do Rio grande do Sul o MRT realiza um processo de mosaicagem de dois recortes de imagens (Tiles H13V11 e H13V12) com

base em um geóide de Datum WGS84. Após o processamento dos dados de imagens pelo MRT o EVI deve ser escalonado para valores entre -1 e 1. Os dados LST são inicialmente escalonados para uma distribuição em valores de temperatura em Kelvin. Após estes procedimentos iniciais, todas as imagens foram reprojetaadas segundo a Projeção Cônica de Albers para Cálculo de Áreas Iguais, pois existe a necessidade de uma maior precisão espacial quando aplicadas metodologias auxiliares de estimativa de área da soja em ambos os produtos.

Assim, os dados da LST são representativos das médias máximas das temperaturas ocorridas no período de 32 dias a partir do dia juliano 033 do produto MYD11A2 (de 2 de fevereiro até 6 de março) tipicamente associado ao período da floração, em acordo com o calendário agrícola médio da cultura da soja no Rio Grande do Sul (PINTO e Fontana, 2011).

Interpolação espacial de dados

A geração de dados espaciais interpolados foi obtida por meio da aplicação do método de krigagem esférica/ordinária do programa SPRING 5.2.1 distribuído pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) que é baseada na tendência de variabilidade do valor das amostras e da distância entre elas (Jian-Guo e Mason, 2009). A krigagem destaca-se em especial por ser um método efetivo quando os dados a serem interpolados são esparsos, aplicando-se perfeitamente à situação encontrada no presente trabalho, no

qual apenas um número reduzido de estações meteorológicas estava disponível. Foram gerados mapas interpolados de produtividade e precipitação para análise em relação às imagens de LST e EVI.

Para cada município, foi obtido o centróide ao qual foi atribuído o valor de produtividade do município e, em seguida, geradas as médias regionais. Dados dos 496 municípios foram agrupados pelas áreas administrativas regionais da EMATER. É importante observar que a análise dos desvios, decorrente dos mapas suavizados, foi realizada somente sobre as áreas mapeadas como cultivo de soja, entre 2003 e 2012. Também é importante notar que os dados LST foram agrupados em composições de 32 dias. Estes foram obtidos do produto MYD11A2, que corresponde à composição de médias de oito dias, conforme distribuído pela NASA. Os dados de índice de vegetação EVI também foram agrupados em composições de 32 dias, pela combinação de duas composições de 16 dias.

Os dados de precipitação foram obtidos por meio da distribuição suavizada da precipitação obtida do período de outubro a fevereiro de cada safra, entre 2003 e 2012, obtidos da FEPAGRO. Os mapas de cada safra foram comparados ao mapa interpolado com 33 estações pluviométricas obtido das Normais Climatológicas. Os dados de produtividade de cada safra foram comparados às médias obtidas do IBGE, de 2003 a 2012. As Figuras 2a e 2b mostram a distribuição da produtividade, obtida da

média entre 2003 e 2012, e a distribuição das normais de precipitação (1971-2000) na região.

Validação dos mapas interpolados

A validação dos mapas interpolados de precipitação e produtividade foi realizada comparando-se com os dados oficiais obtidos do IBGE e INMET.

Figura 2. Distribuição da produtividade média (a), obtida do período entre 2003 e 2012 e precipitação acumulada de outubro a fevereiro, obtida da Normal Climatológica (1971-2000).

Os dados de precipitação foram comparados a partir dos totais por safra e acumulados no

período. Segundo dados tabelados da Normal Climatológica (1961-1990) a precipitação pluvial acumulada média no período estudado foi de aproximadamente 647 mm, com desvio padrão 106 mm (INMET, 2009), enquanto a média ocorrida no mesmo período, obtida de 14 estações meteorológicas foi 763 mm, com desvio padrão 249 mm. A precipitação pluvial acumulada média, no estado, obtida por meio da interpolação espacial de dados da Normal Climatológica (1971-2000) foi aproximadamente 678 mm, com desvio padrão 83 mm, enquanto a média ocorrida estadual obtida da interpolação espacial no mesmo período foi 731 mm, com desvio padrão 47 mm (Figura 2b) o que evidencia um bom ajuste entre os mapas interpolados e dados tabelados das estações meteorológicas utilizadas. A Figura 2a mostra a distribuição da produtividade média no período, obtida por meio da interpolação espacial de dados do IBGE. Considerando um limite mínimo de produtividade em 500 kg ha^{-1} a média geral da produtividade suavizada foi 2003 kg ha^{-1} com desvio padrão 309 kg ha^{-1} .

Estimativa da área agrícola

A delimitação adequada da área agrícola é necessária, pois buscamos analisar principalmente o comportamento da LST representativa da temperatura sobre o dossel da vegetação agrícola de soja. Desta maneira, o levantamento da área da cultura da soja foi obtido pela aplicação do MCDA (MODIS Crop Detection Algorithm), desenvolvido por Gusso *et al.* (2012), e calculado para cada

ano-safra. A geração do mapa de cultivo da soja, para as dez diferentes safras, foi realizada considerando uma composição que resulta da combinação de cada um dos mapas de área estimada das safras entre 2003 e 2012. O mapa obtido com esta composição média inclui todos os pixels selecionados como soja em que sua identificação como área de soja ocorre pelo menos duas vezes nas dez safras. Assim, os dados obtidos das Normais Climatológicas de precipitação normal, precipitação ocorrida, LST e produtividade da soja também são representativos de áreas onde houve cultivo da soja pelo menos duas vezes no período estudado. Tal procedimento resultou em um mapa com 5,37 milhões de hectares, 37,7% maior que a área média de soja no período entre 2003 a 2012, com aproximadamente 3,9 milhões de hectares (CONAB, 2012).

Figura 3. Mapa de área de soja obtido com aplicação do MCDA compondo as safras 2003 a 2012.

Relação entre temperatura do dossel e produtividade

No Brasil, a maioria das cultivares adaptadas para as condições locais apresentam ciclo de 90 a 150 dias (Sedyama, 2009). O calendário predominante de plantio da soja vai do final de outubro a meados de dezembro, segundo o zoneamento agrícola de menor risco climático para diferentes solos, regiões e cultivares (Cunha *et al.*, 2001; MAPA, 2010), normalmente atingindo o período da floração em meados de fevereiro (Pinto e Fontana, 2011). A LST-dossel entre 25,0 °C e 35,0 °C, quando a indução floral é ótima, e uma média ideal para seu desenvolvimento próximo a 30 °C são as temperaturas mais frequentemente mencionadas como as condições ideais para a soja (Board e Kahlon, 2007; Sedyama, 2009; Schlenker e Roberts, 2009; Khan *et al.*, 2011). Em geral, as plantas têm a capacidade de manter o conteúdo de água nos tecidos independentemente da temperatura, quando a umidade é suficiente; no entanto, altas temperaturas prejudicam severamente essa tendência quando o suprimento de água é limitado (Machado e Paulsen, 2001). Em sistemas agrícolas tão homogêneos como em campos de cultivo, mesmo quando as condições de disponibilidade hídrica não são limitantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas, a radiação incidente também afeta a capacidade dos estômatos para transpiração, alterando a relação entre calor sensível e calor latente (Nemani e Running, 1997; Sandholt *et al.*,

2002; Khan *et al.*, 2011). A ocorrência de estresse por temperaturas elevadas durante o período de floração e formação das vagens (R1-R5) afeta o número de sementes (Gibson e Mullen, 1996), e está fortemente associado às variações na produtividade (Board e Kahlon, 2007), tendo efeito cumulativo no desenvolvimento da vegetação (Gusso *et al.*, 2013). Dessa maneira, o uso combinado da LST e índice de vegetação supõe uma relação matemática inversa entre vigor vegetativo e a resposta termal característica do dossel (Hope *et al.*, 1986; Sandholt *et al.*, 2002; Gusso, 2013), iniciando processo de estresse térmico com perda de produtividade quando ocorrem temperaturas mais elevadas que este limite (Schlenker e Roberts, 2009). Entretanto, índices de vegetação, tipicamente fundamentados na relação entre as bandas do vermelho e infravermelho próximo, não são bons indicadores do estresse hídrico, pois a vegetação pode permanecer verde após o estresse hídrico inicial (Sandholt *et al.*, 2002). Goetz (1997) salienta esta característica observando que existe um período mínimo de resposta entre a diminuição da disponibilidade hídrica e alteração dos valores do índice de vegetação, mas uma resposta mais imediata é dada pelo aumento da temperatura do dossel, como efeito de redução na disponibilidade hídrica. Neste sentido, mesmo quando o índice de vegetação ainda indica uma característica típica da vegetação verde, uma sensível redução na disponibilidade hídrica promove o fechamento dos estômatos, o que

ocasiona uma redução na capacidade das plantas em reter a energia refletida por meio de absorção (Khan *et al.*, 2013), afetando também a capacidade da realização da fotossíntese e ocasionando perda do potencial de produtividade (Salvucci e Crafts-Brendner, 2004). Em resposta à baixa circulação de água na estrutura interna (mesofílica) da vegetação, a temperatura do dossel aumenta rapidamente (Goetz, 1997). Já na situação oposta, em que predominam superfícies bem úmidas, a relação entre índice de vegetação e LST-dossel está mais diretamente relacionada à umidade da superfície, pelo aumento da inércia térmica do solo (Friedl e Davis, 1994). A LST-dossel tem efeito direto sobre a capacidade de realização da fotossíntese, e entre os principais impactos que são promovidos por altas temperaturas o efeito sobre a fotossíntese é o mais importante porque inibe o crescimento da planta afetando a produtividade (Salvucci e Crafts-Brandner, 2004; Board e Kahlon, 2007; Gusso *et al.*, 2014). Vários autores (Jordan e Ogren, 1984; Salvucci e Carfts-Brendner, 2004; Salvucci, 2008; Khan *et al.*, 2013) têm investigado o processo de inibição da fotossíntese de plantas do tipo C3 (soja e trigo), como uma consequência da dependência da molécula RuBisCO (ribulose 1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase) às condições de temperatura do ambiente. Em geral, para plantas do tipo C3, a capacidade de tolerância ao estresse térmico envolve a manutenção da capacidade de aumentar a demanda

evaporativa para evitar o sobreaquecimento do dossel (Machado e Paulsen, 2001). O fechamento dos estômatos é a resposta mais imediata da planta ao estresse hídrico minimizando a perda de água pela evapotranspiração, mas principalmente, reduzindo o fluxo de CO₂. Desta diminuição decorre uma severa limitação da taxa de realização da fotossíntese em função da baixa afinidade natural da enzima Rubisco pela assimilação do CO₂. A transpiração reduzida em condições de aquecimento e incidência de radiação direta ocasiona a diminuição da capacidade de resfriamento da folha elevando a temperatura, o que conseqüentemente leva ao estresse térmico. Adicionalmente, a fotossíntese é extremamente sensível mesmo à ocorrência de estresse térmico moderado por estar associado entre outros fatores a uma instabilidade da molécula Rubisco, em associação a outros processos que, em última

análise, evitam a denaturação da molécula Rubisco mas como efeito, também reduzem a atividade fotossintética da planta (Salvucci e Crafts-Brandner, 2004; Salvucci, 2008; Khan *et al.*, 2013). A formação das vagens está associada aos eventos de estresse predominantes que ocorrem antes do período da floração, e o enchimento de grãos e a maturação são sensíveis ao estresse causado por temperaturas elevadas durante o desenvolvimento (Khan *et al.*, 2011).

Resultados e Discussão

A partir dos dados da distribuição da produtividade média (Figura 2a) e da precipitação média, gerados por krigagem (Figura 2b), e dados de imagens da LST e EVI obtidos do MODIS/Aqua e MODIS/Terra, respectivamente, dados das safras foram comparados individualmente e gerados gráficos de dispersão relativa. A

Tabela 1. Médias estaduais e desvio padrão da produtividade da soja, da LST-dossel e precipitação obtidos pela interpolação espacial dos dados no período entre 2003 e 2012.

Médias estaduais						
Ano/Safra	Produtividade (Kg ha ⁻¹)	Desvio Padrão	LST-dossel, DOY033 (°C)	Desvio padrão	Precipitação acumulada (mm)	Desvio Padrão
2003	2687	392	30.7	2.5	1228	86
2004	1549	295	31.3	3.4	840	99
2005	695	125	35.9	3.9	463	10
2006	2138	486	32.4	4.1	592	68
2007	2543	325	30.3	2.5	761	55
2008	2191	245	33.3	3.3	650	52
2009	2217	290	30.4	2.9	798	84
2010	2620	348	30.8	2.3	1194	126
2011	2895	388	28.4	2.8	725	110
2012	1601	466	35.4	3.8	500	43

média geral da LST sobre o dossel, ocorrida no período foi 31,9 °C com desvio padrão 2,1°C. A média da precipitação acumulada foi 775 mm com desvio padrão de 38 mm. A Tabela 1 apresenta as médias regionais da LST-dossel e produtividade da soja por safra. A Figura 4 mostra a variabilidade na distribuição dos pontos em nível estadual da produtividade média em função da LST-dossel média.

Figura 4. Gráficos de dispersão comparando a variação da produtividade média estadual como função da LST-dossel média das safras 2003 a 2012.

A análise dos dados estaduais por safra evidencia a associação da variabilidade da produtividade em função das condições agrometeorológicas predominantes, com uma tendência bem marcada entre a ocorrência de LST-dossel mais elevadas, acima da média, com a redução da disponibilidade hídrica. Eventos de queda severa de produtividade como 2005 e 2012, estão associados à ocorrência de LST-dossel acima da média, conjugada com precipitação abaixo da média e produtividades acima da média com LST-dossel abaixo da média, por uma relação

inversa não linear, tendo $R^2=0,73$ e $\text{RMSD}=17,8\%$.

O gráfico da Figura 5 mostra a distribuição dos pontos referentes às regionais com ocorrência de produtividade média em função da LST-dossel.

A melhor relação de ajuste foi obtida por meio de uma relação não linear, ocorrida no dossel da vegetação no mês de fevereiro, com $R^2=0,68$ e $\text{RMSD}=18,8\%$.

Figura 5. Gráficos de dispersão comparando a variação da produtividade média regional como função da LST-dossel média das safras 2003 a 2012.

Analizando a Figura 4 em associação com a Tabela 1, é possível observar máximas LST-dossel associados com safras em que ocorreu perda de produtividade, especialmente as safras 2005 e 2012. Também podemos observar que existe a tendência de maior produtividade quando ocorre LST-dossel abaixo da média estadual. Liu e Kogan (2002) observaram que as mais baixas ocorrências de LST no dossel estão associadas às melhores condições de crescimento da vegetação. Entretanto, em períodos secos, o impacto da deficiência hídrica se intensifica pelo sobreaquecimento da temperatura da

vegetação devido ao suprimento insuficiente de água no interior da planta (Liu e Kogan, 2002; Sandholt *et al.*, 2002; Gusso, 2013;). Em condições normais, a LST-dossel mantém a temperatura das folhas abaixo da temperatura do ar pela demanda evaporativa das folhas. Entretanto, a restrição de água ocasiona processos que levam ao aumento da temperatura no dossel e consequentemente da LST-dossel. Assim, o efeito de elevação da temperatura é amplificado pela estiagem (Gusso, 2013) fazendo com que a LST-dossel exceda facilmente a faixa ótima de temperaturas, inibindo a atividade fotossintética e levando à perda de produtividade. Dessa maneira, a relação entre LST-dossel e produtividade da soja não está plenamente estabelecida uma vez que as mais altas temperaturas estão geralmente mais relacionadas ao fechamento dos estômatos pelo estresse hídrico do que ao aumento da temperatura das folhas do dossel decorrente de onda de calor.

A Figura 6 mostra a relação que se estabelece entre as diferentes condições hídricas na safra de verão no Rio Grande do Sul e a produtividade, destacando que os períodos de ocorrência de maior precipitação acumulada estão associados às maiores produtividades.

Assim, as variações na precipitação acumulada são em relação às Normais Climatológicas acumuladas no mesmo período, entre outubro e fevereiro.

Figura 6. Gráficos de dispersão comparando a variação da produtividade regional como função da variação da precipitação acumulada, de outubro a fevereiro, das safras 2003 a 2012.

Considerando as safras mais afetadas por estresse hídrico conforme apresentado na Tabela 1 e Figura 6, podemos redefinir os pontos no gráfico da Figura 5 extraindo as regionais mais afetadas por estresse hídrico no período estudado. A identificação do efeito conjugado de ocorrência de estiagem e altas LST-dossel na safra 2005, por meio da análise de desvio da precipitação e desvio de temperaturas, indicam a ocorrência de sobreaquecimento do dossel como resultado da diminuição da evaporação pelo fechamento dos estômatos e uma consequente redução severa da atividade fotossintética levando a perda severa de produtividade da safra da soja.

A relação espacial entre as regionais estabelecida na Figura 1 está em acordo com a tendência temporal observada na Tabela 1, em que as condições acima da média, e também normais, de disponibilidade hídrica mostram uma tendência de aumento da produtividade.

Dessa maneira, realizamos a seleção das regionais somente com ocorrência de precipitação relativa acima da média, em cada regional, delimitando os eventos sem ocorrência de estresse hídrico. O gráfico da Figura 7 mostra a distribuição dos pontos referentes às regionais com ocorrência de precipitação acima da normal climatológica. A projeção da linha de tendência indica o efeito das temperaturas sobre a vegetação da safra de verão sem efeito associado de estresse hídrico estabelecendo uma relação linear inversa entre produtividade e LST-dossel.

Figura 7. Gráficos de dispersão comparando a variação da produtividade média regional como função da LST-dossel média de safras com precipitação acumulada acima da Normal.

A Figura 7 analisada em relação à Figura 6, e também em relação à Tabela 1, sugere que produtividade acima da média, em algumas regionais, é favorecida quando ocorre LST-dossel abaixo da média. Com exceção das safras 2003 e 2010, a maior parte das regionais tem precipitação em torno da média e com pequenos desvios (Figura 6), mas tem produtividade bem acima da média.

Entretanto, como mostra a Figura 6, um caso particular é a safra 2004. Mesmo com precipitação acumulada acima da média, o efeito da má distribuição espacial e temporal da precipitação acumulada pode ser notado. Como também observado por Gusso, (2013), que analisou a relação entre índice de vegetação e LST em 2004, houve perda importante de produtividade, mas houve ocorrência moderada de estresse hídrico com flutuação das LST-dossel em torno da média. O impacto da deficiência hídrica se intensifica pelo sobreaquecimento da temperatura no dossel da vegetação (Liu e Kogan, 2002; Sandholt *et al.* 2002; Gusso, 2013). Com base em 48 dos 100 pontos anteriores (Figura 6), o resultado ajustado obtido gerou $R^2=0,3$ e $RMSD=22,02\%$ com coeficiente angular $b1=-3,47$. Nos EUA, Lobell e Asner, (2003) encontraram uma relação linear com $R^2=0,32$.

Conclusão

A crescente demanda por *commodities* agrícolas e as incertezas quanto às flutuações das condições do ambiente em médio prazo impõem o desenvolvimento de metodologias e tecnologias de auxílio ao gerenciamento da produção agrícola. O monitoramento da LST-dossel, na análise das condições de desenvolvimento agrícola, constitui uma importante ferramenta na compreensão da vulnerabilidade regional e sustentabilidade das culturas agrícolas de verão.

Por meio de uma relação não linear foi observado que as variações relativas à LST-

dossel média ocorrida no mês de fevereiro, tanto em nível regional quanto estadual, estão associadas às variações na produtividade da cultura da soja no Rio Grande do Sul. Neste sentido, os resultados sugerem que a ocorrência de LST-dossel abaixo da média, conjugada com precipitação acumulada acima da média, favorece maior produtividade. Perdas na produtividade são amplificadas quando ocorre a conjugação de altas temperaturas no dossel da vegetação com estiagem, após o início do período de florescimento no Estado do Rio Grande do Sul. Entretanto, no caso da cultura da soja, os resultados sugerem que a influência de altas temperaturas no dossel da vegetação é reduzida quando a disponibilidade hídrica é maior que a média regional.

Agradecimentos

À Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Sul (FEPAGRO), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Os produtos MODIS foram obtidos através do acesso *online* ao Data Pool do NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota (https://lpdaac.usgs.gov/data_access).

Referências

- Batistti, D.S., Naylor, R.L. (2009) Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. *Science*, v. 323, p. 240-244.
- Board, J.E. & Kahlon, C.S. (2007) Soybean yield formation: what controls it and how it can be improved. In: *Soybean Physiology and Biochemistry*, El-Shemy, H.A. Ed., pp. 1–36, InTechOpen Access, Rijeka, Croatia.
- Carmo-Silva, A. E.; Gore, M. A.; Andrade-Sanchez, P.; French, A. N.; Hunsaker, D. J. & Salvucci, M. E. (2012). Decreased CO₂ availability and inactivation of Rubisco limit photosynthesis in cotton plants under heat and drought stress in the field. *Environmental and Experimental Botany*, v. 83, p. 1-11.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (2012). Acompanhamento da safra brasileira de grãos. CONAB/DIPAI/SUINF/GEASA. Conab: Brasília.
- Craufurd, P.Q. & Wheeler, T.R. (2009) Climate change and the flowering time of annual crops. *Journal of Experimental Botany*, v. 60, p. 2529–2539.
- Cunha, G.R., Barni, N.A., Haas, J.C., Maluf, J.R.T., Matzenauer, R., Pasinato, A., Pimentel, M.B.M. & Pires, J.L.F. (2001) Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul, *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 9, 446-459.
- Didan, K. & Huete, A. (2006). MODIS Vegetation Index Product Series: Collection 5 Change Summary. TBRs Laboratories. The University of Arizona.
- FAO – Food and Agriculture Organization. The State of Food Insecurity in the World (2011). <http://www.fao.org/docrep/013/i2050e/i2050e07.pdf> (acessado em 29 de novembro, 2012).
- Ferreira, D. B. Análise da variabilidade climática e suas consequências para a

produtividade da soja na região sul do Brasil, Ph.D. Thesis, INPE, São José dos Campos, 2010.

Fontana, D. C.; Weber, E.; Ducati, J. R.; Berlatto, M. A.; Guasselli, L. A. & Gusso, A. (2002). Monitoramento da cultura da soja no centro-sul do Brasil durante La Niña de 1998/2000. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 10, p. 343-351.

Friedl, M.A. & Davis, F.W. (1994). Sources of Variation in Radiometric Surface Temperature over a Tallgrass Prairie. *Remote Sensing of Environment*, v.48, p.1-17.

Gibson, L.R. & Mullen, R.E. (1996). Soybean seed quality reductions by high day and night temperature. *Crop Sci.*, v..36, p. 1615–1619.

Goetz, S. J. (1997). Multisensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 71– 94.

Gusso, A. (2013) Integração de imagens NOAA/AVHRR: Rede de cooperação para monitoramento nacional da safra da soja. *Revista Ceres*, v. 60, p. 43-52.

Gusso, A., Ducati, J.R., Veronez, M.R., Arvor, D. & Silveira Jr, L.G. (2013) Spectral model for soybean yield estimate using MODIS/EVI data. *International Journal of Geosciences*, 4, 1233-1241.

Gusso, A., Ducati, J.R., Veronez, M.R., Sommer, V. e Silveria-Junior, L.G. (2014). Monitoring heat waves and their impacts on summer crop development in southern Brazil. *Agricultural Sciences*, v.5, 353-364.

Gusso, A.; Adami, M.; Formaggio, A. R.; Rizzi, R. & Rudorff, B. T. F. (2012). Soybean area estimation and mapping by means MODIS/EVI data. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, p. 425-435.

Hope, A. S., Petzold, D. E., Goward, S. N. & Ragan. R. M. (1986) Simulated relationships between spectral reflectance thermal emissions and evapotranspiration of a

soybean canopy. *Water Resources Bulletin*, v.22, p.1011–1019.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X. & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, p. 195-213.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia – Normais Climatológicas do Brasil de 1961 a 1990, (2009) [http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdm ep/bdmep](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdm%2Fbdmep) (acessado em 30 de março, 2012).

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. SIDRA: sistema IBGE de recuperação automática. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. (acessado em 12 de outubro, 2012).

Jian-Guo, L. & Mason, P. J. (2009) *Essential Image Processing and GIS for Remote Sensing*. Wiley-Blackwell, p. 460.

Justice, C. O. ; Townshend, J. R. G.; Vermote, E. F.; Masuoka, E., Wolfe, R. E.; Saleous, N.; Roy, D. P. & Morisette, J. T. (2002). An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, p. 3-15.

Khan, A.Z., Shah, P. Khan, H., Nigar, S., Perveen, S., Shah, M.K., Amanullah, A., Khalil, S.K., Munir, S., Zubair, M. (2011) Seed quality and vigor of soybean cultivars as influenced by canopy temperature. *Pak. J. Bot.*, 43, 643-648.

Khan, M.I.R., Asgher, M. & Khan, N.A. (2013). Rising temperature in the changing environment: A serious threat to plants. *Climate Change and Environmental Sustainability*, 1, 25-36.

Köppen, W. (1948). *Climatologia*. Fondo de Cultura Económica, p. 71.

Liu, W. T. & Kogan, F. (2002). Monitoring Brazilian soybean production using NOAA/AVHRR based vegetation indices.

- International Journal of Remote Sensing, v. 23, p. 1161-1180.
- Lobell, D.B. & Asner, G.P. (2003). Climate and management contributions to recent trends in U.S. agricultural yields. *Science*, v. 229, p. 1032.
- Lobell, D.B., Burke, M.B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M.D., Falcon, W.P. & Naylor, R.L. (2008). Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. *Science*, 319, 607-610. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1152339> (acessado em 17 de novembro, 2011).
- Machado, S. & Paulsen, G.M. (2001). Combined effects of drought and high temperature on water relations of wheat and sorghum. *Plant and Soil*, 233, 179-187.
- MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e do Abastecimento (2010). Portaria nº 126, de 20 de julho de 2009. Aprova o zoneamento agrícola para a cultura de soja no Estado do Rio Grande do Sul, ano safra 2009/2010. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Seção 1, p.15.
- Matzenauer, R., Bergamaschi, H., Berlato, M. A., Maluf, J. R. T., Barni, N. A., Bueno, A. C., Didone, I. A., Anjos, C. A., Machado, F. A. & Sampaio, M. R. (2002). Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul (Water consumption and water availability for corn and soybean in Rio Grande do Sul), FEPAGRO, p. 105.
- Meerburg, B.G., Verhagen, A., Jongschaap, R.E.E., Franke, A.C., Schaap, B.F., Dueck, T.A., and van der Werf, A. (2009) Do nonlinear temperature effects indicate severe damages to US crop yields under climate change? *Proc. of the Nat. Acad. of Sci.*, 106, 120. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0910618106>.
- NASA - National Aeronautics and Space Administration. Land Processes Distributed Active Archive Center (LPDAAC). https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool (acessado em 5 de janeiro, 2014).
- Nemani, R. & Running, S. (1997) Land cover characterization using multitemporal red, near-ir, and thermal-ir data from NOAA/AVHRR. *Ecological Applications*, v.7, p.79-90.
- Nemani, R. and Running, S. (1997) Land cover characterization using multitemporal red, near-ir, and thermal-ir data from NOAA/AVHRR. *Ecological Applications*, v. 7, p. 79-90.
- Peterson, T.C., Stott, P.A. & Herring, S. (2012) Explaining extreme events of 2011 from a climate perspective. *American Meteorological Society*, 1, 1041-1067. <http://dx.DOI:10.1175/BAMS-D-11-00021.1>.
- Pinto, D. G.; Fontana, D. C. Inferências sobre o calendário agrícola da soja a partir de perfis temporais de NDVI em imagens MODIS. SBSR, 2011, Curitiba.
- Rodrigues, O., Didonet, A.D., Lhamby, J.C.D., Bertagnolli, P.F. & Luz, J.S. (2001) Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 36, p. 431-437.
- Salvucci, M. & S.J. Crafts-Brandner, (2004). Relationship between the Heat Tolerance of Photosynthesis and the Thermal Stability of Rubisco Activase in Plants from Contrasting Thermal Environments. *Plant Physiology*, v. 134, p. 1460-1470.
- Salvucci, M. (2008). Association of Rubisco activase with chaperonin-60b: a possible mechanism for protecting photosynthesis during heat stress. *Journal of Experimental Botany*, v.59, p. 1923-1933.
- Sandholt, I., Rasmussen, K. & Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, v.79, p. 213-224.
- Schlenker, W. & Roberts, M. (2009) Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 15594-15598.

Schlenker, W. & Roberts, M. (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 106, p. 15594-15598.

Sediyama, T. (Org.). *Tecnologias de produção e usos da soja*. 1. ed. Londrina, PR: Mecenias, 2009, v. 1. 314 p.

Shimabukuru, Y. E.; Maeda, E. E. & Formaggio, A. R. (2009). Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicados ao estudo dos recursos agrônômicos e florestais. *Revista Ceres*, v. 56, p. 399-409.

Siqueira, O. J. W. ; Steinmetz, S.; Ferreira, M. F.; Costa, A. C. & Wozniak, M. A. (2000) Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 8, p. 311-320.

UNEP - United Nations Environment Programme. Environmental Food Crisis. The environment's role in averting future food crises. (2009). Available online: http://www.unep.org/pdf/foodcrisis_lores.pdf. (acessado em 1 de março, 2010).

Wheeler, T.R., Craufurd, P.Q., Ellis, R.H., Porter, J.R. & Prasad, P.V.V. (2000). Temperature variability and the yield of annual crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 82, 159–167.