

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

**PADRÃO ESPAÇO TEMPORAL DO TVDI
EM ÁREA DE CULTIVO DE SOJA**

Lucimara Wolfarth Schirmbeck

PORTO ALEGRE

2016

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

**PADRÃO ESPAÇO TEMPORAL DO TVDI
EM ÁREA DE CULTIVO DE SOJA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto para obtenção do título de Mestre em
Sensoriamento Remoto.

Área de Concentração: Sensoriamento Remoto
aplicado.

Lucimara Wolfarth Schirmbeck

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Denise Cybis Fontana

PORTO ALEGRE

2016

CIP - Catalogação na Publicação

Schirmbeck, Lucimara Wolfarth

Padrão espaço temporal do TVDI em área de cultivo de soja / Lucimara Wolfarth Schirmbeck. -- 2016. 78 f.

Orientador: Denise Cybis Fontana.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. estresse hídrico. 2. triângulo evaporativo. 3. imagens MODIS. 4. temperatura de superfície. I. Fontana, Denise Cybis , orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucimara Wolfarth Schirmbeck

PADRÃO ESPAÇO TEMPORAL DO TVDI EM ÁREA DE CULTIVO DE SOJA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto para obtenção do Título de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Área de Concentração: Sensoriamento Remoto aplicado.

Aprovada em 18 de fevereiro de 2016.

Prof. Dr. Eliseu José Weber – ULBRA

Prof. Dr. Ricardo Wanke de Melo – UFRGS

Prof. Dr. Jorge Ricardo Ducati – UFRGS

Prof.^a Dr.^a Denise Cybis Fontana – UFRGS (Orientadora)

AGRADECIMENTOS

Com imensa gratidão e alegria que agradeço a todos que de alguma forma contribuíram ao longo desta jornada. Realizar um sonho é muito bom principalmente na companhia de pessoas tão especiais.

- À minha orientadora Denise Cybis Fontana que gentilmente aceitou me orientar, e que no decorrer da caminhada se tornou uma grande amiga. Muito obrigada pelo apoio, pela confiança depositada, pelos ensinamentos, pela paciência, pela afabilidade;
- Ao Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia pela oportunidade da realização deste trabalho, aos funcionários pela amizade e apoio dedicado;
- À CAPES pela bolsa de incentivo financeiro essencial durante o estudo;
- Aos professores pela dedicação e empenho que contribuíram na minha formação profissional;
- Ao Prof. Jorge R. Ducati, pelos ensinamentos, discussões sobre temas diversos que de alguma maneira envolvem espaço, satélites e ou sensoriamento remoto;
- Aos meus colegas e amigos da turma de Pós-graduação, pela troca de experiências e pela amizade;
- Aos meus pais Pedro e Odila, pelo apoio, por me ensinarem a importância da família e do convívio em harmonia;
- Ao meu vô Albino, com seu exemplo de vida me ensinou que nunca é tarde para nada e como é importante a fé e a perseverança;
- Às minhas irmãs Luciane e Lucilene, companheiras, sempre com uma palavra de apoio e ternura;
- Ao Juliano meu grande amor, marido e amigo, pelo apoio, incentivo, pela ajuda incondicional em todos os momentos fáceis ou difíceis;
- Acima de tudo a DEUS, energia cósmica universal que habita dentro de nós dando vida e força.

PADRÃO ESPAÇO TEMPORAL DO TVDI EM ÁREA DE CULTIVO DE SOJA¹

Autora: Lucimara Wolfarth Schirmbeck

Orientadora: Denise Cybis Fontana

Resumo: Levando em consideração a influência das variáveis meteorológicas no desenvolvimento dos cultivos e na definição do rendimento de grãos, o monitoramento da resposta da cultura da soja frente às condições ambientais se torna necessário devido sua importância tanto no cenário internacional quanto nacional. Sabe-se que para a cultura da soja, a estiagem é a causa mais frequente das perdas em safras no Rio Grande do Sul. Neste contexto, testar ferramentas de monitoramento em tempo quase real das condições hídricas das lavouras de soja ao longo do ciclo torna-se relevante e permite verificar se a cultura está em adequadas condições de crescimento e desenvolvimento. Os objetivos deste estudo foram avaliar a aptidão do índice TVDI em representar as condições de disponibilidade hídrica em áreas de cultivo de soja no Rio Grande do Sul; caracterizar e analisar a sensibilidade dos parâmetros da relação entre a temperatura de superfície (TS) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e, por fim, comparar as abordagens por cena e por safra no processo de parametrização do índice TVDI para a cultura da soja. Para tanto, foram utilizados os produtos MODIS TS (MOD11A2) e NDVI (MOD13A2) com resolução espacial de 1.000 m e temporal de 8 e 16 dias, respectivamente, assim como dados de precipitação pluvial de 3 estações meteorológicas localizadas na área de estudo e dados oficiais do IBGE de área e de rendimento. Os resultados mostraram que a abordagem de parametrização por cena possibilita o entendimento da distribuição espacial das condições hídricas da área de estudo frente aos limites hídricos de cada imagem. Os parâmetros "b" e "TSmin" utilizados para determinar as retas dos limites seco e úmido do triângulo evaporativo na determinação do TVDI com parametrização por cena podem auxiliar na compreensão do perfil temporal deste índice ao longo da safra. Já a parametrização por safra, mostrou aptidão do índice em representar o momento e a frequência de ocorrência de restrição hídrica ao longo do ciclo da cultura. O método do triângulo evaporativo para a obtenção do índice TVDI mostra-se eficiente, pois permite a partir de dados de sensoriamento remoto, o entendimento do padrão espacial e temporal de resposta da vegetação frente à disponibilidade hídrica, além de informações de grande utilidade para sistemas de monitoramento e estimativas de safras.

Palavras-chave: estresse hídrico, triângulo evaporativo, MODIS, NDVI, temperatura da superfície.

¹Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil, (78 p.). Fevereiro 2016.

SPATIOTEMPORAL PATTERN OF TVDI IN A SOYBEAN GROWING AREA¹

Author: Lucimara Wolfarth Schirmbeck

Adviser: Denise Cybis Fontana

Abstract: In view of the influence of meteorological variables on crop growth and grain yield, monitoring the response of soybean to different environmental conditions is essential, given the international and domestic importance of this crop. Drought is the leading cause of soybean crop losses in the Brazilian state of Rio Grande do Sul. In this context, testing tools for monitoring in near real time the water conditions of soybean fields throughout their cycle becomes relevant and allows for checking if the crop is under proper conditions for growth and development. The objectives of this study were: to assess the adequacy of the temperature–vegetation dryness index (TVDI) to represent water availability status in soybean growing areas in Rio Grande do Sul; to characterize and analyze the sensitivity of the surface temperature (T_s)/normalized difference vegetation index (NDVI) ratio; and to compare the scene-specific and crop-specific approaches for parameterization of TVDI. To this end, the MODIS TS (MOD11A2) and NDVI (MOD13A2) products were used, with a spatial resolution of 1000 m and a temporal resolution of 8 and 16 days respectively, as well as precipitation data from 3 weather stations located in the study area and official area and yield data from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). Results showed that the scene-specific parameterization approach was able to provide an understanding of the spatial distribution of water status in the area of interest as derived from the dry and wet edges of each image. With scene-based parameterization, the “b” and “ T_{Smin} ” parameters used to determine the dry and wet edges of the T_s /NDVI can help elucidate the temporal profile of this index throughout the harvest period. With crop-type parameterization, the TVDI was able to represent the timing and frequency of limited water availability during the crop cycle. The triangle method proved effective in deriving the TVDI, as it provides a means of using remote sensing data to understand the spatiotemporal response pattern of vegetation to water availability, as well as other information that can be highly useful for monitoring systems and crop estimation.

Keywords: triangle method, MODIS, NDVI, surface temperature.

¹Master of Science dissertation in Remote Sensing, Graduate Program in Remote Sensing, Federal University of Rio Grande do Sul, RS, Brazil, (78 p.). February 2016.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vii
1 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	1
2 INTRODUÇÃO	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Cultura da Soja	5
3.1.1 Calendário Agrícola da Soja.....	6
3.1.2 Ciclo Fenológico da Soja.....	8
3.1.3 Soja e Disponibilidade Hídrica.....	9
3.2 Comportamento Espectral de Lavouras Anuais	10
3.3 Índices de Vegetação (IV)	13
3.4 Temperatura da Superfície (TS)	17
3.5 Detecção de Estresse Hídrico	19
3.6 Produtos MODIS	21
4 REFERÊNCIAS.....	23
5 RESULTADOS	27
5.1 ARTIGO 1	27
Padrão espaço temporal do TVDI em áreas de cultivo de soja sob condições de clima subtropical úmido.....	27

5.2	ARTIGO 2	44
	Diferentes abordagens de uso do triângulo evaporativo no cálculo do TVDI em condições de clima subtropical úmido	44
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dossel da cultura.	6
Figura 2. Variabilidade do calendário agrícola da soja no Rio Grande do Sul para os subperíodos de floração, enchimento de grãos e maturação na primeira e segunda quinzena de dezembro (D), janeiro (J), fevereiro (F), março (M), abril (A) e maio (M). As barras cinza indicam o período de início (5%) e de final (95%) da cada etapa, as barras pretas indicam a quinzena em que foi atingida a máxima área de lavouras na etapa. As linhas em cada regional estão associadas ao período de 2000-2001 a 2009-2010.	8
Figura 3. Reflectância da soja aos 41, 102 e 139 dias após a emergência (DAE). (A) semeadura direta, não irrigada; (B) semeadura direta, irrigada; (C) preparo convencional não irrigado; e (D) preparo convencional irrigado. Local de estudo EEA-UFRGS, Eldorado do Sul-RS, 2003/04.	12
Figura 4. Perfil temporal do NDVI em áreas de cultivo da soja no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Safra 2005/2006.	17
Figura 5. Triângulo Evaporativo.	20
Figura 6. Localização da área de estudo no Estado do Rio Grande do Sul.	31
Figura 7. Triangulo Evaporativo.	33
Figura 8. Perfil temporal do índice TVDI e do índice de vegetação NDVI para o noroeste do Rio Grande do Sul e precipitação pluvial das estações meteorológicas de Cruz Alta, São Luiz Gonzaga e Passo Fundo, na safra de 2004-05 (A) e na safra de 2009-10 (B).	36
Figura 9. Dispersão entre e o índice TVDI e a precipitação pluvial acumulada em 16 dias para Cruz Alta, São Luiz Gonzaga e Passo Fundo. Pontos em preto safra 2004-05, em verde safra 2009-10.	37

- Figura 10. Dispersão entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e a temperatura de superfície (TS) nas cenas de 18/02/2005 (A) e 06/03/2010 (B) no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.....39
- Figura 11. Imagens do índice TVDI para o noroeste do Estado do Rio Grande do Sul nas cenas de 18/02/2005 e 06/03/2010..... 39
- Figura 12. Dispersão entre valores de precipitação pluvial e os parâmetros "b" e "TSmin" utilizados para obtenção do índice TVDI sobre as estações meteorológicas de Cruz Alta, São Luiz Gonzaga e Passo Fundo. Pontos em preto safra 2004-05 em verde safra 2009-10. 40
- Figura 13. Localização da área de estudo em destaque no Estado do Rio Grande do Sul.49
- Figura 14. Triângulo Evaporativo. 50
- Figura 15. Dispersão entre o índice de vegetação (NDVI) e a temperatura de superfície (TS) para as imagens de 02/02/2005 (A) e 18/02/2005 (B) no Rio Grande do Sul. Em vermelho e azul, respectivamente os pixels utilizados para obtenção dos parâmetros que caracterizam o limite seco e úmido do triângulo evaporativo. 53
- Figura 16. Distribuição espacial do TVDI com parametrização por cena para a safra 2004-05. Limites em preto caracterizam as macrorregiões do Estado (região noroeste com borda destacada), as áreas em branco correspondem a regiões mascaradas como nuvens provenientes da imagem de temperatura de superfície. 54
- Figura 17. Distribuição espacial do TVDI com parametrização por cena para a safra 2009-10. Limites em preto caracterizam as macrorregiões do Estado (região noroeste com borda destacada), as áreas em branco correspondem a regiões mascaradas como nuvens provenientes da imagem de temperatura de superfície. 55
- Figura 18. Dispersão entre o índice de vegetação (NDVI) e a temperatura de superfície (TS) para as imagens das safras de 2004-2005 (A) e 2009-10 (B) no Rio Grande do Sul. Em

vermelho e azul, respectivamente os pixels utilizados para obtenção dos parâmetros que caracterizam o limite seco e limite úmido do triângulo evaporativo.....	56
Figura 19. Distribuição espacial do TVDI com parametrização por safra (2004-05). Limites em preto caracterizam as macrorregiões do Estado (região noroeste com borda destacada), as áreas em branco correspondem a regiões mascaradas como nuvens provenientes da imagem de temperatura de superfície.....	58
Figura 20. Distribuição espacial do TVDI de distintas imagens com parametrização por safra (2009-10). Limites em preto caracterizam as macrorregiões do Estado e a região noroeste com borda destacada, as áreas em branco correspondem a regiões mascaradas como nuvens provenientes da imagem de temperatura de superfície.....	59
Figura 21. Perfis médios do índice TVDI na parametrização por safra, do índice de vegetação NDVI e da precipitação pluvial acumulada de 16 dias para as áreas de cultivo de soja no noroeste na safra de 2004-05 (A) e na safra de 2009-10 (B).....	60
Figura 22. Dispersão entre a precipitação pluvial acumulada de 16 dias, obtida nas estações de Cruz Alta, São Luiz Gonzaga e Passo Fundo, e o índice TVDI em áreas de cultivo de soja no noroeste do Rio Grande do Sul. Em laranja os pontos da dispersão para a safra 2004-05 em azul os pontos da dispersão para a safra 2009-10.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Ciclo fenológico da soja.....	9
Tabela 2. Parâmetros a (intercepto), b (inclinação) e TSmin (temperatura mínima) utilizados para o cálculo do TVDI na parametrização por safra nas safras de 2004-05 e 2009-10 para o Rio Grande do Sul.....	52

1 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi organizada em duas seções, sendo que na primeira são apresentados introdução, hipótese, objetivo geral e objetivos específicos, revisão da literatura e referências bibliográficas. Na segunda seção são abordados os resultados em forma de dois artigos científicos a serem publicados, cujos títulos são:

Artigo 1 – Padrão espaço temporal do TVDI em áreas de cultivo de soja sob condições de clima subtropical úmido.

Artigo 2 – Diferentes abordagens de uso do triângulo evaporativo no cálculo do TVDI em condições de clima subtropical úmido.

Ao final é apresentado um capítulo com considerações finais onde são abordadas as principais conclusões sobre todo o estudo.

2 INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul se caracteriza pela intensa produção de grãos, sendo o terceiro maior produtor nacional de soja. No Estado, a soja é a cultura que ocupa a maior área de cultivo, com 4,9 milhões de hectares, totalizando uma produção de cerca de 13 milhões de toneladas (safra 2013/2014). A cultura encontra-se ainda em processo de expansão na área de cultivo no Estado, o que está ocorrendo para áreas não tradicionais, tornando ainda mais relevantes as pesquisas que buscam instrumentos de monitoramento da resposta das plantas às condições ambientais.

A maior parte da produção de soja no Rio Grande do Sul é conduzida em condições não irrigadas. Nestas condições, a variabilidade do regime de precipitação pluvial está diretamente associada à variabilidade do crescimento e desenvolvimento das plantas, e, portanto, da produção de biomassa e de grãos desta cultura. A estiagem é, portanto, considerada como o principal fator de perdas de safra da soja no Rio Grande do Sul.

A precipitação pluvial abaixo da demanda evaporativa da atmosfera determina a ocorrência de estiagem, que se prolongada no tempo, pode gerar estresse hídrico nas plantas, o qual compromete a produção agrícola. Especialmente no caso da soja, dada a extensão de cultivo e condições de manejo empregadas, as estiagens trazem consequências evidentes para a economia do Estado. É de extrema importância, portanto, conhecer o padrão espaço temporal da disponibilidade hídrica das lavouras de soja nas diversas regiões produtoras, o que pode servir de subsídio para programas de previsão de safras, ações de redução de risco, ou mesmo para o planejamento de ações mitigatórias destes eventos adversos.

Produtos oriundos do sensoriamento remoto são úteis neste contexto, visto que podem disponibilizar informações que possibilitam monitorar o crescimento e desenvolvimento das plantas. Os índices de vegetação, obtidos das bandas da porção reflexiva do espectro eletromagnético, respondem à variabilidade da biomassa verde e, por isso, tem sido utilizados na modelagem de rendimento de grãos de diversas culturas, entre elas, a soja. Também, a partir das imagens podem ser obtidas informações capturadas na porção termal do espectro eletromagnético, relacionadas à temperatura da vegetação, a qual é indicadora do estado hídrico das plantas.

Na literatura está disponibilizado um número muito grande de índices, de uso não difundido, oriundos de imagens de satélite, que permitem o monitoramento da superfície, os quais trazem a informação espectral oriunda de diversas porções do espectro eletromagnético.

Tendo em vista a problemática abordada e a importância econômica e social da soja no Estado, é relevante testar ferramentas de monitoramento das condições das lavouras ao longo do ciclo que permitam identificar se a cultura está em adequadas condições de crescimento e desenvolvimento. O reconhecimento de anomalias de crescimento pode gerar informações úteis aos órgãos governamentais responsáveis pela geração das estatísticas agrícolas e previsão de safras, ou mesmo para alguma ação de manejo por parte do agricultor.

O objetivo geral do estudo é avaliar a aptidão do índice TVDI em representar a disponibilidade hídrica nas condições de clima e manejo predominante das áreas de cultivo de soja no Rio Grande do Sul.

Como objetivos específicos:

1. Caracterizar a forma da relação entre a temperatura de superfície (TS) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) nas condições climáticas o Estado;
2. Comparar as abordagens por cena e por safra no processo de parametrização do índice TVDI para a cultura da soja;
3. Analisar a sensibilidade dos parâmetros da relação entre TS e NDVI no cálculo do índice TVDI e na caracterização do estresse hídrico da vegetação;
4. Analisar a relação entre o índice TVDI e a precipitação pluvial.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cultura da Soja

A soja (*Glycinemax L.*) pertence à família Fabaceae (leguminosas), é uma espécie exótica para o Brasil e apresenta grande interesse socioeconômico, em função dos teores elevados de proteína e óleo, da alta produtividade de grãos e da possibilidade de adaptação a ambientes diversos (EMBRAPA, 2014).

Atualmente, a maior parte da soja produzida no Brasil é modificada geneticamente (transgênica), como consequência da menor necessidade de aplicação de herbicidas, menor demanda por mão-de-obra, o que diminuiu os custos de produção (EMBRAPA, 2014). Esta modificação ocorrida nas cultivares utilizadas, motiva a realização de estudos de forma a caracterizar a cultura e sua resposta aos fatores ambientais.

O sistema de semeadura adotado no Rio Grande do Sul é por plantio direto, o qual foi ampliado no início dos anos 2000 e consiste de forma simplificada no ato de depositar sementes no solo, na ausência de sua mobilização intensa com aração ou gradagem, mantendo os resíduos culturais na superfície do solo. O espaçamento entre fileiras pode variar de 20 a 50 cm e a população situa-se em torno de 300.000 plantas por hectare. A profundidade de semeadura recomendada é de 2,5 a 5 cm, sendo que as menores profundidades podem ser adotadas quando há adequada disponibilidade hídrica no solo (Costamilan et al., 2012).

Ao longo do desenvolvimento da cultura, o dossel da soja pode ser monitorado a partir do índice de área foliar (IAF), denominado por Watson (1947) como sendo a razão entre a área foliar do dossel e a unidade de superfície projetada no solo (m^2/m^2). O IAF é indicativo do potencial de rendimento de grãos (Matzenauer et al., 2002,

EMBRAPA, 2014), sendo que o valor varia em função do tamanho e do número de folhas, que por sua vez, depende da taxa de desenvolvimento e da manutenção das folhas verdes no caule e ramos laterais. Assim, o IAF está associado à capacidade do dossel em interceptar radiação solar e fazer a conversão da mesma em biomassa, através do processo fotossintético. Na cultura de soja, o valor do IAF em que a cultura intercepta o máximo de radiação (IAF ótimo) situa-se em média no intervalo de 3,5 a 4, sendo normalmente atingido quando a cultura encontra-se no início do florescimento (EMBRAPA, 2014). A partir deste momento, a cultura apresenta o dossel bastante desenvolvido e homogêneo, não sendo mais visualizado o solo sob a cultura (Figura 1).



Figura 1. Dossel da cultura.
Fonte: EMBRAPA (2014).

3.1.1 Calendário Agrícola da Soja

Os cultivares recomendados para semeadura no Estado do Rio Grande do Sul possuem um ciclo médio de 140 dias (Thomas e Costa, 2010). Após a semeadura, de 7 a 10 dias, a soja começa a germinar. O crescimento ocorre após a emissão de folhas no caule. A soja tem um período de 50 a 55 dias de crescimento. No florescimento, como mencionado anteriormente, é quando a soja atinge o máximo índice de área foliar. Durante o enchimento de grãos, a planta transloca nutrientes das folhas para os grãos e

no final deste estágio (maturação) as folhas amarelam e caem. A maturação ocorre quando o grão perde a coloração verde e o conteúdo de água (Mundstock e Thomas, 2005).

Na região norte do Estado do Rio Grande do Sul a cultura da soja se desenvolve entre os meses de outubro a maio, sendo a época de semeadura recomendada de 11 de outubro a 31 de dezembro, com maior concentração em novembro (Cunha et al., 2001, Santos et al., 2014).

A Associação Riograndense de Empreendimentos de Assistência Técnica de Extensão Rural (EMATER) disponibiliza dados de acompanhamento do ciclo das culturas anuais, que são os denominados calendários agrícolas. Estes localizam no tempo os períodos em que ocorre o desenvolvimento vegetativo, a floração e o enchimento de grãos para as safras. Para a cultura da soja o calendário médio de 2000/2001 a 2009/2010 é mostrado na Figura 2, dividido em regionais conforme dados disponíveis pela EMATER. Salienta-se que do ponto de vista hídrico um dos períodos mais importantes está associado à floração e enchimento de grãos, que abrange principalmente os meses de fevereiro e março, considerados como críticos para a cultura.

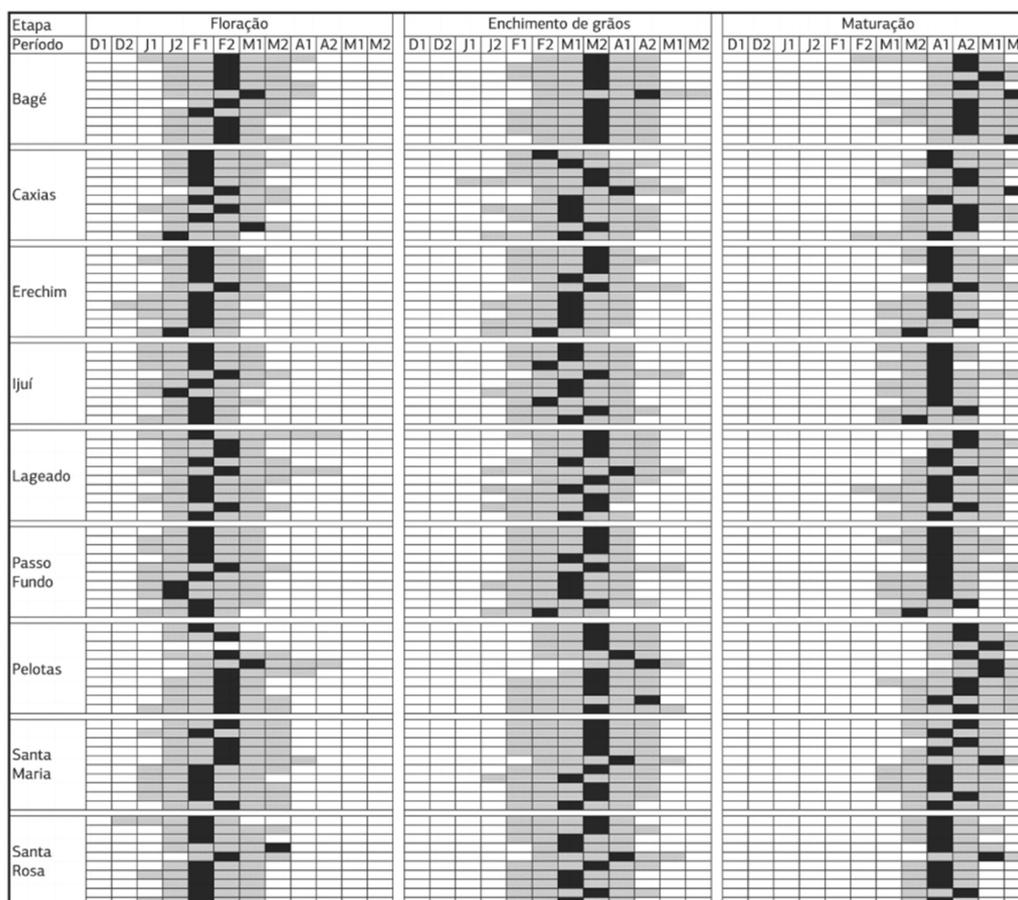


Figura 2. Variabilidade do calendário agrícola da soja no Rio Grande do Sul para os subperíodos de floração, enchimento de grãos e maturação na primeira e segunda quinzena de dezembro (D), janeiro (J), fevereiro (F), março (M), abril (A) e maio (M). As barras cinza indicam o período de início (5%) e de final (95%) da cada etapa, as barras pretas indicam a quinzena em que foi atingida a máxima área de lavouras na etapa. As linhas em cada regional estão associadas ao período de 2000-2001 a 2009-2010.

Fonte: Fontana et al. (2015).

3.1.2 Ciclo Fenológico da Soja

Pode-se também caracterizar as culturas quanto à fenologia, a qual pode ser definida como o estudo dos eventos periódicos da vida da planta em função da sua reação às condições do ambiente. As escalas fenológicas são importantes para determinar o desenvolvimento das plantas e associá-lo às variações na interação com a radiação eletromagnética (Moreira, 2003). Conforme descrito por Fehr e Caviness

(1977), o ciclo é dividido em duas fases: vegetativa e reprodutiva (Tabela 1), e cada uma delas em diversos estádios.

Tabela 1. Ciclo fenológico da soja.

Estádios de desenvolvimento da fase vegetativa:	
VE	(Emergência): Cotilédones se apresentam acima da superfície do solo
VC	(Estádio cotiledonar): Folhas primárias com as margens não mais se tocando
V1	(Primeiro nó): Folhas primárias desenvolvidas
V2	(Segundo nó): Folha trifoliada desenvolvida no nó acima das folhas
V3	(Terceiro nó): Três nós do caule com folhas começando com o nó das folhas primárias
Vn	(Enésimo nó): “n” nós do caule com folhas começando com o nó das folhas primárias
Estádios de desenvolvimento da fase reprodutiva:	
R1	(Início do florescimento): Uma flor em qualquer nó do caule
R2	(Florescimento completo): Uma flor em um dos dois últimos nós do caule com folha
R3	(Florescimento): Flores nos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida
R4	(Início da formação de legumes): Um legume, em um dos quatro últimos nós do caule
R5	(Formação de legumes): Um legume, em um dos quatro últimos nós o caule com folha
R6	(Início do enchimento de grãos): Grãos em um dos quatro nós do caule com folha
R7	(Máximo volume de grãos): Legume contendo, ao menos, um grão verde com folha
R8	(Maturação fisiológica): Um legume normal, no caule, que atingiu a cor de legume maduro
R9	(Maturação): 95% dos legumes atingiram a cor de legume maduro

Fonte: Adaptado de Fehr e Caviness (1977).

3.1.3 Soja e Disponibilidade Hídrica

A deficiência hídrica afeta o desenvolvimento da biomassa em qualquer estágio do desenvolvimento da soja, mas o impacto sobre a produtividade final varia dependendo do período de ocorrência do mesmo. Sabe-se, entretanto que, de forma geral, a precipitação pluvial ocorrida de dezembro a março é a variável climática que maior influência exerce no rendimento da soja no Rio Grande do Sul (Berlato e Fontana, 1999; Fontana et al., 2001; Cunha et al., 2001).

Em termos de necessidades hídricas da soja, há um aumento progressivo a medida que ocorre o desenvolvimento da planta. A semente da soja necessita absorver água no volume que corresponde a 50% do seu peso para então começar a germinar. A

máxima demanda hídrica ocorre no florescimento e formação de grãos (R1 – R5) se mantendo alta até a maturação. Florescimento e enchimento de grãos são períodos críticos, ou seja, períodos em que é máxima a sensibilidade da cultura ao fator água (Matzenauer et al., 2002, Mundstock e Thomas, 2005). Restrições nestes períodos acarretam reduções drásticas de rendimento de grãos.

O maior consumo de água da cultura da soja é da ordem de $7,5 \text{ mm.dia}^{-1}$ e ocorre no subperíodo de R1 – R5. O alto índice de IAF nesta etapa, coincidente com a época do ano de maior demanda evaporativa da atmosfera, contribui para maior consumo diário de água. Já no final do ciclo (R5 – R7), o consumo de água diminui para $5,7 \text{ mm.dia}^{-1}$ (Matzenauer et al., 2002).

3.2 Comportamento Espectral de Lavouras Anuais

É possível obter informações acerca da vegetação através da medição das variações de resposta espectral decorrentes das variações no estado do dossel vegetal em diferentes faixas do espectro eletromagnético.

É sabido que a folha é o órgão da planta especializado na interação com a radiação solar, sendo que os pigmentos, a água e sua estrutura, definem a partição da radiação nas componentes absorvida, refletida e transmitida pela folha. A baixa reflectância das folhas no espectro visível se deve à absorção da radiação pelos pigmentos para realização da fotossíntese; já a alta reflectância no infravermelho próximo ocorre pelo espalhamento, ou seja, os fenômenos de reflectância e transmitância no interior das folhas (Ponzoni e Shimabukuro, 2009).

Em presença de estresse por déficit hídrico em um período prolongado a folha perde a coloração verde, visto que diminui a clorofila, absorvendo menos radiação na

região do visível do espectro. As regiões espectrais do visível mais sensíveis a estresses localizam-se nos intervalos de 0,535 a 0,640 μm e 0,685 a 0,700 μm . Neste último, a folha assume coloração em tons amarelos e vermelhos, sendo possível detectar não somente estresse para folhas individuais, mas para as plantas inteiras, e para dosséis vegetais densos. Na faixa do visível (0,4 a 0,7 μm), as mudanças nas curvas de reflectância da folha verde não são significativas até que a quantidade de água das folhas diminua em 50%, mas, à medida que o conteúdo de umidade da folha diminui resulta em maiores valores de reflectância no infravermelho médio (Jensen, 2009).

As medidas da reflectância são definidas, em culturas anuais, majoritariamente pela fenologia das plantas. Segundo Sánchez et al. (2007), no decorrer do desenvolvimento da vegetação, quando o solo está parcialmente coberto, a radiação refletida é constituída de dossel mais substrato (solo exposto), havendo mistura espectral. Na medida em que ocorre o crescimento da lavoura, a reflectância do dossel passa gradualmente a ser constituída principalmente pela contribuição da vegetação. Por isso, é importante caracterizar a etapa do ciclo fenológico da vegetação a ser estudada quando das medições de reflectância.

Almeida (2008) realizou medições da reflectância do dossel da cultura da soja em diferentes etapas do ciclo em cultivos conduzidos em semeadura direta e plantio convencional, irrigados e não irrigados (Figura 3). O padrão de reflectância em qualquer dos dias de medição foi semelhante ao de uma folha verde em todos os tipos de manejo. Coerentemente, os maiores valores de reflectância na porção visível do espectro foram observados no final do ciclo (senescência) e na introdução da cultura (baixo IAF), devido a baixa absorção da radiação incidente. Os menores valores de reflectância aconteceram quando a cultura estava com alto IAF, momento em que o aparato fotossintético estava captando o máximo de radiação.

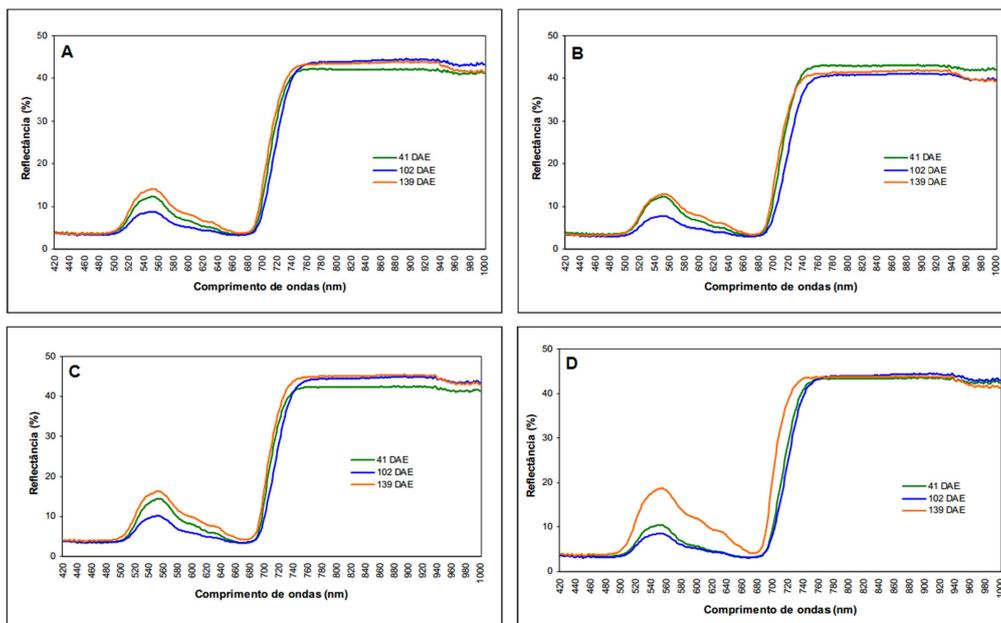


Figura 3. Reflectância da soja aos 41, 102 e 139 dias após a emergência (DAE). (A) semeadura direta, não irrigada; (B) semeadura direta, irrigada; (C) preparo convencional não irrigado; e (D) preparo convencional irrigado. Local de estudo EEA-UFRGS, Eldorado do Sul-RS, 2003/04.

Fonte: Adaptado de Almeida, (2008).

Relevante salientar que além de variações da quantidade de biomassa, o conteúdo de água das plantas também pode ser inferido a partir de sensores remotos usando a faixa do infravermelho médio, de 1,3 a 2,6 μm , dado que as principais bandas de absorção pela água ocorrem em 0,97; 1,19; 1,45; 1,94 e 2,7 μm . Pode, ainda, ser inferido a partir da temperatura de superfície obtida das bandas do termal entre 8 e 14 μm . Isto ocorre porque o estômato é a estrutura da folha responsável pelo controle do conteúdo de água e da temperatura, o que é feito através da transpiração. Quando o conteúdo de água é adequado, os estômatos se abrem e liberam água em forma de vapor. Já a redução da abertura dos estômatos restringe a assimilação de gás carbônico na fotossíntese (Larcher, 2000). Dentre outros fatores, o potencial de água da folha, que diminui quando há restrição na disponibilidade hídrica do solo, pode ser apontado como responsável pelo fechamento estomático (Mansur e Barbosa, 2000). Com a perda de

água por transpiração, ocorre a diminuição da temperatura. No caso de redução na disponibilidade hídrica, a planta fecha os estômatos e a temperatura aumenta.

3.3 Índices de Vegetação (IV)

Existe um grande número de IV disponíveis na literatura, os quais têm como objetivo explorar as propriedades espectrais da vegetação, utilizando principalmente as porções do visível e do infravermelho próximo.

O intenso uso decorre do fato de que os IV são relacionados a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal: biomassa, índice de área foliar, entre outros. Também, os IV minimizam os efeitos de iluminação da cena e de declividade da superfície que influenciam nos valores de reflectância (Ponzoni e Shimabukuro, 2009).

Há relação entre o NDVI e o crescimento das plantas. Porém sabe-se que o índice de vegetação aumenta rapidamente quando os valores de IAF são baixos, ocorrendo a saturação do índice de vegetação antes da planta atingir seu máximo IAF (Holben, 1980). Isto pode acarretar em limitações no uso dos IV em dosséis de alto desenvolvimento.

Sabe-se também que os IV são indicadores do estado das plantas. O déficit hídrico, no período vegetativo com alto IAF, reduz o crescimento das culturas, podendo ainda, ocorrer diminuição na taxa de acúmulo de matéria seca nos grãos e antecipação da maturação, refletindo numa menor produção de grãos do que em condições hídricas normais (Almeida, 2008). Já o déficit hídrico no período reprodutivo tem como consequência a redução no número e peso de grãos.

Dentre os principais IV podemos destacar:

Razão Simples (do inglês *Simple Ratio* – SR) (Equação 1) foi o primeiro índice a ser utilizado por Jordan (1969). É obtido pela divisão de valores do infravermelho próximo por valores da região do vermelho.

$$SR = \rho_{IV} / \rho_V \quad (1)$$

Onde: ρ_{IV} é a refletância na banda espectral do infravermelho próximo e ρ_V é a refletância na banda espectral do vermelho;

Rouse et al.(1973) normalizou o índice de razão simples para o intervalo de -1 a 1, o que denominou de NDVI (do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) (Equação 2). O NDVI é um índice de vegetação de maior difusão, porém apresenta a limitação de saturar quando a cobertura vegetal é alta, conforme mencionado anteriormente.

Os valores próximos a 1 estão associados à vegetação (alta biomassa), a qual possui alta reflectância no infravermelho próximo e baixa no visível devido a presença de pigmentos fotossintetizantes. Os valores negativos do índice correspondem aos materiais que refletem mais intensamente na porção do vermelho em comparação com o infravermelho próximo (nuvens, água e neve). O solo não vegetado e as rochas refletem de forma semelhante nas regiões do vermelho e levemente maior no infravermelho próximo, resultando em valores próximos de zero (Ponzoni e Shimabukuro, 2009).

$$NDVI = \frac{\rho_{iv} - \rho_v}{\rho_{iv} + \rho_v} \quad (2)$$

Outro índice muito utilizado é o SAVI (do inglês *Soil-Adjusted Vegetation Index*) (Equação 4), que considera as características do solo que influenciam na interação com a radiação incidente quando há cobertura parcial (Huete, 1988). Este

índice introduz a constante L que tem a função de minimizar o efeito do solo no resultado final do índice.

$$SAVI = \frac{(1+L)\rho_{iv} - \rho_v}{L + \rho_{iv} + \rho_v} \quad (3)$$

O EVI (do inglês *Enhanced Vegetation Index*) (Equação 4) foi proposto como um aperfeiçoamento do NDVI, aumentando a sensibilidade às variações na superfície em altos índices de biomassa e reduzindo o efeito da atmosfera e da superfície de fundo. É reconhecido por responder de forma mais efetiva à estrutura da vegetação, incluindo índice de área foliar (Huete et al., 2002).

$$EVI = G * (\rho_{IV} - \rho_V) / (\rho_{IV} + C_1 * \rho_V - C_2 * \rho_A + L) \quad (4)$$

Onde: G = fator de ganho, geralmente assume valor de 2,5;

ρ_A = refletância na banda espectral do azul;

L = ajuste de fundo do dossel vegetal;

C_1 e C_2 = coeficientes de ajuste da influência dos aerossóis.

O NDVI, SAVI e o EVI são seguramente os índices de vegetação mais utilizados atualmente (Huete et al., 2002; Ponzoni e Shimabukuro, 2009), especialmente para o monitoramento da evolução temporal da biomassa de culturas agrícolas.

Como exemplo de uso operacional dos índices de vegetação no contexto do monitoramento agrícola pode ser observado na Figura 4 o perfil temporal do NDVI para a média da área de cultivo de soja no Rio Grande do Sul (Santos et al., 2014). Os autores verificaram que no mês de novembro, quando ocorre a maior concentração da semeadura da soja, o valor do NDVI é baixo, crescendo até os meses de janeiro a

março, quando a cultura atinge o máximo desenvolvimento. Na colheita, que ocorre nos meses de março a maio, os valores de NDVI retornam a valores similares aos do início do ciclo. Estes dados são coerentes com o calendário médio da soja (Figura 2).

O perfil temporal do NDVI contempla, portanto, as variações da biomassa verde durante a safra; baixo na implantação da cultura, crescente até as plantas atingirem o máximo desenvolvimento vegetativo e decrescente em função da senescência. Entretanto, por retratar como a vegetação se desenvolve, as variáveis meteorológicas influenciam, causando variabilidade neste padrão. Nas safras mais secas, com menores precipitações pluviais, o desenvolvimento vegetativo é afetado e o perfil não apresentará uma curva tão acentuada como ocorre em safras com condições hídricas adequadas, sendo que especialmente no período de máximo desenvolvimento o perfil de NDVI pode apresentar diferenças significativas entre safras.

Tendo em vista que a variabilidade nos perfis do NDVI decorre da variabilidade no desenvolvimento da vegetação, este índice pode ser utilizado para inferir estresses na mesma, inclusive o estresse hídrico. Porém, é importante salientar que a análise de estresses exclusivamente a partir do NDVI tem limitações, quando o mesmo apresenta queda em seus valores, a planta já está prejudicada.

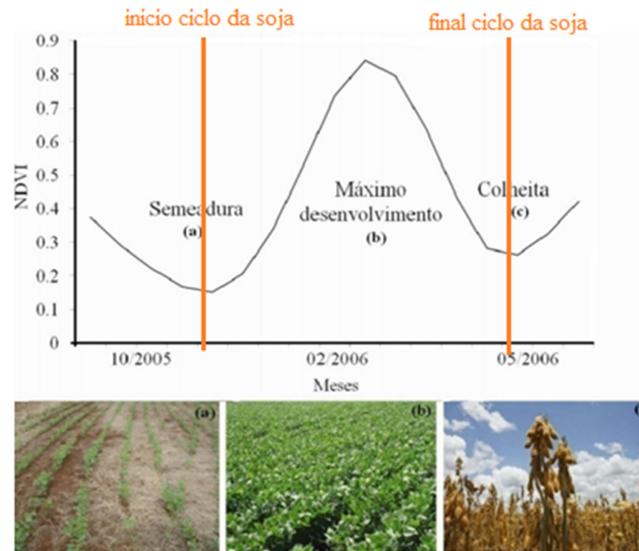


Figura 4. Perfil temporal do NDVI em áreas de cultivo da soja no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Safra 2005/2006.

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2014).

3.4 Temperatura da Superfície (TS)

A Temperatura da Superfície (TS) é um importante parâmetro para muitas modelagens ambientais, tais como balanço de energia, monitoramento de cultivos, previsão meteorológica, mudanças climáticas, dentre outras.

A energia emitida por um objeto pode ser determinada por uma equação desenvolvida por Max Planck, que determina que a radiação emitida por um determinado corpo em cada comprimento de onda depende unicamente de sua temperatura. A equação baseia-se na emissão de radiação de um corpo negro (emissividade igual a um), no qual toda radiação incidente sobre ele é absorvida, convertida em energia térmica e emitida de acordo com sua temperatura. Considerando todo o espectro de emissão, quanto maior for a temperatura, exponencialmente maior é a energia emitida pelo corpo negro (Stephan-Boltzmann), não sendo a mesma para todos os comprimentos de onda. O comprimento de onda no qual a energia emitida pelo

corpo negro é máxima se desloca para regiões de alta frequência (Wien), na medida em que a temperatura do corpo aumenta.

A radiação que deixa determinada superfície por unidade de área em uma direção de medida é denominada de radiância, e inclui tanto a radiação emitida como a radiação refletida, dependendo do comprimento de onda em que o sensor registra: se menor do que $4 \mu\text{m}$ é caracterizada como reflectância, se maior como emitância (Novo, 2008).

A temperatura da superfície pode ser obtida com a função inversa da Lei de Planck. Já que o sensor mede a radiância espectral, a temperatura obtida com a inversão da equação é denominada temperatura de brilho ou temperatura aparente, pois considera que a superfície seja um corpo negro ideal e desconsidera os efeitos da atmosfera (Novo, 2008).

A TS, entretanto é um parâmetro complexo de ser estimada devido à necessidade de correção atmosférica. A complexidade decorrente da grande influência de emissão do vapor de água na atmosfera e da necessidade de determinação da emissividade da superfície (Valor e Caselles, 1996). Os modelos de estimativa de TS podem ser distribuídos em dois grandes grupos, os conhecidos como monocanais e os modelos *split-window*, que se baseiam, respectivamente, no uso de uma ou duas bandas do espectro termal. Dentre os modelos, o principal benefício do *split-window* é seu melhor desempenho no processo de correção atmosférica, visto que a atmosfera está dentre as principais responsáveis pelas diferenças de temperatura obtidas com as duas bandas termais usadas no modelo (Nicolós et al., 2007).

3.5 Detecção de Estresse Hídrico

A relação entre a TS e o NDVI apresenta um padrão que gera uma dispersão característica de forma triangular ou trapezoidal decorrentes da biomassa existente e do teor de umidade do solo (Price, 1990; Carlson et al., 1994; Moran et al., 1994). A posição que um determinado alvo ocupa neste triângulo ou trapézio tem sido utilizada para determinar a quantidade de água disponível para o crescimento e desenvolvimento da vegetação. É sabido que o estresse hídrico tem impacto sobre ambos, TS e NDVI. Quanto à temperatura, como anteriormente descrito, estresses hídricos na vegetação acarretam em aumentos na TS, consequência da restrição na evapotranspiração. Em relação ao NDVI, o estresse hídrico determina restrições de acúmulo de biomassa, ocasionando diminuição do índice de vegetação.

Sandholt et al. (2002) propuseram um índice para dimensionar a condição hídrica da vegetação (TVDI do inglês *Temperature–Vegetation Dryness Index*), o qual leva em consideração a temperatura da superfície (TS) e um índice de cobertura vegetal (NDVI).

Neste sentido, Wang et al. (2006) propuseram a utilização da relação entre TS e NDVI obtida a partir de produtos MODIS para estimar a evapotranspiração, considerando a umidade do solo como um fator importante que influencia a evapotranspiração. Segundo Goward et al. (2002) as condições de umidade do solo do terreno desempenham um papel fundamental na avaliação das condições ambientais terrestres relacionadas ao contexto ecológico, hidrológico e processos atmosféricos.

O TVDI pode ser calculado (Equação 5), conforme proposta de Sandholt et al. (2002):

$$TVDI = (TS - TS_{min}) / (a + b * NDVI - TS_{min}) \quad (5)$$

Onde: TS é a temperatura radiativa da superfície em K; TSmin é a temperatura mínima de superfície em K, correspondente ao limite úmido do triângulo evaporativo; "a" e "b" são os coeficientes linear e angular da reta que representa o limite seco.

Estes limites, seco e úmido são obtidos a partir de um gráfico de dispersão (Figura 5) entre o índice de vegetação e a temperatura de superfície e são utilizados para normalização do modelo.

O TVDI baseia-se em um triângulo evaporativo (Figura 5), no qual pixels com solo exposto apresentam NDVI baixo e a TS alta. Em situação de cobertura total da vegetação, o NDVI é alto e a TS é baixa. Em condições de cobertura parcial, quanto menor for a TS, mais adequada é a condição hídrica e, portanto, menor é o TVDI. O modelo proporciona, portanto, um índice que varia entre 0 (limite úmido sem restrição hídrica) e 1 (limite seco com alta restrição hídrica).

A dispersão pode apresentar forma de trapézio ao invés do triângulo quando ocorrerem grande concentração de pontos com alto NDVI e alta TS (Carlson, 2007).

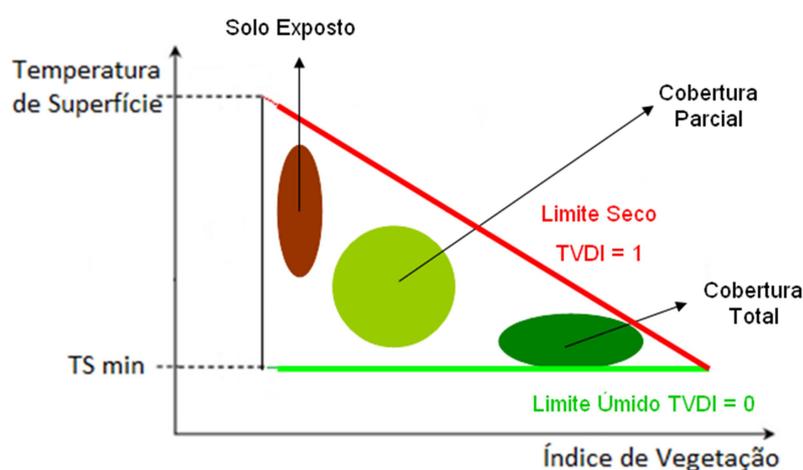


Figura 5. Triângulo Evaporativo.
Fonte: Adaptado de Sandholt et al. (2002).

3.6 Produtos MODIS

Para a obtenção de dados visando o monitoramento de grandes regiões de produção de soja, a opção de utilização de imagens do sensor MODIS, a bordo da plataforma Terra e Aqua, é bastante interessante. Diversos estudos tem sido realizados para estimativa de área cultivada (Gusso et al., 2012; Santos et al., 2014; Wagner et al., 2007), determinação de perfis temporais para fins de monitoramento (Fontana et al., 2015), estimativa de componentes de balanço de energia (Monteiro et al., 2014) e estimativa de estresse hídrico na vegetação (Holzman et al., 2014).

O sensor MODIS adquire dados de 36 bandas espectrais que se situam nos comprimentos de onda de 0,4 a 14,4 μm em diferentes resoluções espaciais, para a observação de feições das propriedades das nuvens, temperatura da superfície dos oceanos e dinâmica das propriedades da vegetação (Leeuwen et al., 2006). Este sensor possui características de abrangência regional, alta qualidade das imagens e alta repetitividade temporal (Rudorff et al., 2007). Os dados são disponibilizados em forma de produtos, tornando a avaliação direta, sem a necessidade de processamentos complexos e aplicação de modelos. As imagens do sensor MODIS são disponibilizadas gratuitamente no banco de dados da *Land Processes - Distributed Active Archive Center* (LP DAAC).

Dentre os produtos disponíveis, de importância neste estudo, são os produtos MOD13(índice de vegetação) e MOD11(temperatura de superfície), cujas principais características são abordadas a seguir.

O produto de IV, conhecido como MOD13 disponibiliza o NDVI e o EVI, além das reflectâncias das bandas do azul, vermelho e vermelho distante, assim como as bandas de qualidade. Ambos IV são obtidos a partir do processamento de imagens

capturadas em um período de 16 dias ou mensal nas resoluções de 250, 500, 1.000 e 5.000 m. Para cada pixel da imagem é apresentado o índice de vegetação mais alto encontrado no período de 16 dias, o que tem como objetivo proporcionar a total cobertura de uma grande área sem a presença de nuvens (LP DAAC, 2015).

O produto MOD11 (Temperatura de Superfície da Terra – TS) disponibiliza a temperatura a partir de imagens geradas com máscara de nuvens, sendo calculada a partir de um modelo *split-window* com o uso das bandas 31 e 32 do espectro termal, com respectivos comprimentos de onda central de 11 μm e 12 μm . O produto está disponível para dados diários ou uma composição de 8 dias com resolução espacial de 1.000 ou 5.000 m (LP DAAC, 2015).

4 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, T. **Respostas espectrais da soja sob diferentes condições hídricas e de preparo do solo**. 2008. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D.C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p. 119-125, 1999.

CARLSON, T. N.; GILLIES, R. R.; PERRY, E. M. A Method to Make Use of Thermal Infrared Temperature and NDVI measurements to Infer Surface Soil Water Content and Fractional Vegetation Cover. **Remote Sensing Reviews**, New York, v. 9, n. 1-2, p. 161-173, 1994.

COSTAMILAN L. M. et al. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, safras 2012/2013 e 2013/2014**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012.

CUNHA, G. R. et al. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 446-459, 2001.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **[Novidades da Agência]**. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br>> Acesso em: 14 out. 2014.

FEHR, W.R; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. 21 p. (Special Report 80).

FONTANA, D.C. et al. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 399-403, 2001.

FONTANA, D.C. et al. Inferências sobre o calendário agrícola a partir de perfis temporais de NDVI/MODIS. **Bragantia**, Campinas, v.74, n.3, p. 350-358, 2015.

GOWARD, S.N.; XUE, Y.; CZAJKOWSKI, K.P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements. An exploration with the simplified simple biosphere model. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 79, p. 225-24, 2002.

GUSSO, A. et al. Estimativa de áreas de cultivo de soja por meio de dados MODIS/EVI. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 425-435, 2012.

HOLBEN, B.N.; TUCKER, C.J.; FAN, C.J. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Falls Church, v.46, p. 651-656, 1980.

HOLZMAN, M.E.; RIVAS, R.; PICCOLO, M.C. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 28, p.181-192, 2014.

HUETE, A. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

HUETE, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

JORDAN, C.F., Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, New York, v. 50, n. 4, p. 663-666, 1969.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 598 p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: Rima, 2000. 531 p.

LEEUWEN, W.J.D. et al. Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.100, n.1, p. 67-81, 2006.

LIANG, L. et al. Drought Change Trend Using MODIS TVDI and Its Relationship with Climate Factors in China from 2001 to 2010. **Journal of Integrative Agriculture**, Beijing, v. 13, n. 7, p. 1501-1508, 2014.

LP DAAC - Land Processes Distributed Active Archive Center. **[Banco de dados]** Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov>> Acesso em: 20 set. 2014.

MANSUR, R.J.C.N.; BARBOSA, D.C.A. Comportamento fisiológico em plantas jovens de quatro espécies lenhosas da caatinga submetidas a dois ciclos de estresse hídrico. **Phyton**, Buenos Aires, v. 68, p. 97-106, 2000.

MATZENAUER, R. et al. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAGRO, 2002. (Boletim FEPAGRO, n. 10)

MONTEIRO, P.F.C. et al. Estimativa dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração para áreas de cultivo de soja no sul do Brasil utilizando imagens do sensor TM Landsat5. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 1, p.72-80, 2014.

MORAN, M.S. et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 49, n. 3, p. 246-263, 1994.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2003. 307 p.

MUNDSTOCK, C., THOMAS, A.L. **Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Evangraf, 2005. 31p.

NICLÒS, R. et al. Determination of sea surface temperature at large observation angles using an angular and emissivity-dependent split-window equation. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.111, n. 1, p. 107-12, 2007.

NOVO, E.M.L.D.M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 3^a. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 363 p.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 127 p.

PRICE, J.C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 28, n. 5, p. 940-948, 1990.

ROUSE, J.W. et al. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. In: ERTS Symposium, NASA SP-351, 3., 1973, Washington, DC, USA. **Proceedings of the...** Washington, DC, 1973. p. 309–317.

RUDORFF, B.F.T., SHIMABUKURO, Y.E., CEBALLOS, J.C. **O Sensor Modis e suas Aplicações Ambientais no Brasil**. São Paulo: Parêntese, 2007. 423 p.

SÁNCHEZ, J.M. et al. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations, **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 112, n. 3, p. 1130-1143, 2007.

SANDHOLT, I.; RASMUSEN, K.; ANDERSEN, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. **Remote Sensing of Enviroment**, New York, v. 79, n. 2-3, p. 213-224, 2002.

SANTOS, J.S. et al. Identificação da dinâmica espaço-temporal para estimar área cultivada de soja a partir de imagens MODIS no Rio Grande do Sul, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.1, p. 54-63, 2014.

SIDRA [Banco de Dados]. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>> Acesso em: 20 set. 2014.

THOMAS, A.L., COSTA, J.A. **Desenvolvimento da planta de soja e o potencial de rendimento de grãos**. In: SOJA: manejo para alta produtividade de grãos. Porto Alegre: Evangraf, 2010. p. 13-33.

VALOR, E.; CASELLES, V. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South American areas. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 57, n. 3, p.167-184, 1996.

WAGNER, A.P.L. et al. Estimativa de Área de Soja no Rio Grande do Sul Utilizando Imagens NDVI/MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2007. p. 457-464.

WANG, K.; LI, Z.; CRIBB, M. Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: A new method to determine the Priestley-Taylor parameter. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 102, n. 3-4, p. 293-305, 2006.

WATSON, D.J. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I: Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, London, v. 11, n. 41, p. 41-76, 1947.

5 RESULTADOS

5.1 ARTIGO 1

Padrão espaço temporal do TVDI em áreas de cultivo de soja sob condições de clima subtropical úmido

Padrão espaço temporal do TVDI em áreas de cultivo de soja sob condições de clima subtropical úmido

RESUMO: O Rio Grande do Sul se caracteriza pela alta produtividade de grãos, sendo atualmente o terceiro maior produtor nacional de soja. Tendo em vista a importância da agricultura na economia e o fato de a mesma ser altamente dependente da variação dos elementos meteorológicos, o presente trabalho teve como objetivo testar o índice TVDI, em escala regional, como indicador das condições hídricas para as condições de clima e manejo de cultura da soja predominante no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Para tanto, foram escolhidas safras com rendimentos de grãos contrastantes, sendo de 0,5 e 2,7 t.ha⁻¹, respectivamente para as safras de 2004-05 e 2009-10. Para a obtenção do TVDI, as imagens de TS e de NDVI disponíveis nos produtos MODIS foram relacionadas obtendo-se um padrão de dispersão de forma triangular. Utilizaram-se também dados de precipitação pluvial oriundos de estações meteorológicas de superfície. Os resultados mostraram que o padrão do índice de estresse mostra associação com a variabilidade do regime de precipitação pluvial. Mas, como o TVDI se baseia em uma normalização dos limites úmido e seco que são aplicados para cada imagem individualmente, é complexa a comparação dos valores do índice entre distintas imagens, deficiência que pode ser minimizada com a análise dos parâmetros utilizados no cálculo do índice. Portanto, tanto o índice TVDI como os parâmetros “b” e “T_{Smin}” possibilitam o entendimento do padrão da vegetação frente a disponibilidade hídrica.

PALAVRAS-CHAVE: condição hídrica, NDVI, temperatura de superfície.

Spatiotemporal pattern of TVDI in a soybean growing area under humid subtropical climate conditions

ABSTRACT: The Brazilian state of Rio Grande do Sul is characterized by high crop productivity, and is currently the third leading soybean producer in the country. In view of the importance of agriculture to its economy and the fact that agriculture is highly dependent on the variation of meteorological parameters, the present study sought to test the temperature–vegetation dryness index (TVDI) as a regional indicator of water status under the climate and soybean crop management conditions that predominate in northwest Rio Grande do Sul. To this end, soybean crops with contrasting yields were selected: 2004-05 (yield 0.5 t.ha⁻¹) and 2009-10 (2.7 t.ha⁻¹). To obtain the TVDI, T_S and NDVI images available from MODIS products were correlated to obtain a triangular scatter plot. Rainfall precipitation data from surface weather stations were also used. The results showed that the pattern of the stress index is associated with variability in the precipitation regime. However, as the TVDI is based on normalization of the wet and dry edges of each image individually, comparison of TVDI values across different images is challenging. This deficiency can be mitigated by analysis of the parameters used to derive the index. Therefore, both the TVDI and the “b” and “T_{Smin}” parameters used to derive it can elucidate the patterns of crop response to water availability.

KEYWORDS: water status, NDVI, surface temperature.

1 INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul se caracteriza pela significativa produção de grãos, sendo que a soja é a cultura que ocupa a maior área de cultivo, o qual ocorre no período de primavera verão (EMATER/RS, 2013; CONAB, 2013). Apesar do crescimento médio anual da produção da soja no Estado, verifica-se que existe alta variabilidade entre as safras, o que é determinado principalmente pelos dois principais fatores de risco à atividade agrícola não controlável pelo produtor: mercado e adversidades climáticas.

Quando às adversidades climáticas, diversos trabalhos têm demonstrado que a precipitação pluvial ocorrida de dezembro a março é a variável que maior influência exerce no rendimento de grãos da soja no Rio Grande do Sul. Isto porque a disponibilidade hídrica é determinante para o desenvolvimento das culturas (Berlato e Fontana, 1999; Fontana et al., 2001), especialmente durante florescimento e formação de grãos, (estádios reprodutivos R1-R5, segundo Fehr e Caviness, 1977) e, portanto, o principal elemento que influencia na definição do rendimento de grãos (Matzenauer et al., 2002).

O índice TVDI (do inglês *Temperature Vegetation Dryness Index*) tem sido utilizado para determinar a disponibilidade da umidade do solo e a disponibilidade hídrica em escala regional (Sandholt et al., 2002; Gao et al., 2011; Holzman et al., 2014), tornando-se uma importante ferramenta de monitoramento para a agricultura. O TVDI é calculado de forma direta, não necessita de medições em superfície dos elementos meteorológicos, com base na relação de sinergia entre a temperatura de superfície e um índice de vegetação obtidos em imagens de satélite. A relação entre a temperatura de superfície (TS) e o índice de vegetação (IV) gera frequentemente uma dispersão triangular ou trapezoidal (Price 1990, Carlson et al., 1994). A inclinação da reta de regressão linear

entre a TS e IV representa o grau de estresse, dada a relação negativa entre estes dois parâmetros, conforme diversos estudos realizados (Nemani e Running, 1989; Carlson et al., 1995; Moran et al., 1996, Fensholt e Sandholt, 2003; Venturini et al., 2004; Wang et al., 2007, Holzman et al., 2014). A forma da dispersão, trapézio ou triângulo, dependerá da disponibilidade do conteúdo de água no solo; se aumentar a TS e o NDVI estiver em seu valor máximo tende a ocorrência da forma trapezoidal (Carlson, 2007). O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo da plataforma Terra, disponibiliza em forma de produtos as imagens de temperatura de superfície (MOD11A2) e de índice de vegetação (MOD13A2), com resolução temporal respectivamente de 8 e 16 dias. Estes produtos possibilitam o acompanhamento do desenvolvimento das culturas ao longo do tempo, assim como o cálculo do TVDI, que pode ser utilizado para definição da condição hídrica. Ambos indicadores são fundamentais em sistemas de monitoramento agrícolas.

Diversos estudos têm sido propostos com o uso do TVDI determinado a partir de imagens MODIS (Chen et al., 2011; Son et al., 2012; Holzman et al., 2014) para o planejamento e gestão dos recursos hídricos necessários para mitigar impactos sobre a agricultura, monitoramento e previsão de safras. Para o cálculo do TVDI, Sandholt et al. (2002) propuseram o uso do índice NDVI e diversos estudos subsequentes foram realizados com uso da relação entre a TS e o NDVI (Gao et al., 2011; Chen et al., 2011; Son et al., 2012).

Este trabalho teve como objetivo geral testar o índice TVDI, em escala regional, para as condições de clima e manejo de cultura da soja predominante no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, como forma de monitorar a condição hídrica em áreas de cultivo da soja, que é a cultura de maior expressão no verão. Os objetivos específicos foram caracterizar a forma da relação entre a TS e o NDVI, assim como analisar a

sensibilidade dos parâmetros desta relação no cálculo do TVDI e na caracterização das condições hídricas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

A área de estudo está localizada na mesorregião noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, caracterizada pelo grande volume de produção de grãos (Figura 6). A agricultura nesta região é a base da economia, com aproximadamente 6,5 milhões de hectares de área total segundo base cartográfica do IBGE 2010, abrangendo os municípios com maior produtividade no Estado. Dentro da área de estudo, a média da área cultivada com soja entre os anos de 2000 e 2012 foi de 2,6 milhões de hectares, com rendimento médio de $2\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ segundo dados no banco de dados SIDRA do IBGE. Na região, a principal cultura de verão, em termos de área de cultivo e retorno econômico aos agricultores, é a soja.

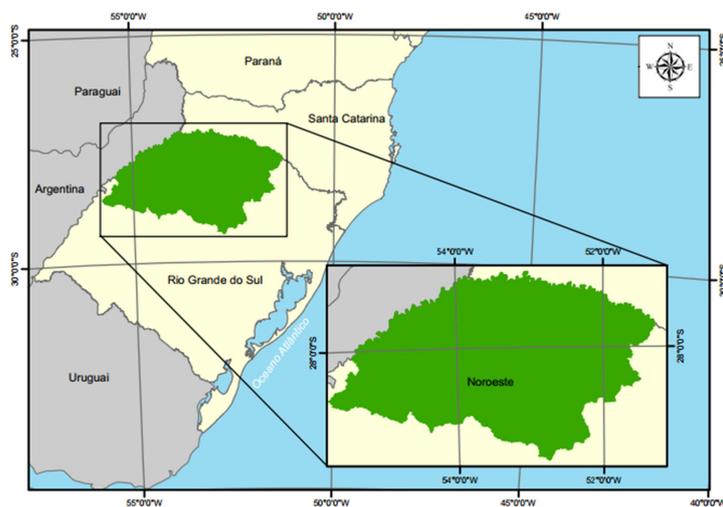


Figura 6. Localização da área de estudo no Estado do Rio Grande do Sul.

A precipitação pluvial anual da metade norte do Estado onde está localizada a área de estudo varia entre 1.600 a 2.000 mm (Atlas Climático, 2011). Na classificação climática de Köppen (1948), a área de estudo se enquadra na variedade climática "Cfa" verão

quente, sendo a temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e do mês mais frio abaixo de 18 °C e acima de -3 °C e nenhum mês com precipitação pluvial inferior a 60 mm.

Obtenção do TVDI

O TVDI foi calculado (Equação 1) conforme proposto por Sandholt et al. (2002):

$$\text{TVDI} = (\text{TS} - \text{TSmin}) / (a + b * \text{NDVI} - \text{TSmin}) \quad (1)$$

Onde: TS é a temperatura radiativa da superfície do pixel (K); TSmin é a temperatura mínima de superfície (K), correspondente ao limite úmido do triângulo evaporativo; "a" e "b" são os coeficientes linear e angular da reta que representa o limite seco.

Foram utilizados os dados de TS e de NDVI disponíveis nos produtos MODIS, MOD11A2 e MOD13A2, com resolução espacial de 1.000 m correspondendo, respectivamente, a composições de períodos de 8 e 16 dias. Para cobrir a área de estudo foi efetuado o *download* no banco de dados da *Land Processes - Distributed Active Archive Center* (LP DAAC) dos produtos *tile* h13v11, o qual foi transformado da projeção sinusoidal para coordenadas geográficas WGS 84, recortada a área de estudo e aplicada máscara na área de cultivo de soja da safra equivalente. O processamento das imagens foi efetuado com o *software* ENVI 5.0.

Para a obtenção do TVDI as imagens de TS e de NDVI foram relacionadas (Figura 7), obtendo-se um padrão de dispersão característico de forma triangular ou trapezoidal, o qual depende da biomassa existente e do teor de umidade do solo (Price, 1990; Sandholt et al., 2002). O índice é obtido a partir de um modelo normalizado que varia entre 0 e 1 para cada imagem. Pontos da dispersão que ficam mais distantes e representam uma porcentagem muito pequena do conjunto, podem representar superfícies anômalas,

incluindo água e nuvens. Esses pontos, que estão perto das bordas secas ou molhadas, foram descartados das análises, conforme recomendado por Carlson (2007).

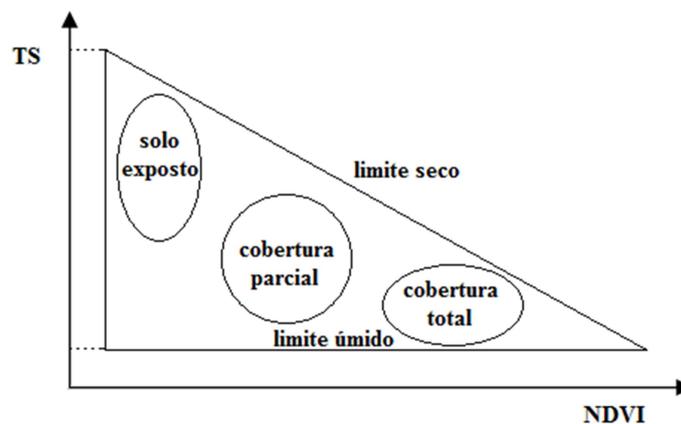


Figura 7. Triângulo Evaporativo.
Fonte: Adaptado de Sandholt et al. (2002).

O cálculo da temperatura mínima de superfície (TSmin) foi efetuado através da média das temperaturas mínimas, correspondendo ao limite úmido. Os parâmetros "a" e "b", que são respectivamente os coeficientes linear e angular da reta e representam o limite seco, foram obtidos a partir do gráfico de dispersão entre o NDVI e a TS e são utilizados para normalização do modelo. No presente estudo, TSmin e os parâmetros "a" e "b" foram determinados para cada um das 12 imagens que abrangem as duas safras analisadas.

Foram escolhidas para análise as safras de 2004-05 e de 2009-10, as quais apresentaram rendimentos de grãos contrastantes, sendo de 0,5 e 2,7 t.ha⁻¹, respectivamente. Para as condições de cultivo predominantemente não irrigadas na região, muito possivelmente as diferenças de rendimento observadas foram consequência majoritariamente das condições de disponibilidade hídrica distintas.

A cultura analisada foi a soja, sendo que a área de cultivo foi determinada através da metodologia que utiliza a diferença entre o NDVI do período de implantação e o do máximo desenvolvimento, conforme proposto por Santos et al. (2014). Consideraram-se

soja os pixels que apresentaram na imagem diferença valores superiores a 0,30 para a safra de 2004-05 e a 0,39 para a safra de 2009-10. O critério de determinação deste limiar foi obter uma área de cultivo próxima à área cultivada divulgada pelo banco de dados SIDRA do IBGE em cada safra.

Foram, também, coletados dados de precipitação pluvial para três estações meteorológicas (Cruz Alta, São Luiz Gonzaga e Passo Fundo), cujos dados foram organizados em valores acumulados de 16 em 16 dias, compatibilizando com as datas em que são disponibilizados os produtos MODIS.

Para a análise dos resultados, foram utilizados dados de TVDI e NDVI das duas safras extraídos de áreas de cultivo de soja em janelas de 5x5 pixels centrada nas coordenadas das três estações meteorológicas, assim como toda a área mapeada como de cultivo de soja no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

Foram escolhidas duas cenas com condições hídricas distintas: uma imagem com condições de déficit hídrico (18/02/2005) e outra em condições úmidas (06/03/2010) para analisar o padrão do TVDI, dos parâmetros deste índice e da precipitação pluvial. Por fim, o NDVI, o TVDI e os parâmetros “b” e “TSmin” foram relacionados com a precipitação pluvial através da construção de gráficos de dispersão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A dinâmica do desenvolvimento da cultura da soja na região de estudo pode ser avaliada através do padrão de evolução no tempo do NDVI (Figuras 8 e 9). O padrão observado é típico de culturas anuais e mostra coerência com o esperado para a região (Fontana et al., 2015), permitindo acompanhar as diferenças quanto à evolução temporal da biomassa verde da cultura da soja nas duas safras. Se considerarmos esta evolução

frente à ocorrência dos períodos críticos do ciclo, é possível interpretar as respostas das plantas de soja às condições ambientais.

Os cultivares recomendados para semeadura no Rio Grande do Sul possuem duração média de 140 dias (Thomas e Costa 2010) e, segundo Cunha et al. (2001), a semeadura da soja é recomendada de 11 de outubro a 31 de dezembro, sendo que é no mês de novembro que ocorre a maior concentração de semeadura. Assim, em novembro, associado à baixa cobertura verde da superfície na implantação da cultura, o NDVI foi baixo, aumentando gradativamente com o incremento da biomassa até a floração e reduzindo novamente ao final do ciclo. De janeiro a março é quando a cultura apresentou os maiores valores de NDVI, associados a maior densidade de biomassa verde das lavouras. No florescimento, que em geral ocorre no mês de fevereiro, é quando a soja atinge o máximo índice de área foliar, máxima capacidade de interceptar a radiação solar e realizar fotossíntese e é quando o máximo NDVI ocorre. Na safra de 2004-05 o maior valor de NDVI foi de 0,79 e em 2009-10 foi de 0,85, ambos no mês de fevereiro, que coincide com o florescimento. Conforme verificado por Fontana et al. (2015), este padrão típico sofre variações entre os anos, as quais são fundamentais para diferenciar condições de crescimento e desenvolvimento das lavouras e para o estabelecimento de modelos de estimativa do rendimento de grãos. Os maiores valores de NDVI na safra 2009-10 foi coerente com os maiores rendimentos de grãos obtidos na mesma, de $2,7 \text{ t.ha}^{-1}$, em relação a 2004-05 quando os rendimentos foram de $0,5 \text{ t.ha}^{-1}$.

Já o TVDI (Figuras 8A e B) mostrou um padrão temporal similar em ambas às safras, com altos valores no início e final do ciclo, comportamento inverso ao NDVI, o que em parte é devido a capacidade da biomassa controlar o processo de evapotranspiração. Nestes períodos se observam valores superiores a 0,8, o qual pode ser atribuído respectivamente à presença de solo exposto e/ou de vegetação senescente, com

consequente menor evapotranspiração e maior temperatura no sistema solo/planta (Wang et al., 2007). Por outro lado, foi no período de maior desenvolvimento vegetativo (florescimento e formação de grãos) que, associado ao maior transporte de água pelas plantas para a atmosfera, ocorreu diminuição do índice TVDI, indicando uma condição hídrica mais adequada, mas com importantes diferenças entre as duas safras.

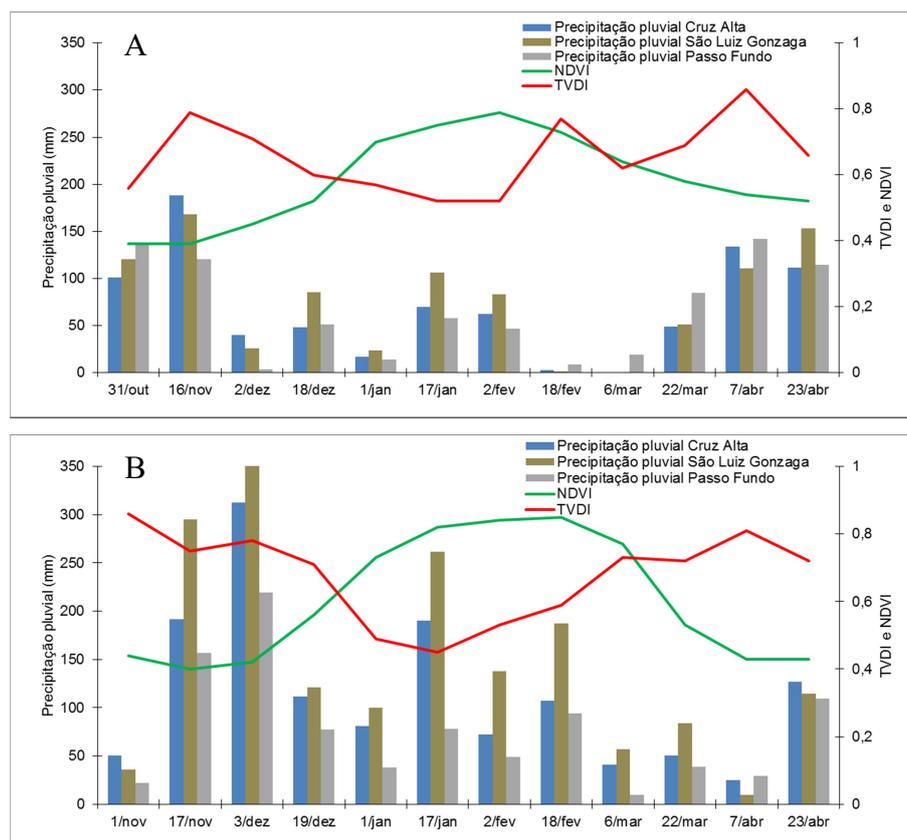


Figura 8. Perfil temporal do índice TVDI e do índice de vegetação NDVI para o noroeste do Rio Grande do Sul e precipitação pluvial das estações meteorológicas de Cruz Alta, São Luiz Gonzaga e Passo Fundo, na safra de 2004-05 (A) e na safra de 2009-10 (B).

Quanto ao regime de precipitação pluvial, pode-se observar que os maiores volumes ocorreram na safra 2009-10 (Figura 8B), cujos reflexos podem ser observados no TVDI, especialmente durante o período de maior desenvolvimento vegetativo. Na safra 2009-10 o índice mostrou um decréscimo mais abrupto em janeiro comparado a 2004-05, atingindo um mínimo 0,45 e 0,52, respectivamente. Na safra 2004-05 (Figura 8A) no mês de fevereiro o índice apresentou um rápido incremento, justamente no período onde

mais frequentemente ocorrerem as maiores deficiências hídricas na região como consequência da maior demanda evaporativa da atmosfera e do maior consumo de água das plantas (Matzenauer et al., 2002, Mundstock e Thomas, 2005).

O TVDI respondeu, de forma geral, à variabilidade da biomassa presente na área de estudo. Por outro lado, o regime de precipitação pluvial ocasionou oscilações no perfil do TVDI ao longo do período de desenvolvimento da cultura da soja. Apesar disso, quando se analisou a dispersão entre a precipitação pluvial acumulada e o TVDI (Figura 9), verificou-se que as mesmas não mostraram de forma evidente a tendência de aumento do TVDI com a diminuição da precipitação pluvial. Inclusive a safra com maior disponibilidade hídrica (2009-10) foi a que apresentou maior TVDI, o que pode ser observado pela concentração dos pontos verdes na direita dos gráficos, principalmente nas estações de Cruz Alta e São Luiz Gonzaga.

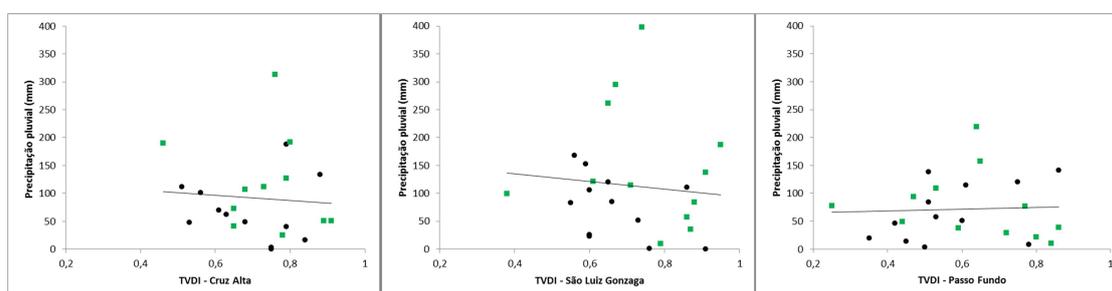


Figura 9. Dispersão entre o índice TVDI e a precipitação pluvial acumulada em 16 dias para Cruz Alta, São Luiz Gonzaga e Passo Fundo. Pontos em preto safra 2004-05, em verde safra 2009-10.

Esta aparente inconsistência pode ser explicada pelo fato do TVDI se basear em uma normalização dos limites úmido e seco que são aplicados individualmente para cada cena, o que torna complexa a comparação dos valores do índice entre diferentes cenas e/ou safras. Salienta-se, também, que esta forma de uso do TVDI, normalizado para cada cena, é a que mais seguidamente aparece na literatura (Gao et al., 2011; Holzman et al., 2014; Liang et al., 2014).

Este é um ponto crítico de uso do TVDI para fins de monitoramento de safras e por vezes pode ser mal interpretado. Entretanto, esta deficiência pode ser minimizada pela análise dos parâmetros que determinam os limites seco e úmido do triângulo evaporativo, sendo estes sim, comparáveis entre cenas ou safras distintas.

Para exemplificar, podem-se analisar duas imagens que apresentaram condições distintas dos limites seco e úmido do TVDI, cena de 18/02/2005 (Figura 10A), representando uma imagem com baixa disponibilidade hídrica, e a cena de 06/03/2010 (Figura 10B), representando uma imagem de maior disponibilidade hídrica. Na cena de 18/02/2005, verifica-se uma maior inclinação negativa da reta do limite seco, o qual foi estabelecido a partir dos pontos em vermelho, correspondendo para cada NDVI aos pixels de maiores temperaturas (Sandholt et al., 2002). A inclinação da reta NDVI/TS tem sido associada à resistência dos estômatos e à evapotranspiração da superfície (Nemani e Running, 1989). Maior inclinação pode ser interpretada como tendo maior contraste dentro de uma cena entre áreas secas (não-irrigadas, com maior temperatura) e úmidas (irrigadas, com menor temperatura).

A reta do limite úmido (pontos em azul na dispersão) corresponde ao conjunto de pixels mais frios, consequência do maior conteúdo de água (Carlson, 1994; Sandholt et al., 2002). Coerente com o esperado, na cena de 18/02/2005 (Figura 10A), a temperatura mínima média foi próxima a 24 °C, maior do que a observada na cena com condições mais úmidas (Figura 10B), que foi cerca de 19 °C, evidenciando a relação entre as condições hídricas e térmicas.

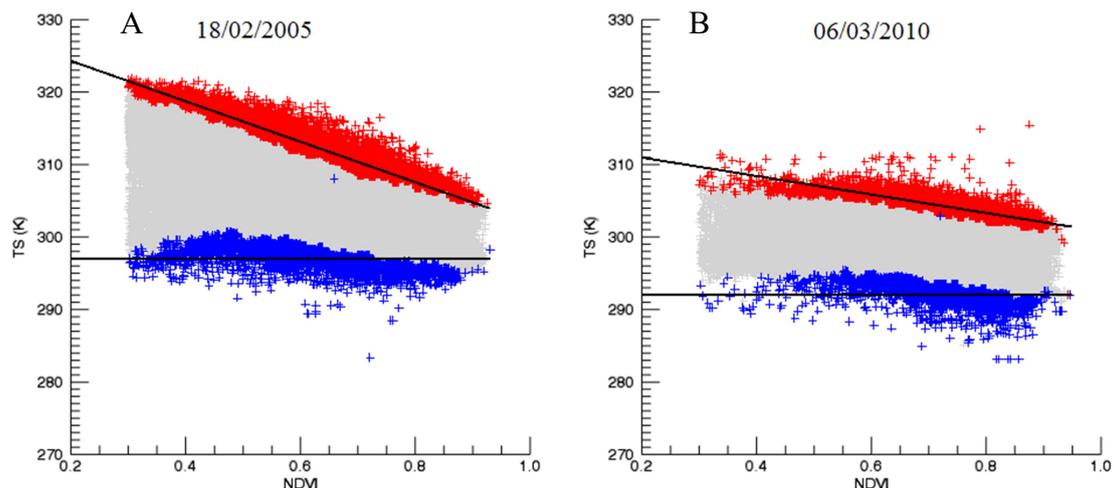


Figura 10. Dispersão entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e a temperatura de superfície (TS) nas cenas de 18/02/2005 (A) e 06/03/2010 (B) no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

A distribuição do TVDI na região de estudo para estas duas cenas pode ser observada na Figura 11A e B. Em vermelho estão representados os maiores índices de estresse hídrico, os quais predominam em boa parte do noroeste do Estado em ambas as cenas. É importante enfatizar novamente que no caso da normalização por cena, é possível diferenciar espacialmente a condições hídricas dentro da região de produção, mas não compará-la entre cenas.

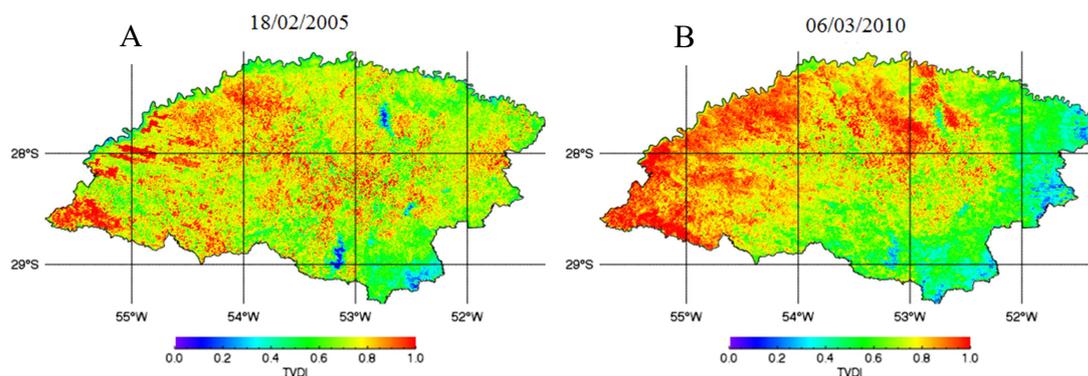


Figura 11. Imagens do índice TVDI para o noroeste do Estado do Rio Grande do Sul nas cenas de 18/02/2005 e 06/03/2010.

Para a dispersão entre precipitação pluvial e os dados de TSmin e da inclinação da reta “b” (Figura 12), observa-se uma tendência inversa, de diminuição da TSmin e de

aumento “b” com o aumento da precipitação pluvial. O aumento de “b”, reta do limite seco com menor inclinação negativa, ocorre devido a menor ocorrência de pixels mais quentes nos diferentes níveis de cobertura vegetal (NDVI) (Carlson, 1994; Sandholt et al., 2002). A menor TSmin é decorrente da maior disponibilidade de água no solo proporcionando a vegetação o melhor controle de temperatura (Sandholt et al., 2002).

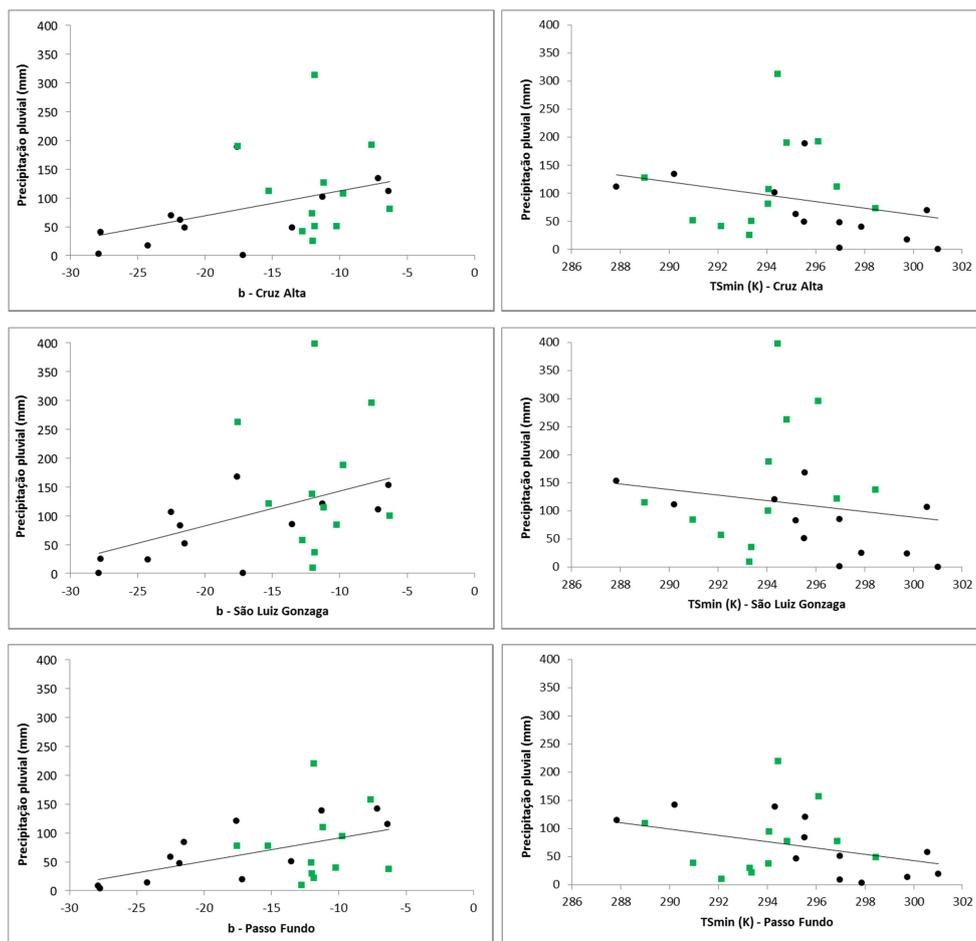


Figura 12. Dispersão entre valores de precipitação pluvial e os parâmetros “b” e “TSmin” utilizados para obtenção do índice TVDI sobre as estações meteorológicas de Cruz Alta, São Luiz Gonzaga e Passo Fundo. Pontos em preto safra 2004-05 em verde safra 2009-10.

Salienta-se que, contrário ao que frequentemente é empregado na literatura, não é adequado usar o índice TVDI parametrizado por cena para comparação das condições hídricas em imagens distintas, o que representa um limite importante no uso deste índice. É possível, entretanto, minimizar esta limitação a partir do uso dos parâmetros de cálculo do TVDI. Mas neste caso, há outra importante restrição, associada à perda de

informações da variabilidade espacial do índice na área a ser monitorada, o que certamente é uma das principais vantagens do uso de imagens orbitais.

4 CONCLUSÕES

A dispersão entre a temperatura da superfície (TS) e do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) assume a forma de um triângulo (triângulo evaporativo), cujos parâmetros, utilizados no cálculo do TVDI, estão associados à condição hídrica do clima úmido da região.

O padrão espaço temporal do TVDI mostra associação com a variabilidade do regime de precipitação pluvial. Mas, como o TVDI se baseia em uma parametrização dos limites úmido e seco que são aplicados para cada imagem individualmente, é complexa a comparação dos valores do índice entre distintas cenas. Neste caso, o que é evidenciado na região monitorada são as diferenças regionais quanto à disponibilidade hídrica. Neste enfoque são os parâmetros "b" e TSmin, utilizados no cálculo do índice, que podem ser utilizados para análise da evolução no tempo das condições hídricas.

REFERÊNCIAS

ATLAS Climático: Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura Pecuária e Agronegócio; Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), [2015]. Disponível em: <<http://www.r3pb.com.br/AtlasCemetRS/>> Acesso em: 18 mar. 2015.

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p.119-125, 1999.

CARLSON, T.N. An Overview of the "Triangle Method" for Estimating Surface Evapotranspiration and Soil Moisture from Satellite Imagery. **Sensors**, [S.l.], v.7, p. 1612-1629, 2007.

CARLSON, T.N.; GILLIES, R.R.; PERRY, E.M. A Method to Make Use of Thermal Infrared Temperature and NDVI measurements to Infer Surface Soil Water Content and Fractional Vegetation Cover. **Remote Sensing Reviews**, New York, v. 9, n. 1-2, p. 161-173, 1994.

CARLSON, T.N.; GILLIES, R.R.; SCHMUGGE, T.J. An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil water content. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 77, n. 3-4, p. 191-205, 1995.

CHEN, J. et al. Estimating soil moisture using temperature-vegetation dryness index (TVDI) in the Huang-huai-hai (HHH) plain. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 32, n. 4, p. 1165-1177, 2011.

CONAB. **Acompanhamento safra Brasileira de grãos**. v. 1 - Safra 2013/14, n. 3 - Terceiro Levantamento, dez. 2013. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2&Pagina_objcmsconteudos=3#A_objcmsconteudos> Acesso em 22 out. 2014.

CUNHA, G.R. et al. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 446-459, 2001.

EMATER - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural. **Informativo conjuntural**, 29 de agosto de 2013. Disponível em: <http://www.emater.tche.br/site/arquivos_pdf/conjuntural/conj_29082013.pdf> Acesso em: 08 ago. 2014.

FONTANA, D.C. et al. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 399-403, 2001.

FONTANA, D.C. et al. Inferências sobre o calendário agrícola a partir de perfis temporais de NDVI/MODIS. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 3, p. 350-358, 2015.

FENSHOLT, R.; SANDHOLT, I. Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near-and shortwave infrared data in a semiarid environment. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 87, n. 1, p. 111-121, 2003.

GAO, Z.; GAO, W.; CHANG, N. Integrating temperature vegetation dryness index (TVDI) and regional water stress index (RWSI) for drought assessment with the aid of LANDSAT TM/ETM+ images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 13, n. 3, p. 495-503, 2011.

HOLZMAN, M.E.; RIVAS, R.; PICCOLO, M. C. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 28, p. 181-192, 2014.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Base de dados cartográfica**. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/malhas_digitais/municipio_2010/> Acesso em: 20 set. 2014.

KÖPPEN, W. **Climatologia**. Cidade do México: Fondo de Cultura Economica, 1948. 71p.

LP DAAC - Land Processes Distributed Active Archive Center. **[Banco de dados]** Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov>> Acesso em: 20 set. 2014.

MATZENAUER, R. et al. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAGRO, 2002. (Boletim FEPAGRO, n. 10)

MORAN, M.S.; RAHMAN, A.F.; WASHBURNE, J.C. Combining the Penman–Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 80, n. 2-4, p. 87-109, 1996.

MUNDSTOCK, C.; THOMAS, A.L. **Soja**: Fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos. Porto Alegre: Evangraf, 2005. 31p.

NEMANI, R.R.; RUNNING, S.W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal IR AVHRR data. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 28, p. 276-284, 1989.

PRICE, J.C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 28, n. 5, p. 940-948, 1990.

SANDHOLT, I.; RASMUSEN, K.; ANDERSEN, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 79, n. 2-3, p. 213-224, 2002.

SANTOS, J.S. et al. Identificação da dinâmica espaço-temporal para estimar área cultivada de soja a partir de imagens MODIS no Rio Grande do Sul, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.1, p. 54-63, 2014.

SIDRA [Banco de Dados]. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>> Acesso em: 20 set. 2014.

SON, N.T. et al. Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 18, p. 417-427, 2012.

VENTURINI, V.; BISHT, G.; ISLAM, S. Comparison of evaporative fractions estimated from AVHRR and MODIS sensors over South Florida. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 93, n. 1-2, p. 77-86, 2004.

WANG, X.; XIE, H.; GUAN, H. Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 340, n 1-2, p. 12-24, 2007.

5.2 ARTIGO 2

Diferentes abordagens de uso do triângulo evaporativo no cálculo do TVDI em condições de clima subtropical úmido

Diferentes abordagens de uso do triângulo evaporativo no cálculo do TVDI em condições de clima subtropical úmido

RESUMO: Devido ao crescente aumento da necessidade de alimentos e da importância do monitoramento das atividades agrícolas, o objetivo deste trabalho foi comparar duas abordagens no processo de parametrização do índice TVDI para a cultura da soja no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Foram utilizadas imagens do sensor MODIS TS e NDVI resolução espacial de 1.000 m, temporal de 8 e 16 dias respectivamente. Através da criação dos triângulos evaporativos, a dispersão entre TS e NDVI foi feito um triângulo para cada imagem (parametrização por cena) e na parametrização por safra um triângulo único com todas as imagens. Dados de precipitação pluvial foram extraídos de estações meteorológicas localizadas na área de estudo. O período de análise compreendeu duas safras contrastantes em rendimento 2004-05 com $0,5\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ e 2009-10 com $2,7\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. A utilização da parametrização por cena possibilitou análise das condições hídricas da área de estudo frente aos limites hídricos de cada imagem, e a identificação de áreas de ocorrência de estresse em cada uma delas. Já com a aplicação do TVDI na parametrização por safra, o modelo tem aptidão em representar o momento e a frequência de ocorrência de eventos de menor disponibilidade hídrica para a cultura. A variabilidade do regime de precipitação pluvial mostra associação com a distribuição espacial e temporal do índice TVDI. Mas a consistência da mesma depende do enfoque utilizado na parametrização do índice, assim como da condição hídrica da safra. A parametrização por safra do TVDI mostrou ser o mais consistente para fins de monitoramento e previsão de safras.

PALAVRAS CHAVE: parametrização, soja, condições hídricas, imagens de satélite.

Different approaches for triangle method-based TVDI calculation under humid subtropical climate conditions

ABSTRACT: In the context of increasing demand for food and in view of the importance of monitoring agricultural activities, the present study aimed to compare two approaches for parameterization of the temperature–vegetation dryness index (TVDI) for soybean crops in the northwest region of Rio Grande do Sul, Brazil MODIS TS and NDVI sensor images, with a spatial resolution of 1000 m and a temporal resolution of 8 and 16 days respectively, were used. Triangular T_s /NDVI scatter graphs (triangle method) were plotted either for each image (scene-specific parameterization) or for all images at once (crop-type parameterization). Rainfall precipitation data from weather stations located in the area of interest were also used. The period of analysis encompassed two soybean harvests with contrasting yields: 2004-05 (yield $0.5\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) and 2009-10 ($2.7\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$). Scene-specific parameterization enabled analysis of the water status of the area of interest, by analysis of wet and dry edges for each image, as well as identification of stress areas in each image. With crop-type parameterization of the TVDI, the model was able to represent the timing and frequency of limited water availability events. Variability in precipitation regime was associated with the spatiotemporal distribution of TVDI values. However, the consistency of this distribution depended on the method used for parameterization and on the water status of the crop. Crop-type parameterization of the TVDI was the most consistent method for crop monitoring and forecasting purposes.

KEYWORDS: parameterization, soybean, water status, satellite imagery.

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento crescente da necessidade de alimentos decorrente do crescimento populacional, o monitoramento do desenvolvimento das culturas agrícolas tem se tornado cada vez mais essencial. O Brasil é o segundo maior produtor de soja no mundo e o Estado do Rio Grande do Sul é atualmente o terceiro maior produtor brasileiro, superado apenas pelos Estados do Mato Grosso e Paraná segundo levantamento da EMBRAPA (2016). De acordo com o levantamento do IBGE no banco de dados SIDRA, o Rio Grande do Sul registrou na safra 2013-14 a produção de 13 milhões de toneladas do grão, ocupando uma área de 4,9 milhões de hectares.

Diversos trabalhos têm apontado as condições meteorológicas durante o período de crescimento e desenvolvimento das culturas como a principal causa de variabilidade na produção agrícola do Estado do Rio Grande do Sul (Berlato et al., 1992; Matzenauer et al., 1995; Berlato e Fontana, 2003). A cultura da soja é conduzida no Rio Grande do Sul majoritariamente sem irrigação sendo, portanto, altamente depende da precipitação pluvial. Também é sabido que o total de precipitação pluvial que ocorre durante a safra frequentemente é insuficiente para atender a demanda hídrica, sendo a estiagem o principal fator de perdas, afetando diretamente no rendimento desta cultura.

Dada a extensa área de cultivo no Estado, parâmetros obtidos a partir de técnicas de sensoriamento remoto podem ser muito úteis para fins do monitoramento da condição hídrica da soja (Risso et al., 2012). As imagens orbitais possibilitam a obtenção de índices de vegetação (IV) cobrindo grandes áreas, os quais são sensíveis indicadores do “verdor” das plantas, portanto, indicadores da ocorrência de restrições hídricas nas culturas (Huete et al., 2002; Gao et al., 2011). Porém, é importante ressaltar que a resposta destes índices é lenta, ocorre somente quando o estresse já afetou o

desenvolvimento da planta. Por outro lado, a temperatura de superfície (TS), que também se obtém a partir de dados de SR, tem resposta mais rápida ao estresse, inclusive a um evento isolado (Wan, 2008).

Tendo este conceito como base, Sandholt et al. (2002) propuseram a utilização de um índice denominado TVDI (do inglês *Temperature-Vegetation Dryness Index*), para monitorar as condições hídricas, o qual tem como base a relação entre IV e TS. Quando ocorre restrição hídrica há elevação da temperatura das plantas em função da restrição à evapotranspiração (Wang et al., 2006). Isto faz com que o TVDI possa ser um eficiente indicador do atendimento das necessidades hídricas da cultura, conforme verificado em diversos estudos (Wang et al., 2006; Gao et al., 2011; Holzman et al., 2014; Liang et al., 2014).

O índice TVDI baseia-se na formação de um triângulo evaporativo padrão de disposição de pontos de uma dispersão obtida a partir de imagens de NDVI e TS. Este padrão de dispersão depende da biomassa existente e do teor de umidade do solo (Price, 1990; Sandholt et al., 2002; Garcia et al., 2014). O modelo do TVDI possibilita a normalização da condição hídrica da vegetação entre os limites úmido e seco do triângulo evaporativo, sendo que os valores do índice se distribuem entre 0 (limite úmido) e 1 (limite seco).

O índice TVDI tem sido utilizado por diversos especialistas para determinar a umidade do solo e a disponibilidade hídrica no sistema solo-planta em escala regional (Sandholt et al., 2002; Gao et al., 2011; Holzman et al., 2014). Para a correta parametrização do modelo é necessário que ocorram na região da imagem extremos de disponibilidade hídrica, de forma a caracterizar os limites do triângulo evaporativo. Especialmente quando se usa imagens de baixa resolução (pixel de 1.000 m ou mais), a identificação e mapeamento dos limites secos e úmidos pode ser problemática, dada a dificuldade de

encontrar pequenas parcelas com condições hídricas representativas (Roerink et al., 2000; Kustas et al., 2004). Como forma de garantir a ocorrência destes limites, mesmo usando estas imagens, Sandholt et al. (2002) propuseram o uso de áreas extensas no processo de parametrização.

A parametrização mais frequentemente implementada nas análises é a que utiliza uma data individualmente (cena), o que, conforme abordado por Sandholt et al. (2002), pode ser um fator limitante para análise do padrão temporal do índice ao longo de uma safra. A parametrização por cena, portanto, torna complexa a comparação das condições hídricas entre as distintas imagens, pois são obtidos triângulos evaporativos específicos para cada imagem e o valor do TVDI não é comparável.

Considerando esta problemática, a hipótese levantada neste trabalho é que o uso da parametrização por safra caracteriza a condição hídrica da região e possibilita um melhor entendimento da disponibilidade hídrica ao longo do ciclo da cultura da soja. Assim, o presente trabalho teve como objetivo comparar o desempenho do índice TVI na caracterizar das condições hídricas, obtido com duas abordagens no processo de parametrização do TVDI, a criação de um triângulo evaporativo para cada cena e para todo o período de análise que compreende a safra da cultura da soja.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em região com significativa produção de soja, situada no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 13). A região abrange 216 municípios e uma área aproximada de 6,5 milhões de hectares segundo base cartográfica do IBGE (2010), onde o clima predominante é subtropical chuvoso da variedade Cfa, segundo a classificação climática de Köppen (1948), sem estação seca, temperaturas médias anuais moderadas e verão quente.

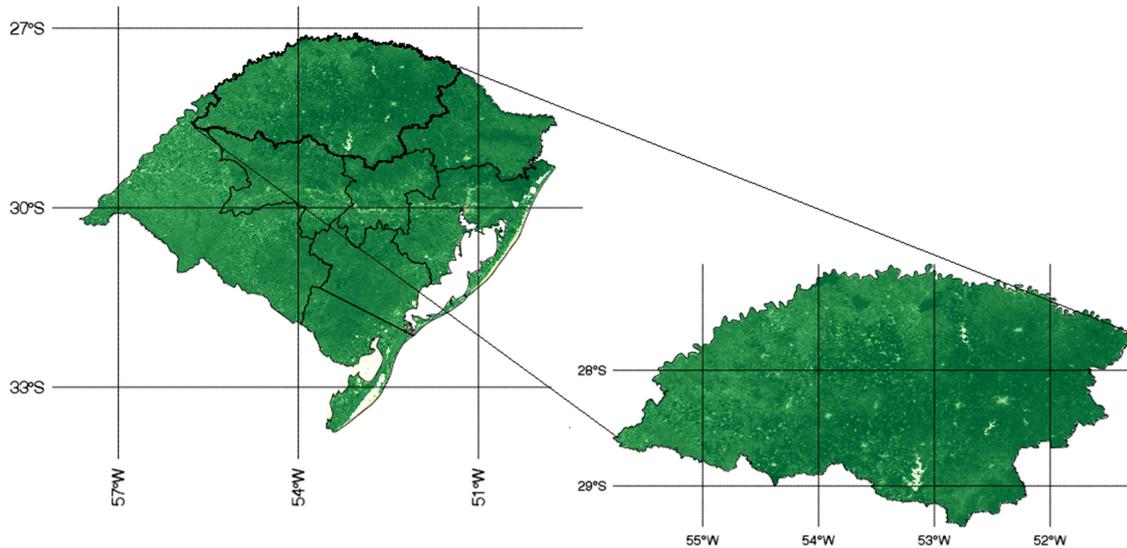


Figura 13. Localização da área de estudo em destaque no Estado do Rio Grande do Sul.

Foram utilizados os produtos MODIS, obtidos através de *download* no banco de dados da *LP DAAC*, para o cálculo do TVDI. Os dados de TS e de NDVI apresentam resolução espacial de 1.000 m correspondendo, respectivamente, a composições de períodos de 8 e 16 dias. Os produtos corresponderam ao *tile* h13v11 e h13v12, os quais foram transformados da projeção sinusoidal para coordenadas geográficas WGS 84 e, após, recortada a área de estudo. O processamento das imagens foi efetuado com o *software* ENVI 5.0.

O período de análise abrangeu duas safras de 2004-05 e 2009-10, contrastantes quanto à disponibilidade hídrica (menor e maior disponibilidade hídrica, respectivamente), sendo 12 imagens de NDVI e de TS para cada safra.

O índice TVDI foi obtido com a aplicação da Equação (1) proposta por Sandholt et al. (2002):

$$\text{TVDI} = (\text{TS} - \text{TSmin}) / (a + b * \text{NDVI} - \text{TSmin}) \quad (1)$$

Onde: TS é a temperatura radiativa da superfície do pixel em K; TSmin é a temperatura mínima de superfície em K, correspondente ao limite úmido do triângulo evaporativo

(Figura 14 - linha verde); "a" e "b" são os coeficientes linear e angular da reta que representa o limite seco (Figura 14 - linha vermelha).

Os limites, seco e úmido foram obtidos a partir de um gráfico de dispersão entre o índice de vegetação e a temperatura de superfície, delimitando o triângulo evaporativo (Figura 14). Estes limites são utilizados para normalização do modelo, tendo em vista que o modelo proporciona um índice de estresse entre 0 e 1 para cada imagem. Em lados opostos neste triângulo tem-se o solo exposto (quando o NDVI é baixo e a TS alta) e a cobertura total da vegetação (quando o NDVI é alto e a TS é baixa). Em condições de cobertura parcial, quanto menor for a TS, mais adequada é a condição hídrica e, portanto, menor é o TVDI.

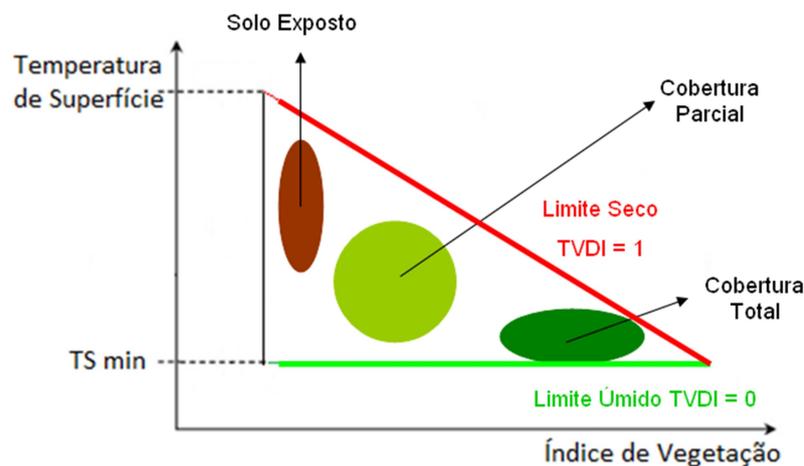


Figura 14. Triângulo Evaporativo.
Fonte: Adaptado de Sandholt et al. (2002).

Para obtenção dos parâmetros do TVDI foram utilizadas duas abordagens, a primeira delas foi baseada na parametrização por cena, que consistiu na obtenção dos parâmetros “a” e “b”, assim como a TSmin para cada uma das 12 imagens que compõem cada safra, processadas individualmente. A segunda abordagem consistiu no agrupamento dos pixels de todas as imagens da safra em uma única dispersão, com o intuito de agrupar

todas as condições de disponibilidade hídrica ao longo do desenvolvimento da cultura em um único triângulo evaporativo.

Na parametrização por cena, foram comparados os valores dos parâmetros “a”, “b” e TSmin para cada uma das imagens e também analisadas as dispersões dos triângulos evaporativos obtidos em datas com distintas condições hídricas. Na parametrização por safra foram analisados os triângulos evaporativos das duas safras. Foi então, feita a análise da distribuição espacial, a partir das imagens de TVDI obtidas por ambas as abordagens de parametrização.

Foram também extraídos dados meteorológicos de precipitação pluvial das estações meteorológicas convencionais de Cruz Alta, São Luiz Gonzaga, e Passo Fundo, pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Estas informações foram obtidas diariamente e após, foram calculados os valores acumulados para 16 dias, de forma a compatibilizar com a resolução temporal das imagens MODIS. Estes dados foram utilizados para análise do perfil do TVDI, do NDVI e da precipitação pluvial ao longo de cada safra.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados obtidos na parametrização por cena mostrou diferenças importantes entre as duas safras analisadas. Foi maior a variabilidade na declividade da reta que determina o limite seco na safra de 2004-05, com valores do parâmetro “b”, variando entre $-27,9$ e $-6,1$. Para a safra de 2009-10 este parâmetro variou entre $-7,5$ e $-6,3$ (Tabela 2). Conforme apontado por Sandholt et al. (2002) e Holzman et al. (2014) em áreas com clima úmido, a variabilidade nos parâmetros é mais evidente em anos onde o regime de precipitação pluvial apresenta-se abaixo do normal. Este foi o padrão observado na safra de 2004-05.

Já para o parâmetro TSmin, os dados apresentaram variação similar, de 3 k, nas duas safras, sendo de 288 K a 301 K em 2004-05 e de 289 K a 297 K em 2009-10. Entretanto, de janeiro a março (cultura da soja em pleno desenvolvimento), a TSmin foi superior em 2004-05 quando comparada à safra 2009-10, o que também é coerente com o esperado, visto à associação entre temperatura e disponibilidade hídrica (Goward et al., 2002; Liang et al., 2014).

Tabela 2. Parâmetros a (intercepto), b (inclinação) e TSmin (temperatura mínima) utilizados para o cálculo do TVDI na parametrização por cena nas safras de 2004-05 e 2009-10 para o Rio Grande do Sul.

Data	Parâmetros para cálculo do TVDI					
	Safrá 2004-05			Safrá 2009-10		
	a (K)	b	TSmin (K)	a (K)	b	TSmin (K)
1/nov	312	-11,3	294	319	-11,9	293
17/nov	318	-17,6	296	312	-7,6	296
3/dez	331	-27,8	298	312	-11,8	294
19/dez	317	-13,5	297	319	-15,3	297
1/jan	330	-24,2	300	312	-6,3	294
17/jan	326	-22,5	301	319	-17,5	295
2/fev	323	-21,8	295	315	-12,0	298
18/fev	330	-27,9	297	309	-9,7	294
6/mar	323	-17,2	301	314	-12,8	292
22/mar	319	-21,5	296	309	-10,2	291
7/abr	307	-7,1	290	309	-12,0	293
23/abr	300	-6,4	288	303	-11,2	289

Nos triângulos das duas cenas escolhidas para exemplificar condições hídricas distintas (Figura 15A e B) verifica-se que os pixels que caracterizam o limite úmido (azul) apresentaram valores menores em 02/02/2005, quando se observou maior precipitação (63,9 mm) em comparação com 18/02/2005 (4 mm). Também se podem observar diferenças entre as máximas temperaturas e as inclinações das retas que delimitam os limites secos nas duas imagens (vermelho). A cena de 18/02/2005 apresentou maior declividade e maiores temperaturas máximas, caracterizando a ocorrência de maiores

contrastes entre pixels com menor e maior disponibilidade hídrica na região (Goward et al., 2002).

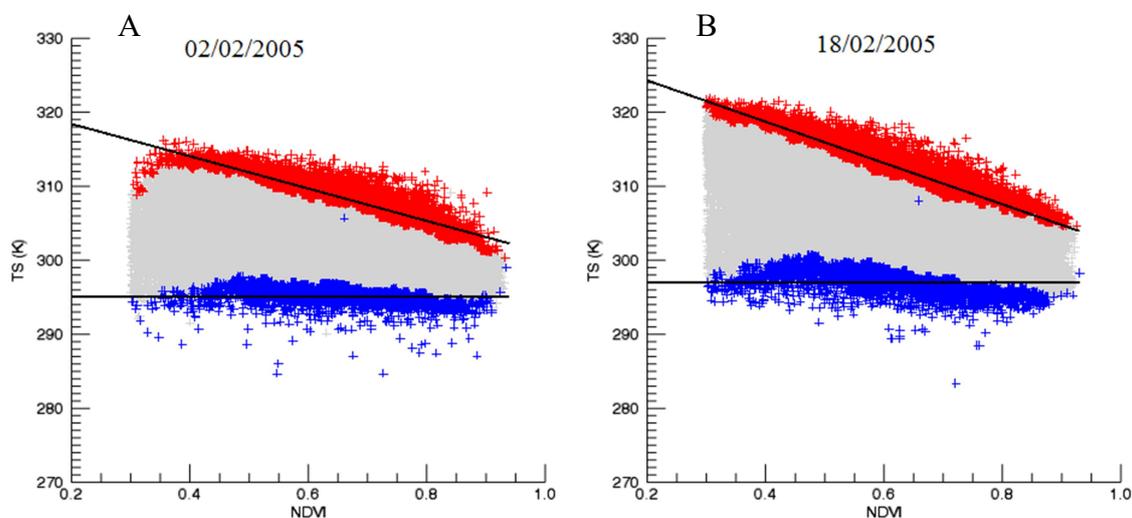


Figura 15. Dispersão entre o índice de vegetação (NDVI) e a temperatura de superfície (TS) para as imagens de 02/02/2005 (A) e 18/02/2005 (B) no Rio Grande do Sul. Em vermelho e azul, respectivamente os pixels utilizados para obtenção dos parâmetros que caracterizam o limite seco e úmido do triângulo evaporativo.

A análise da distribuição espacial do TVDI mostrou que em todas as imagens (Figuras 16 e 17) ocorrem de regiões com altos valores (em vermelho) e regiões com baixos valores (em azul) do índice. Essa é uma característica intrínseca do modelo quando o ajuste dos parâmetros é feito por cena todos os valores são normalizados em relação ao limite seco e úmido daquela cena. Utilizando esta abordagem, a condição hídrica das duas safras parece muito semelhante. Sabe-se, entretanto, que isto não ocorreu, visto que as precipitações pluviais foram distintas, sendo 851 mm na safra 2004-05 e 1.360 mm na safra 2009-10.

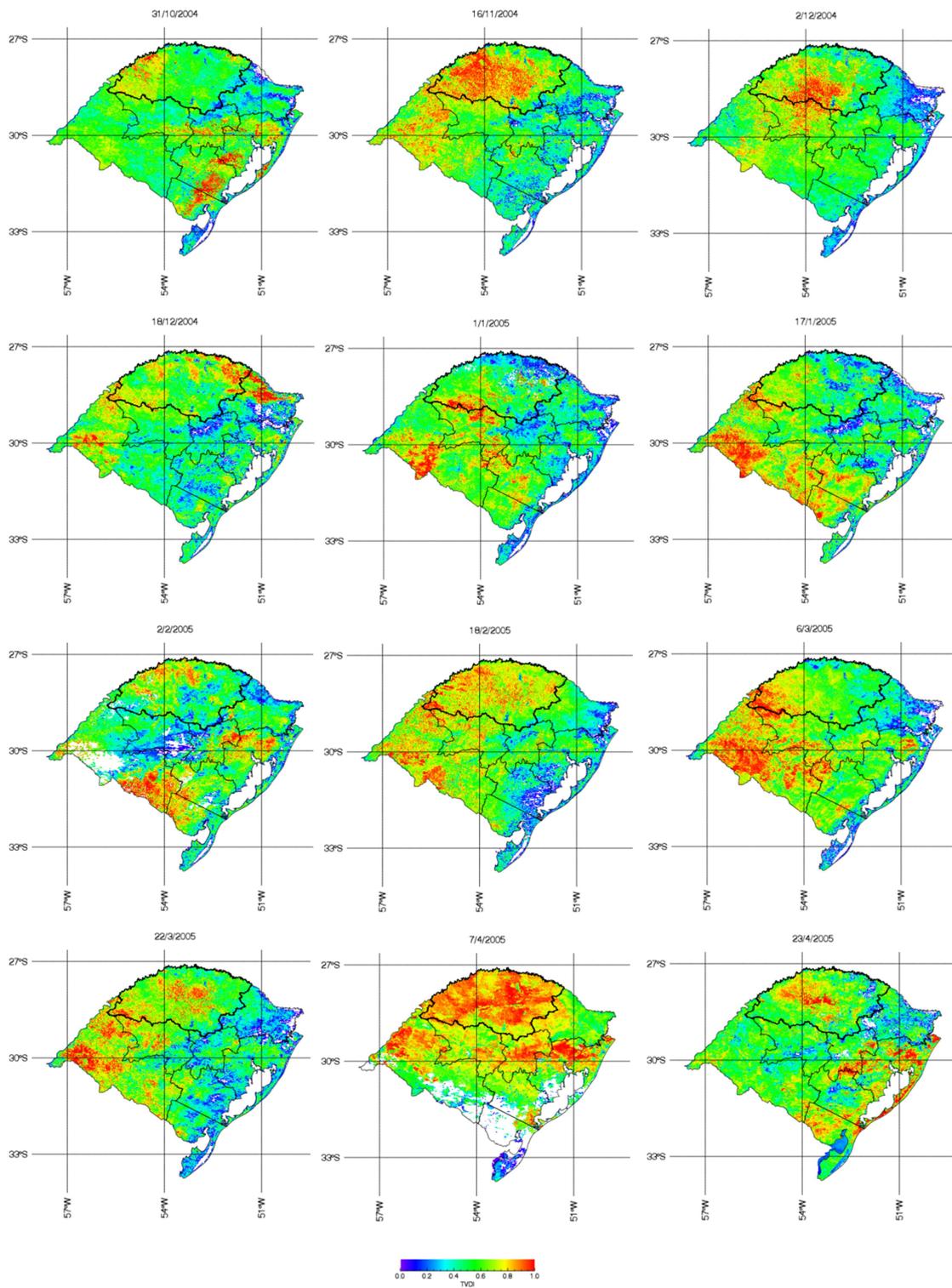


Figura 16. Distribuição espacial do TVDI com parametrização por cena para a safra 2004-05. Limites em preto caracterizam as macrorregiões do Estado (região noroeste com borda destacada), as áreas em branco correspondem a regiões mascaradas como nuvens provenientes da imagem de temperatura de superfície.

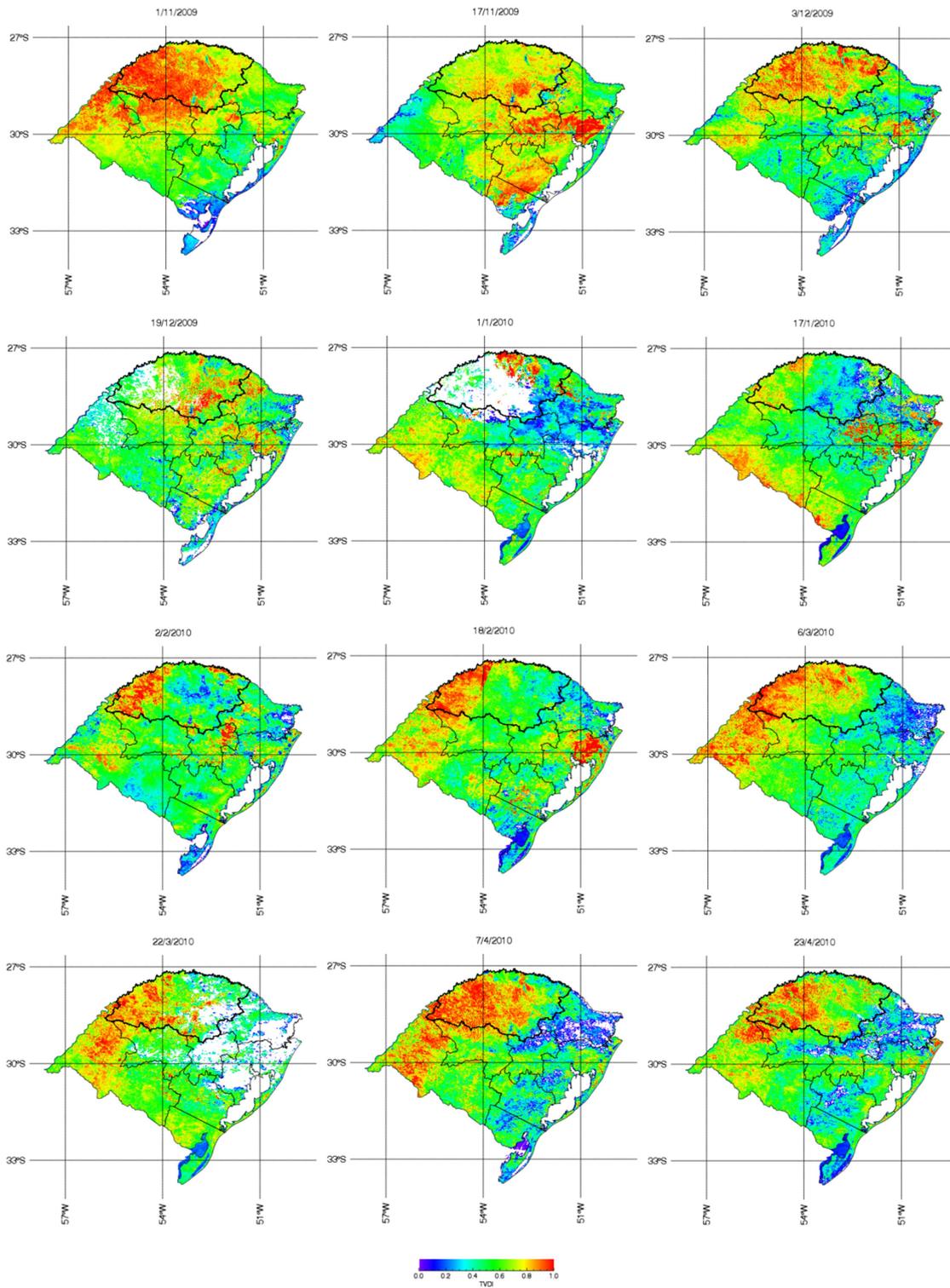


Figura 17. Distribuição espacial do TVDI com parametrização por cena para a safra 2009-10. Limites em preto caracterizam as macrorregiões do Estado (região noroeste com borda destacada), as áreas em branco correspondem a regiões mascaradas como nuvens provenientes da imagem de temperatura de superfície.

Na segunda abordagem utilizada neste estudo, com o uso de todas as imagens de NDVI e TS de cada uma das safras para a construção da dispersão (Figura 18 A e B), obtiveram-se dois triângulos evaporativos que reúnem todas as condições hídricas ocorridas ao longo da safra. O objetivo foi tornar possível a comparação das condições hídricas entre as imagens de uma mesma safra. Comparando os triângulos foi observada uma pequena diminuição na declividade negativa da reta de limite seco em 2009-10 (-23,6 em 2004-05 e -20,2 em 2009-10) e também uma pequena diminuição da TSmin (289,6 K em 2004-05 e 288,8 K em 2009-10). A semelhança entre os triângulos destas duas safras com condições hídricas tão distintas pode indicar que é possível obter um triângulo característico das condições climáticas e ambientais do Estado do Rio Grande do Sul. Neste caso, que deve ser confirmado a partir da análise de um número maior de safras, seria possível a comparação entre safras, o que é estratégico em sistemas de previsão de safras.

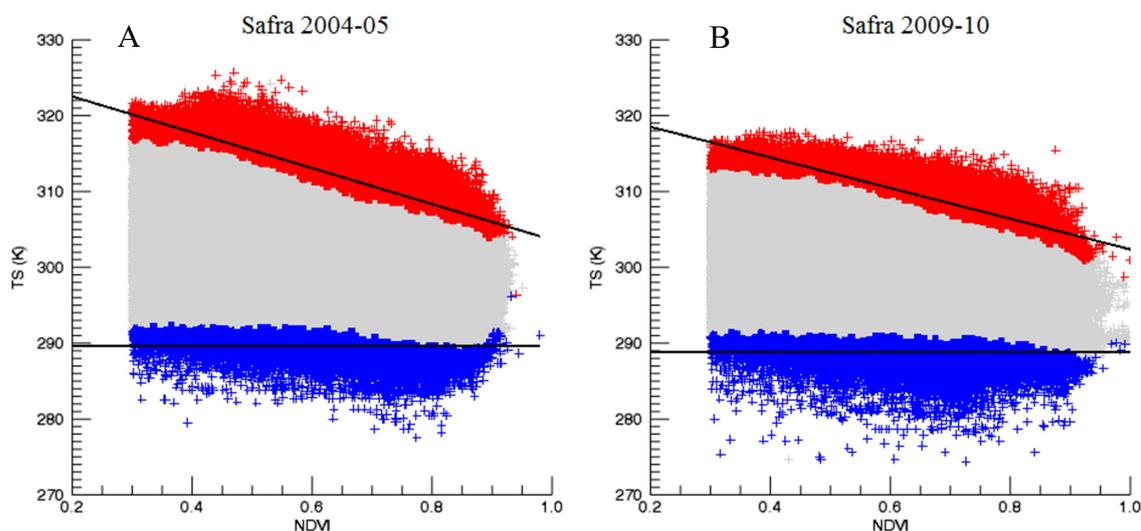


Figura 18. Dispersão entre o índice de vegetação (NDVI) e a temperatura de superfície (TS) para as imagens das safras de 2004-2005 (A) e 2009-10 (B) no Rio Grande do Sul. Em vermelho e azul, respectivamente os pixels utilizados para obtenção dos parâmetros que caracterizam o limite seco e limite úmido do triângulo evaporativo.

As imagens de TDVI com parametrização por safra (Figuras 19 e 20) apresentaram uma distribuição bem distinta em relação ao observado na parametrização por cena (Figuras

16 e 17). Em diversas imagens, tanto para as safras de 2004-05 e 2009-10, ocorreu uma baixa variabilidade do TVDI ao longo do território de Estado do Rio Grande do Sul. Em outras, entretanto, o contraste dos valores do índice entre as regiões é evidenciado. A abordagem por safra, portanto, possibilitou a identificação das áreas e períodos do ciclo de cultivo em que ocorreram restrições hídricas (maiores índices TVDI), entendimento que não era possível com a análise das imagens de TVDI obtidas pela parametrização por cena.

De forma geral, pode-se observar a existência de um gradiente do TVDI em direção ao oeste do Estado, coincidente com o padrão de distribuição da demanda evaporativa da atmosfera e oposto ao padrão da precipitação pluvial e da capacidade de armazenamento de água no solo (Cunha et al., 2001).

Na safra 2004-05 (Figura 19), das 12 imagens processadas, em 5 foram registrados altos índices de TVDI na região norte do Estado (área de maior produção de soja), sendo que os mesmos ocorreram no período em que a cultura estava com grande desenvolvimento vegetativo (alto índice de área foliar). Os altos valores observados especialmente em fevereiro e março, que são meses nos quais a cultura apresenta maior sensibilidade à falta de água (florescimento e formação de grãos) e quando a cultura da soja consome cerca de $7,5 \text{ mm.dia}^{-1}$ (Matzenauer et al., 2002), foram determinantes dos níveis de rendimento de grãos obtidos nas mesmas. Nesta safra, o rendimento médio no noroeste foi o menor observado nos últimos 15 anos $0,5 \text{ t.ha}^{-1}$ segundo dados do banco de dados do SIDRA no IBGE.

Na safra de 2009-10 (Figura 20), observam-se no norte do Rio Grande do Sul somente 3 períodos com altos índices TVDI. O primeiro deles ocorreu em novembro, quando a cultura em fase de estabelecimento se encontra com maior presença de solo exposto, que por um lado reduz o NDVI e por outro lado tende a aumentar as temperaturas da

superfície. Já nos períodos de maior sensibilidade da cultura à falta de água, o TVDI apresentou valores baixos, indicado que a condição hídrica era adequada.

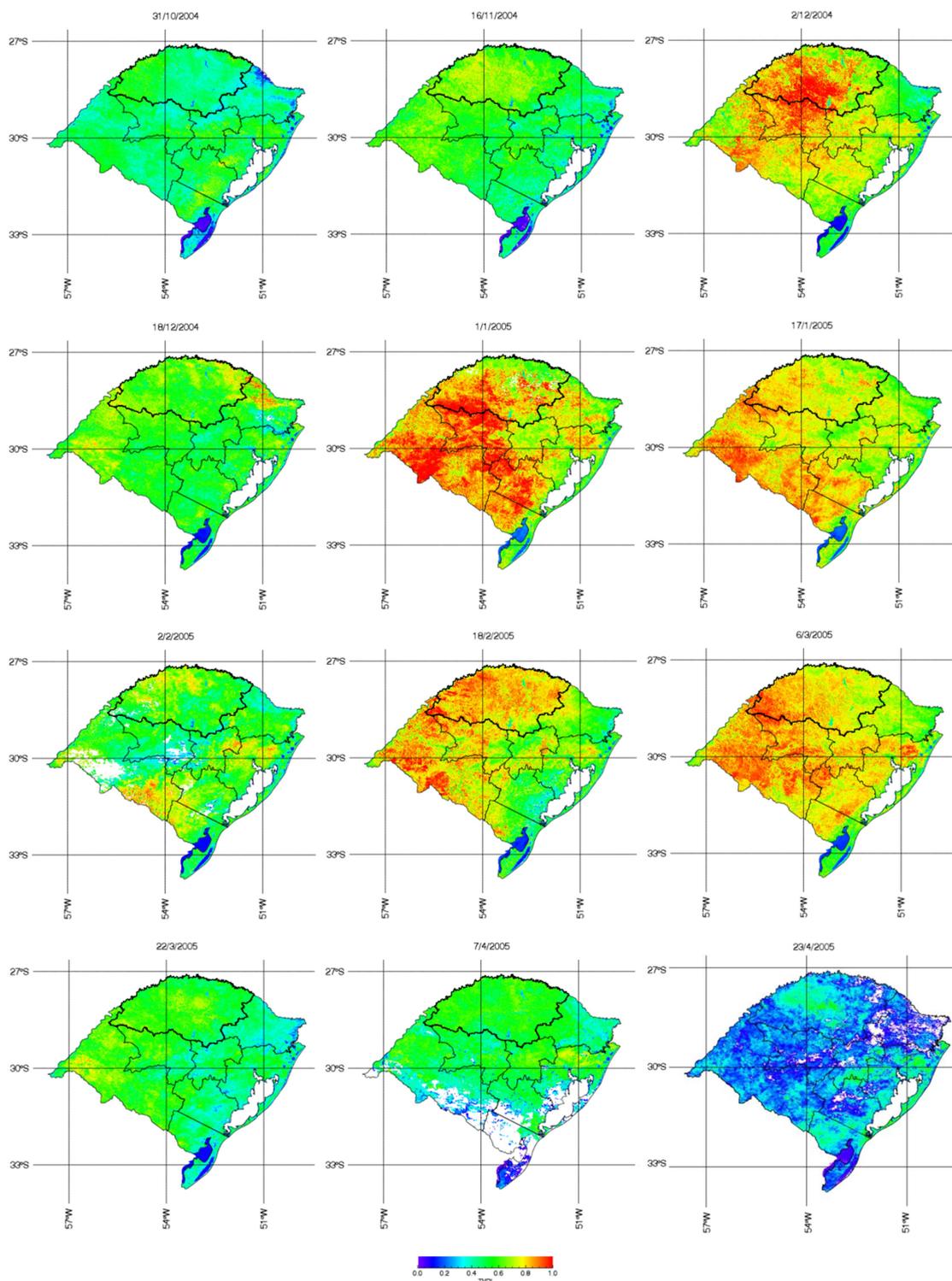


Figura 19. Distribuição espacial do TVDI com parametrização por safra (2004-05). Limites em preto caracterizam as macrorregiões do Estado (região noroeste com borda destacada), as áreas em branco correspondem a regiões mascaradas como nuvens provenientes da imagem de temperatura de superfície.

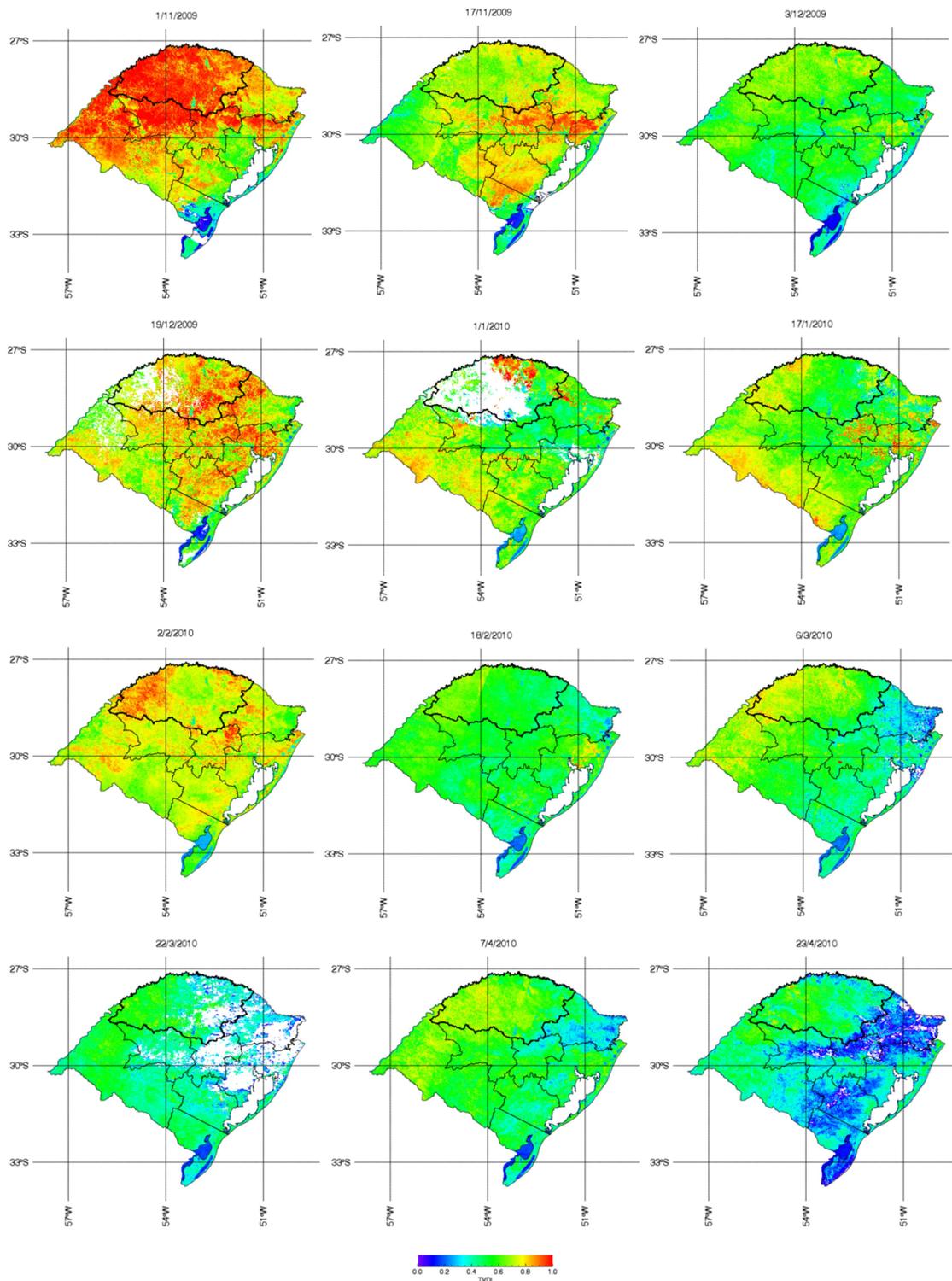


Figura 20. Distribuição espacial do TVDI de distintas imagens com parametrização por safra (2009-10). Limites em preto caracterizam as macrorregiões do Estado e a região noroeste com borda destacada, as áreas em branco correspondem a regiões mascaradas como nuvens provenientes da imagem de temperatura de superfície.

A análise do perfil temporal da safra 2004-05 Figura 21 A mostra que os valores médios do TVDI de toda a área de cultivo de soja da região noroeste nesta safra foram maiores do que os observados na safra de 2009-10 (Figura 21B). Observou-se, respectivamente nestas safras, altos TVDI em 5 e 3 períodos. Em 2004-05 houve baixa precipitação pluvial ao longo da safra e quatro dos eventos de maior índice TVDI foram observados no período no qual as lavouras encontravam-se com alta cobertura (nas duas imagens de janeiro, segunda imagem de fevereiro e na primeira de março).

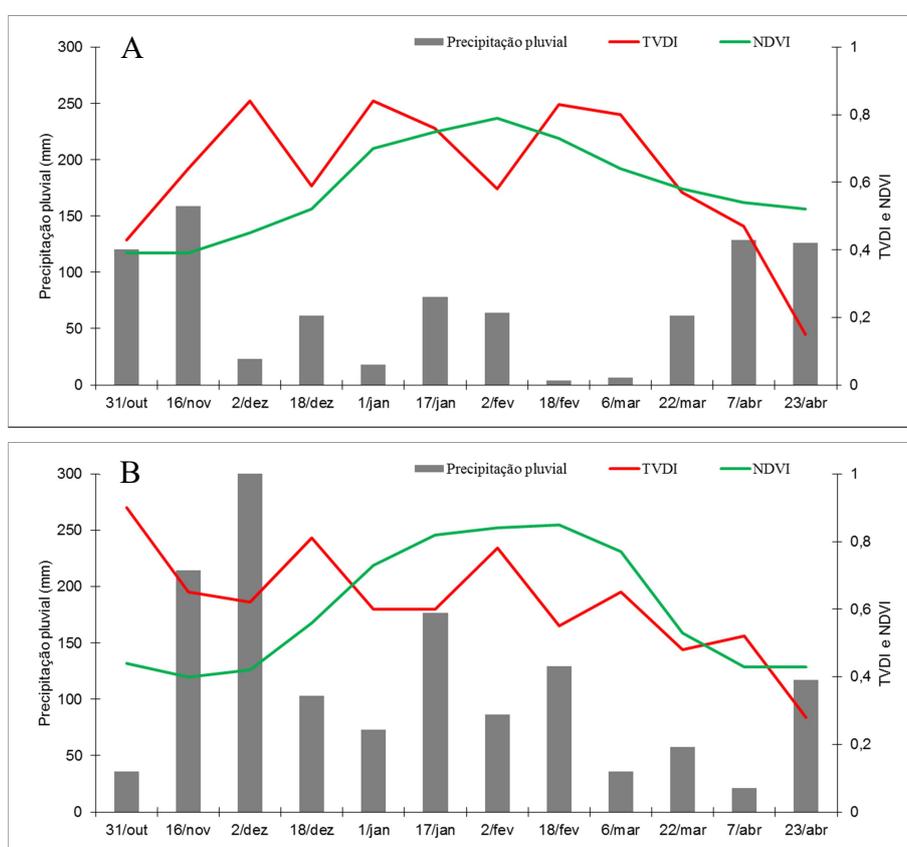


Figura 21. Perfis médios do índice TVDI na parametrização por safra, do índice de vegetação NDVI e da precipitação pluvial acumulada de 16 dias para as áreas de cultivo de soja no noroeste na safra de 2004-05 (A) e na safra de 2009-10 (B).

Na safra de 2009-10 (Figura 21) dos três eventos de maior TVDI, apenas um deles ocorreu durante o período em que a vegetação encontrava-se em máximo desenvolvimento (primeira imagem de fevereiro). A precipitação pluvial média da área de estudo nesta safra foi bem distribuída e em todos os períodos de 16 dias superior a 70

mm, com exceção da primeira imagem de março, que foi de apenas 36 mm, quando também se observa um incremento no perfil do TVDI.

Em ambas as safras, no final do ciclo (março e abril) observou-se baixos valores de TVDI, o que é consequência da diminuição da temperatura da superfície e ao menor NDVI associado à vegetação senescente do final da safra (Goward et al., 2002).

Para o ano seco (2004-05) houve associação negativa entre TVDI e a precipitação pluvial (Figura 22) para as três estações meteorológicas localizadas na área de estudo, o que é esperado. O coeficiente de correlação obtido para as estações de Cruz Alta, São Luiz Gonzaga e Passo fundo foram respectivamente, -0,58, -0,81 e -0,70, todos significativos (alfa de 0,05). O mesmo não ocorreu para a safra de 2009-10, quando os coeficientes de correlação para as três estações foram de -0,13, -0,06 e -0,32. Nenhum dos coeficientes apresentou significância estatística, sendo que nesta safra a variabilidade dos valores de TVDI foi regida por outros fatores, que não a precipitação pluvial acumulada nos 16 dias. Talvez a distribuição da precipitação pluvial no período ou mesmo outras variáveis agrometeorológicas associadas à demanda evaporativa da atmosfera podem estar influenciando o TVDI.

Por fim, é relevante indicar que a avaliação feita do desempenho do TVDI frente a dados de precipitação pluvial é muito simplista e os coeficientes de correlação não poderiam ser muito superiores aos encontrados. Relações mais consistentes poderiam ser obtidos caso fosse feito um balanço hídrico, considerando não somente o aporte de água no sistema (precipitação pluvial), mas também a capacidade do solo em reter esta água e a demanda evaporativa da atmosfera. Este pode ser testado em trabalhos futuros.

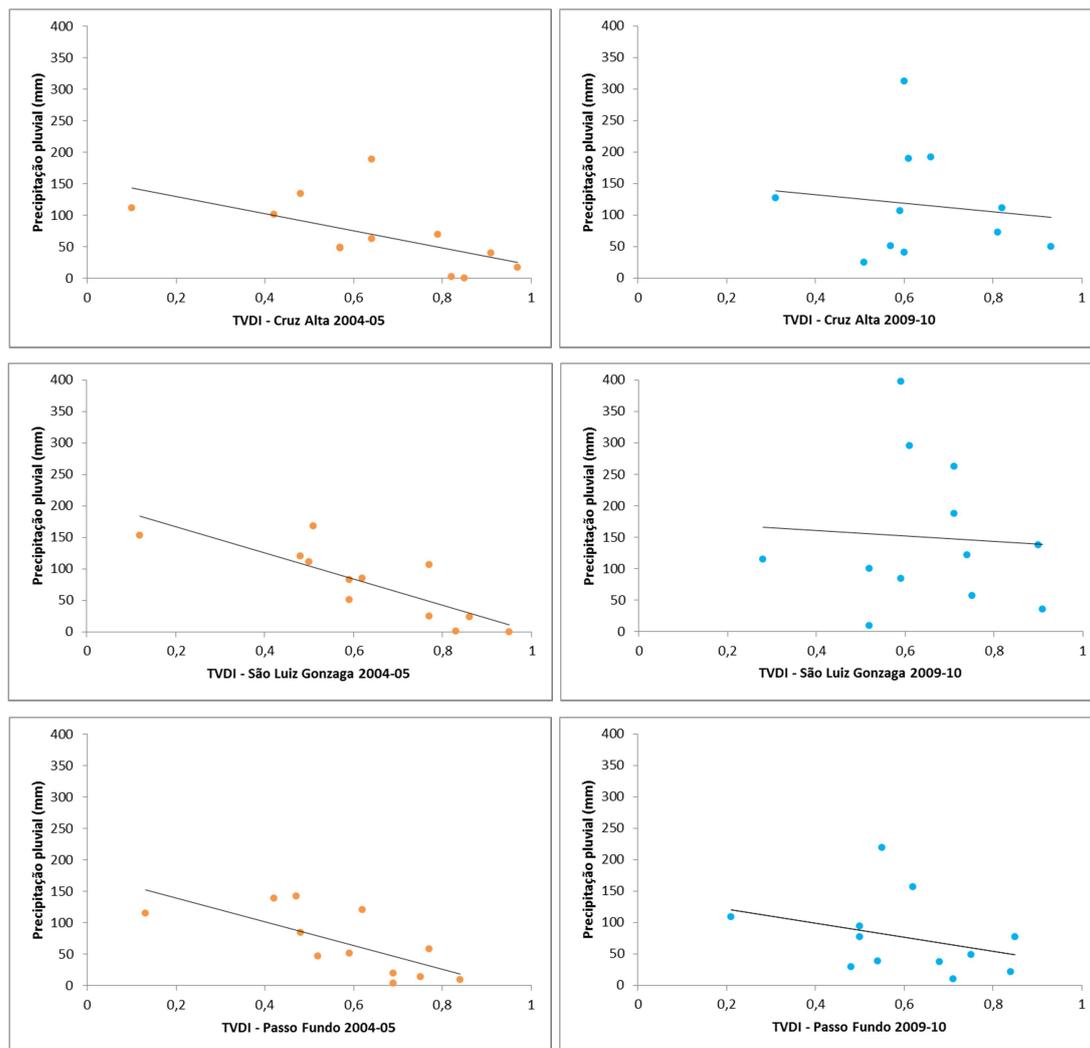


Figura 22. Dispersão entre a precipitação pluviual acumulada de 16 dias, obtida nas estações de Cruz Alta, São Luiz Gonzaga e Passo Fundo, e o índice TVDI em áreas de cultivo de soja no noroeste do Rio Grande do Sul. Em laranja os pontos da dispersão para a safra 2004-05 em azul os pontos da dispersão para a safra 2009-10.

4 CONCLUSÕES

A utilização da parametrização do TVDI por cena possibilita a análise das condições hídricas da área de estudo frente aos limites hídricos de cada imagem individualmente, identificando na cena regiões com relativa maior ou menor disponibilidade hídrica.

A aplicação do TVDI com parametrização por safra mostra aptidão para representar o momento e a frequência de ocorrência de eventos de restrições hídricas para a cultura de soja ao longo do tempo.

A variabilidade da precipitação pluvial mostra associação com a distribuição espacial e temporal do índice TVDI. Mas a consistência da mesma depende do enfoque utilizado na parametrização do índice, assim como, da condição hídrica da safra.

A parametrização ajustada por safra do TVDI mostrou maior aptidão para diferenciar as magnitudes dos eventos de estresse em anos com diferentes rendimentos, indicando a possibilidade de utilização do TVDI em modelos de estimativa de rendimento.

REFERENCIAS

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C.; GONÇALVES, H. M. Relação entre o rendimento de grãos de soja e variáveis meteorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 5, p. 695-702, 1992.

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. **El Niño e La Niña**: Impactos no clima, na vegetação e na agricultura o Rio Grande do Sul: Aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre. Editora UFRGS, 2003.110 p.

CUNHA, G.R. et al. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 446-459, 2001.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **[Novidades da Agência]**. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>> Acesso em: 06 jan. 2015.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. 21 p. (Special Report 80)

GAO, Z.; GAO, W.; CHANG, N. Integrating temperature vegetation dryness index (TVDI) and regional water stress index (RWSI) for drought assessment with the aid of LANDSAT TM/ETM+ images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v.13, n. 3, p. 495-503, 2011.

GARCIA, M. et al. Accuracy of the Temperature-Vegetation Dryness Index using MODIS under water-limited vs. energy-limited evapotranspiration conditions. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 149, p. 100-117, 2014.

GOWARD, S.N.; XUE, Y.; CZAJKOWSKI, K.P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements. An exploration with the simplified simple biosphere model. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 79, n. 3-3, p. 225-24, 2002.

HOLZMAN, M.E.; RIVAS, R.; PICCOLO, M.C. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index.

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Enschede, v. 28, p.181-192, 2014.

HUETE, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Base de dados cartográfica**. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/malhas_digitais/municipio_2010/> Acesso em: 20 set. 2014.

KÖPPEN, W. **Climatologia**. Cidade do México: Fondo de Cultura Economica. 1948. 71 p.

KUSTAS, W.P. et al. Effects of remote sensing pixel resolution on model edenergy flux variability of croplands in Iowa. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 92, n. 4, p. 535-547, 2004.

LIANG, L. et al. Drought Change Trend Using MODIS TVDI and Its Relationship with Climate Factors in China from 2001 to 2010. **Journal of Integrative Agriculture**, Beijing, v.13, n. 7, p. 1501-1508, 2014.

LP DAAC - Land Processes Distributed Active Archive Center. **[Banco de dados]** Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov>> Acesso em: 20 set. 2014.

MATZENAUER, R. et al. Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 1, n. 2, p. 225-241, 1995.

MATZENAUER, R. et al. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAGRO, 2002. (Boletim FEPAGRO, n. 10)

PRICE, J.C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 28, n. 5, p. 940-948, 1990.

SANDHOLT, I.; RASMUSEN, K.; ANDERSEN, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. **Remote Sensing of Enviroment**, New York, v. 79, n. 2-3, p. 213-224. 2002.

ROERINK, G. J.; Su, B.; MENENTI, M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B, Hydrology, Oceans and Atmosphere**, Oxford, v. 25, n. 2, p. 147-157, 2000.

RISSO, J. et al. Índices de vegetação Modis aplicados na discriminação de áreas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.9, p.1317-1326. 2012.

SIDRA [Banco de Dados]. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>> Acesso em: 20 set. 2014

WAN, Z. New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.112, n. 1, p. 59-74. 2008.

WANG, K.; LI, Z.; CRIBB, M. Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: A new method to determine the Priestley-Taylor parameter. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 102, n. 3-4, p. 293-305. 2006.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O índice TVDI é eficiente em caracterizar espacial e temporalmente a condição hídrica considerando o clima e o manejo predominantes nas áreas cultivadas com a cultura da soja no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. O método de cálculo do TVDI é de fácil implementação, não necessita processamentos complexos e utiliza os produtos MODIS TS e NDVI, de acesso livre e gratuito.

A dispersão entre os dados de temperatura da superfície (TS) e do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) assume forma de um triângulo (triângulo evaporativo), cujos parâmetros, utilizados no cálculo do TVDI, estão associados à condição hídrica da região.

O TVDI, entretanto, dado que é baseado no triângulo evaporativo necessita de normalização dos limites úmido e seco, a qual pode ser aplicada a uma cena individualmente ou para períodos maiores, como uma safra, o que gera informações distintas.

A parametrização do TVDI por cena possibilita a análise das condições hídricas frente aos limites hídricos da imagem, evidenciando na região monitorada as áreas de ocorrência de restrição hídrica. É complexa a comparação direta dos valores do TVDI entre cenas, podendo neste enfoque ser utilizada para análise da condição hídrica evolução no tempo os parâmetros "b" e TSmin utilizados no cálculo do índice.

Já os resultados da parametrização do TVDI por safra mostram a aptidão do mesmo em representar o momento e a frequência de ocorrência de eventos de limitação hídrica da cultura de soja no Rio Grande do Sul. Este é o enfoque mais conveniente para fins de monitoramento e previsão de safras.

A variabilidade do regime de precipitação pluvial mostra associação com a distribuição espacial e temporal do índice TVDI. Mas a consistência da mesma depende do enfoque utilizado na parametrização do índice, assim como, da condição hídrica da safra.

A parametrização ajustada por safra do TVDI mostrou maior aptidão para diferenciar as magnitudes dos eventos de estresse em anos com diferentes rendimentos, indicando a possibilidade de utilização do TVDI em modelos de estimativa de rendimento.