



AGRICULTURA DE PRECISÃO

Resultados de um Novo Olhar

Alberto Carlos de Campos Bernardi
João de Mendonça Naime
Álvaro Vilela de Resende
Luís Henrique Basso
Ricardo Yassushi Inamasu
(editores)

Embrapa

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Instrumentação

Rua XV de Novembro, 1452 – Caixa Postal 741

CEP 13560-970 - São Carlos - SP

Fone: (16) 2107-2800 – Fax: (16) 2107-2902

www.embrapa.br

www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente

João de Mendonça Naime

Membros

Cinthia Cabral da Costa

Elaine Cristina Paris

Maria Alice Martins

Cristiane Sanchez Farinas

Valéria de Fátima Cardoso

Membro suplente

Paulo Renato Orlandi Lasso

**Normalização bibliográfica, Projeto gráfico,
Capa, Editoração eletrônica, Tratamento das ilustrações**
Editora Cubo

Foto da Capa

Ricardo Yassushi Inamasu

Impressão e Acabamento

RB Gráfica Digital Eirelli

1ª edição

1ª impressão (2014): 1.000 exemplares

2ª impressão (2014): 1.000 exemplares

As opiniões, conceitos, afirmações e conteúdo desta publicação são de exclusiva e de inteira responsabilidade dos autores, não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), vinculada ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados internacionais de catalogação na publicação - CIP
Embrapa Instrumentação

A278 Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. / Alberto Carlos de Campos Bernardi, [et al.], editores técnicos. – Brasília, DF : Embrapa, 2014.
596 p. ; II. color. ; 21 cm x 29,7 cm.

ISBN 978-85-7035-352-8

1. Agricultura de precisão. 2. Instrumentação. 3. Automação Agropecuária.
4. Inovação. 5. Culturas. 6. Agricultura. I. Bernardi, Alberto Carlos de Campos.
II. Naime, João de Mendonça. III. Resende, Álvaro Vilela de. IV. Bassoi, Luis
Henrique. V. Inamasu, Ricardo Yassushi. VI. Embrapa Instrumentação.

CDD 21 ED 681.763

©Embrapa 2014

Uso de imagens orbitais e suborbitais na caracterização da variabilidade espacial da produtividade**

Ziany Neiva Brandão*¹, Ronaldo Pereira de Oliveira*², Ronei Sandri Sana*³,
Valdinei Sofiatti*⁴, João Henrique Zonta*⁵, José da Cunha Medeiros*⁶

¹DSc. em Recursos Naturais: Sistema Água-Solo-Planta-Atmosfera, Embrapa Algodão. Rua Osvaldo Cruz, 1143, CEP 58.428-095, Campina Grande, PB

²PhD. em Agricultura de Precisão, Embrapa Solos

³MSc. em Agronomia: Ciência do Solo, Assessor Técnico de Planejamento Agrícola, SLC Agrícola, Rua Bernardo Pires, 128 - 4º andar - CEP 90.620-010 - Porto Alegre, RS

⁴DSc. em Agronomia: Fitotecnia, Embrapa Algodão

⁵DSc. em Eng. Agrícola: Recursos Hídricos, Embrapa Algodão

⁶PhD. em Agronomia: Ciência do Solo, Embrapa Algodão

*E-mails: ziany.brandao@embrapa.br, ronaldo.oliveira@embrapa.br, ronei.sana@slcagricola.com.br, valdinei.sofiatti@embrapa.br, joao-henrique.zonta@embrapa.br, jose.medeiros@embrapa.br

**Apoio técnico e financiamento indireto da SLC Agrícola, numa parceria com a Embrapa Algodão dentro do projeto MP-1: Projeto de Agricultura de Precisão da Embrapa

Resumo: Imagens de satélites fornecem dados para gerenciamento de áreas florestadas e culturas com estimativa da produtividade no mundo inteiro. O objetivo desse trabalho foi avaliar a capacidade de índices de vegetação obtidos através de imagens do satélite Landsat-5 e por imagens aéreas de alta resolução na estimativa da produtividade do algodoeiro no cerrado de Goiás. Estimativas do índice de área foliar e medições da altura das plantas também foram realizadas nessas datas. Ao final do mês de abril foram adquiridas imagens aéreas de alta resolução da área de estudo. Índices de vegetação foram obtidos com os dados de refletância das imagens de satélite e aérea. Os resultados mostram que os dados de refletância multiespectral atingiram níveis significativos de precisão na estimativa da produtividade do algodoeiro, onde o MSAVI e o MTVI2 apresentaram os melhores desempenhos. O NDRGI obtido através da imagem aérea de alta resolução não se mostrou apropriado para estimativa da produtividade, mas permitiu a identificação da variabilidade espacial do índice de área foliar no algodoeiro para as duas épocas de avaliação. No estágio mais avançados todos os IVs obtidos por imagens de satélite apresentaram-se como bons estimadores da produtividade, podendo ser usados para identificação de zonas de manejo do algodoeiro no cerrado, desde que se tenha informações sobre o clima e manejo da cultura.

Palavras-chave: fotografias aéreas, imagens de satélite, variabilidade espacial, índices de vegetação

Use of suborbital and orbital images to characterize the spatial variability of crop yield

Abstract: Satellite images provide data for monitoring forested areas and crop cultures estimating their yield worldwide. The purpose of this study was to evaluate the ability of vegetation indices obtained from satellite images Landsat-5 and high-resolution aerial images to estimate cotton yield in the Cerrado of Goiás state. Estimates of leaf area index and height measurements from plants were also held on these dates. At the end of April were acquired high-resolution aerial images of the study area. Vegetation indices were obtained from the reflectance data of satellite images and aerial photographs. The results show that data from multispectral reflectance reached significant levels of accuracy in estimating the cotton yield, where MSAVI and MTVI2 showed the best performance. The NDRGI obtained from high resolution aerial image is not suitable for estimation of productivity, but allowed the identification of the spatial variability of leaf area index in cotton for both evaluation

periods. In advanced phenological stages all IVs from satellite images showed as good estimators of cotton yield, and they can be used for identifying management areas in cotton in the cerrado, since previous information about climate and crop management were provided.

Keywords: aerial photographs, satellite images, spatial variability, vegetation indices

1. Introdução

Nas últimas décadas os avanços nas áreas de engenharia têm facilitado a obtenção de dados para aplicações em sensoriamento remoto voltadas à Agricultura de Precisão (AP), com o fornecimento contínuo de imagens de satélite e o uso de sensores altamente precisos na aerofotogrametria.

Sensores a bordo dos satélites Landsat disponibilizam imagens para o mundo desde a década de 70, onde o mais novo satélite da série foi lançado em 2013. Com revisita a uma mesma área a cada 16 dias, 30 metros de resolução e disponibilização das imagens 12 horas após a passagem do satélite, as imagens espectrais do sensor OLI (Operacional Land Imager) do Landsat-8 são fornecidas em 9 bandas, 8 dessas similares ao seus antecessores (Landsat 5 e 7), e 1 banda adicional (Cirrus, banda 9). Imagens dessa série de satélites são até hoje as mais usadas por pesquisadores, produtores e governos e vêm fornecendo dados para gerenciamento de áreas florestadas, monitoramento de bacias hidrográficas e áreas de degelo, além do uso intensivo no monitoramento de culturas com estimativa da produtividade (UNITED..., 2013).

Pesquisadores em todo o mundo procuram aprimorar as técnicas de tratamento de imagens de satélite de baixa resolução por serem disponibilizadas gratuitamente, fornecerem extensa cobertura e alta resolução temporal. Essa é uma escolha vantajosa para detecção em larga escala da emergência, crescimento, maturidade e senescência das culturas, mas não fornece informações mais detalhadas. A resolução das imagens Landsat permite a estimativa da produtividade, onde os padrões de medição destacam a variabilidade nutricional e do solo (LIU et al., 2006; GITELSON et al., 2012).

Outra alternativa frequentemente utilizada para o monitoramento de culturas em grandes áreas é o uso de imagens aéreas de alta resolução, que podem fornecer dados multiespectrais com resoluções espaciais que variam de menos que 1 m para poucos metros em até 12 bandas estreitas nas

regiões do verde até o infravermelho próximo do espectro eletromagnético (MOTOHKA et al., 2010; YANG; EVERITT, 2012). Imagens multiespectrais são usadas para mapear propriedades do solo, avaliar as condições de crescimento e estimar a produtividade da cultura (PINTER et al., 2003).

Boas relações têm sido observadas entre a produtividade de culturas obtidas em campo e índices espectrais de vegetação (BRANDÃO, 2009; GITELSON et al., 2012). Os mapas de produtividade fornecem um método alternativo para obter a produtividade em grande escala com dados georreferenciados, possibilitando sua comparação com as estimativas obtidas através de índices de vegetação produzidos por câmeras multiespectrais a bordo de aeronaves ou pelo sensor TM (Thematic Mapper) do Landsat (LYLE; LEWIS; OSTENDORF, 2013).

Os índices de vegetação (IVs) são transformações lineares da refletância do dossel, que podem utilizar algumas faixas do espectro eletromagnético relacionadas às características que se quer avaliar. Nesse sentido, possibilitam comparações espaciais e temporais da atividade fotossintética terrestre, facilitando, assim, o monitoramento sazonal, interanual e variações de longo prazo dos parâmetros estruturais, fenológicos e biofísicos da vegetação (THENKABAIL; SMITH; PAUW, 2000). Esses IVs têm sido muito utilizados no monitoramento de áreas vegetadas, na determinação e estimativa do índice de área foliar, biomassa e da radiação fotossinteticamente ativa (BRANDÃO et al., 2008). Os avanços tecnológicos de sensores remotos permitem analisar, através de imagem de satélites, a distribuição espacial de áreas cultivadas e as modificações da cobertura vegetal em séries temporais, possibilitando o monitoramento das áreas vegetadas com um diagnóstico preciso das condições da cultura ou do solo em estudo (HABOUDANE et al., 2004).

Com o rápido desenvolvimento e melhorias nos monitores de colheita, produtores e pesquisadores têm trabalhado com mapas de produtividade obtidos em campo como meio de diagnosticar

a variabilidade do solo e das culturas de uma determinada lavoura (LOUHAICHI; YOUNG; JOHNSON, 2013). O grande número de dados e a boa precisão desses mapas de produtividade têm permitido o planejamento da adubação e correção da acidez do solo para as safras subsequentes, além de fornecer os dados da colheita em andamento.

Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar a capacidade de índices de vegetação obtidos através de imagens do satélite Landsat-5 e por imagens aéreas de alta resolução na estimativa da produtividade do algodoeiro no cerrado de Goiás.

2. Material e Métodos

Esse trabalho foi desenvolvido numa área experimental de 57,6 ha, situada na Fazenda Pamplona, localizada no município de Cristalina, GO, cujas coordenadas centrais são 16°10'16" S, 47°37'47" W. O solo foi classificado como Latossolo vermelho-amarelo e o clima da região é caracterizado como tropical, com estação seca e predominância do tipo Aw, da classificação climática de Köppen. O período chuvoso vai de outubro a março, com pluviometria média anual de 1.446,5mm.

O algodão foi semeado em dezembro de 2011 com espaçamento de 0,76m e 14 plantas m⁻¹, em regime de sequeiro. Os dados diários de temperatura (máxima, média e mínima), umidade

relativa, radiação solar e precipitação pluvial, foram obtidos numa estação meteorológica localizada dentro da fazenda Pamplona, tendo registrado um acumulado de 897mm durante o ciclo da cultura, distribuídos de dezembro de 2010 a maio de 2011.

A adubação nitrogenada foi realizada em quatro épocas (pré-semeadura, semeadura, emergência e aos 45 DAE) totalizando 160 kg ha⁻¹. Todos os nutrientes foram aplicados de maneira uniforme para a área tendo sido seguida a recomendação de adubação da fazenda baseada na análise de solo e na expectativa de produtividade da área.

A escolha das épocas de avaliação levou em conta as datas de passagem de satélites e o estágio fenológico em que as plantas se encontravam. Assim, em 05 de abril foi realizada uma avaliação nutricional do algodoeiro, sendo esta duas semanas antes da primeira imagem adquirida, pois havia se considerado a passagem anterior do Landsat-5. Os dados foram coletados tomando como base uma grade amostral preparada antes da instalação do experimento, contendo 90 pontos espaçados de 80x80m. Os pontos centrais foram previamente marcados e georreferenciados com um GPS 76CSx da Garmim. Para as análises do tecido foliar foram coletadas folhas em 30 plantas aleatórias por ponto da grade amostral, tendo sido colhida a folha da 5ª posição do caule principal, contada a partir do ápice (CARVALHO; FERREIRA, 2006).



Figura 1. Mapas mostrando a área experimental na fazenda Pamplona em Cristalina, estado de Goiás. Imagens aéreas e do sensorTM do satélite Landsat-5 foram adquiridas do local em 2011. Figura: Paulo M. Francisco, colaborador.

Imagens geradas pelo sensor TM (*Thematic Mapper*) do satélite Landsat-5 foram obtidas aos 125 DAE, dia 19-04-2011 e 170 DAE no dia 06-06-2011 com órbita 221 e ponto 071. Cada data representa uma fase fenológica distinta do algodoeiro, com a primeira registrando o início da frutificação plena e a segunda a abertura dos capulhos.

As bandas espectrais do sensor TM do Landsat-5 usadas nesse trabalho correspondem aos canais 2, na faixa de 520-600 nm, a cuja refletância nesse trabalho associamos à denominação de ρ_G , canal 3 operando em 630-690 nm (ρ_R) e 4, 760-900 nm (ρ_{NIR}).

Após a correção do georreferenciamento, foi feita a calibração radiométrica das imagens, e posteriormente avaliada a precisão dos pontos marcados com o GPS Garmim 76CSx. Foram então determinadas as refletâncias nas regiões do visível e infravermelho próximo, que serviram para determinação do Índice de Área Foliar (IAF) e dos Índices de Vegetação (IVs). Os índices de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), MSAVI (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index*), e MTVI2 (*Modified Triangular Vegetation Index*) foram estimados pelas seguintes expressões:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R) \quad \text{Eq. 1}$$

$$SAVI = \left[\frac{(1 + L)(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + \rho_R + L)} \right] \quad \text{Eq. 2}$$

$$MSAVI = \frac{1}{2} \left[\frac{2\rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_R)}}{2} \right] \quad \text{Eq. 3}$$

$$MTVI2 = \frac{1,5 \left[\frac{1,0(\rho_{NIR} - \rho_G) - (-2,5(\rho_R - \rho_G))}{\sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - (6\rho_{NIR} - 5\sqrt{\rho_R}) - 0,5}} \right]}{\sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - (6\rho_{NIR} - 5\sqrt{\rho_R}) - 0,5}} \quad \text{Eq. 4}$$

O fator L é uma função da densidade da vegetação e sua determinação requer um conhecimento prévio das quantidades da vegetação existentes no local (HUETE, 1988).

Ainda na mesma época de avaliação, foram adquiridas imagens aéreas multiespectrais da área experimental, no estágio de frutificação plena do algodoeiro em Cristalina (Figura 2a.). As imagens foram coletadas por câmera multiespectral de alta resolução nas bandas R(red), G(green), e B(blue). Foram obtidas tanto fotografias ortorretificadas com resolução de 0,30m, como também imagens do Índice de Maturidade das plantas (NDRGI - *Normalized difference red green index*), que possibilitou a classificação da imagem obtida em 4 classes, conforme apresentado na Figura 2b.

O NDRGI foi desenvolvido para estimativa do estágio fenológico de culturas e áreas florestadas

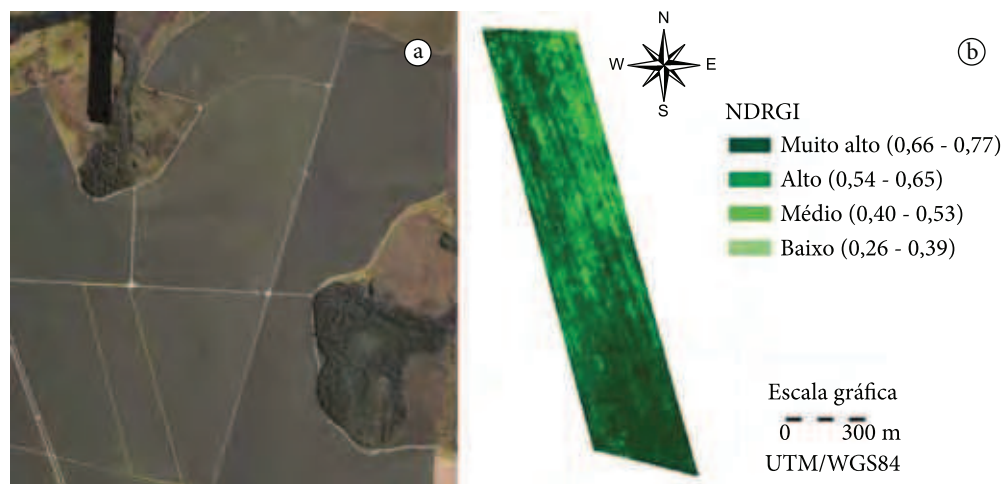


Figura 2. (a) Ortofoto obtida em abril de 2011 com o contorno da área experimental. (b) Mapa classificado do NDRGI obtido da imagem aérea multiespectral aos 125 DAE.

devido a sua sensibilidade aos tons de verde e amarelo. Muito usado para classificação em imagens multiespectrais, esse índice pode também ser chamado de Green NDVI (GRVI) e é dado pela seguinte expressão (MOTOHKA et al., 2010):

$$NDRGI = (\rho_G - \rho_R) / (\rho_G + \rho_R) \quad \text{Eq. 5}$$

Em agosto de 2011 foi realizada a colheita mecanizada do algodão sendo a produção convertida em quilograma por hectare. A colheita mecanizada utilizou a colhedora de algodão modelo John Deere 9996, equipada com o sistema Green Field, composto de sensor de rendimento do tipo fluxo ultrasônico, cartão de armazenamento de dados, e antena receptora de Sistema de Posicionamento Global (GPS) com sinal diferencial, modelo Green Star. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva para verificar possíveis discrepâncias e a normalidade nos dados. Foram determinadas as correlações entre os dados de nitrogênio foliar, produtividade e índices de vegetação obtidos por satélite e por aerofotogrametria. A análise geoestatística foi realizada através da construção e ajuste de semivariogramas e interpolação por krigagem ordinária utilizando o pacote geoestatístico Vesper (WHELAN; McBRATNEY; MINASNY, 2001).

3. Resultados e Discussão

A região onde se encontra a área experimental possui duas estações bem definidas, uma seca que vai de abril a setembro e outra chuvosa, de

outubro a março. A estação chuvosa na safra 2010/2011 estendeu-se até meados de maio com alta concentração de chuvas, chegando a 381,7 mm de março a maio de 2011. Com isso, o algodão aos 125 DAE se encontrava no período de maior NDVI, registrando valores de 0,83 a 0,90, correspondendo ao padrão de maior altura de plantas e maior índice de área foliar (IAF), que foi obtido através de imagem do Landsat de 19 de abril de 2011 (Tabela 1). O mapa classificado do NDRGI, apresentado na Figura 2.b representa o IAF obtido nesse período. Com a alta resolução da ortofoto é possível confirmar a intensidade da cobertura vegetada (Figura 2.a). Nessa época os 2/3 superiores das plantas estavam muito verdes, com maçãs cheias ou em fase de enchimento. Nessa data, as imagens de satélite também registraram os maiores valores do IAF (Figura 3.a), que foram de 1,88 a 3,49 aos 125 DAE, e seu decréscimo com a entrada das plantas em fase de senescência aos 170 DAE, variando de 0,39 a 0,80 (Figura 3.b), podendo ser observados na amplitude dos valores.

A avaliação nutricional que havia sido realizada duas semanas antes da primeira imagem do Landsat-5 revela a grande quantidade de nitrogênio disponível às plantas, que era de 41,0 a 51,7 g kg⁻¹, estando acima do recomendado para essa fase para lavouras de alta produtividade que é 40-45 g kg⁻¹ (YAMADA et al., 1999). Os teores de nutrientes presentes nas folhas refletem as condições de fertilidade dos solos e da adubação a que a cultura foi submetida. O N é um elemento móvel na planta, que tende a se concentrar nos tecidos jovens e a diluir sua concentração com o tempo, devido à estabilização do crescimento

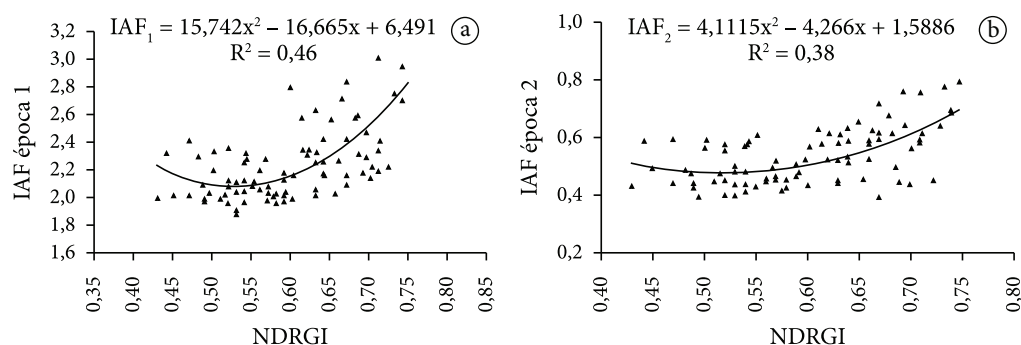


Figura 3. Índice de área foliar (IAF) como função do índice de maturidade (NDRGI) para o algodoeiro. (a) aos 125 DAE e (b) aos 170 DAE.

do tecido, ao aumento de carboidratos e lipídios e, especialmente, por causa da redistribuição para os frutos e partes jovens da planta ainda em crescimento (MARSCHNER, 2005).

As relações entre os índices de vegetação (IVs) obtidos através das imagens Landsat e a produtividade exibem a variabilidade causada pelo conteúdo de clorofila, além da influência das condições atmosféricas e das características estruturais da cultura (Figura 4). De fato, os IVs são desenvolvidos para representarem melhor os tons de verde, mas têm que ser capazes de reduzir os efeitos indesejados de refletância de outros alvos. Brandão (2009) reporta boas correlações entre o nitrogênio foliar e as variáveis biofísicas com os índices de vegetação obtidos pelo Landsat quando avaliados entre o início do florescimento até a frutificação no algodoeiro, mas reduzida capacidade desses IVs na predição da produtividade, uma vez que a presença de frutos e o surgimento de folhas amareladas altera muito a refletância no infravermelho próximo (NIR). Índices como o NDRGI se propõem a melhorar a capacidade de estimativa do estágio fenológico devido ao fato da não utilização da faixa do NIR.

A Tabela 1 apresenta as correlações entre os índices de vegetação obtidos pelos dois métodos, nas duas épocas de avaliação, e a produtividade do algodoeiro. A variabilidade espacial observada através dos IVs representou a produtividade com correlações de moderadas a boas (0,59 a 0,66) durante a frutificação e de boas a alta (0,63 a 0,75) no início da senescência.

Equações de regressão foram obtidas nos dois estádios fenológicos estudados para avaliar a capacidade dos índices de vegetação (IVs) como estimadores da produtividade (Figura 4). Os IVs acompanharam o crescimento

da produtividade nas duas épocas avaliadas, seguindo o modelo linear, tendo coeficientes de correlação apresentados na Tabela 1. Em abril, aos 125 DAE, a nebulosidade na região não permitiu que os IVs apresentassem melhor sua potencialidade como estimador da produtividade com coeficientes de determinação variando de 0,34 a 0,43 (Figura 4a.). Nessa fase o MSAVI apresentou o melhor desempenho, seguido pelo MTVI2, com correlações altamente significantes de 0,66 e 0,62 respectivamente (Tabela 1). O SAVI e o NDVI apresentaram o pior desempenho nessa fase, com correlações de 0,59.

Entretanto, quando a nebulosidade se dispersou já aos 170 DAE esses últimos IVs mostraram bons desempenhos com o NDVI sendo o melhor estimador da produtividade, onde foi observado um $R^2=0,58$ e correlação de Pearson de 0,76 (Figura 4.b). Toullos et al., 2010, em um trabalho testando o NDVI e o SAVI em várias épocas no algodoeiro, encontraram correlações altamente significativas entre o NDVI e a produtividade durante o florescimento do algodoeiro aos 90 DAE ($r=0,72$), com uma pequena redução ao chegar à frutificação plena aos 140 DAE ($r=0,69$), usando imagens com resolução espectral de 20m.

O MSAVI mostrou sua capacidade de redução dos efeitos do solo e melhorou o desempenho com relação à medição anterior, sendo adequado para estimativa da produtividade com $R^2=0,52$, índice de correlação de Pearson de 0,72 e significância a 1% pelo teste t. O MTVI2 manteve uma boa estimativa para a produtividade do algodoeiro, mesmo quando as imagens de satélite sofreram interferências atmosféricas maiores. Embora não tenha se apresentado como o melhor IV na senescência, esse IV mostra sua potencialidade quando há grandes quantidades de folhas em

Tabela 1. Correlações do índice de vegetação (IV) obtido por fotografia aérea (NDRGI) e pelos IVs obtidos através de imagens do sensor TM do satélite Landsat-5 aos 125 e 170 DAE no algodoeiro em Goiás na safra 2011.

	NDRGI	IAF ₁	NDVI ₁	SAVI ₁	MSAVI ₁	MTVI2 ₁	Altura	IAF ₂	NDVI ₂	SAVI ₂	MSAVI ₂	MTVI2 ₂
NDRGI	1	0,58*	0,40**	0,48*	0,48*	0,55*	0,54*	0,54*	0,49*	0,37**	0,45*	0,36**
N _{foliar}	0,05 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,46*	0,40**	0,46*	0,38**	0,14 ^{ns}	0,36**	0,43*	0,48*	0,44*	0,53*
Prod	0,39*	0,64*	0,59*	0,59*	0,66*	0,62*	0,35**	0,63*	0,76*	0,72*	0,72*	0,67*

*, ** significativo a 1% e 5% pelo teste t. ^{ns}não significativo. Subscritos 1 e 2 para as épocas. (a) 1 aos 125 DAE e (b) 2 aos 170 DAE

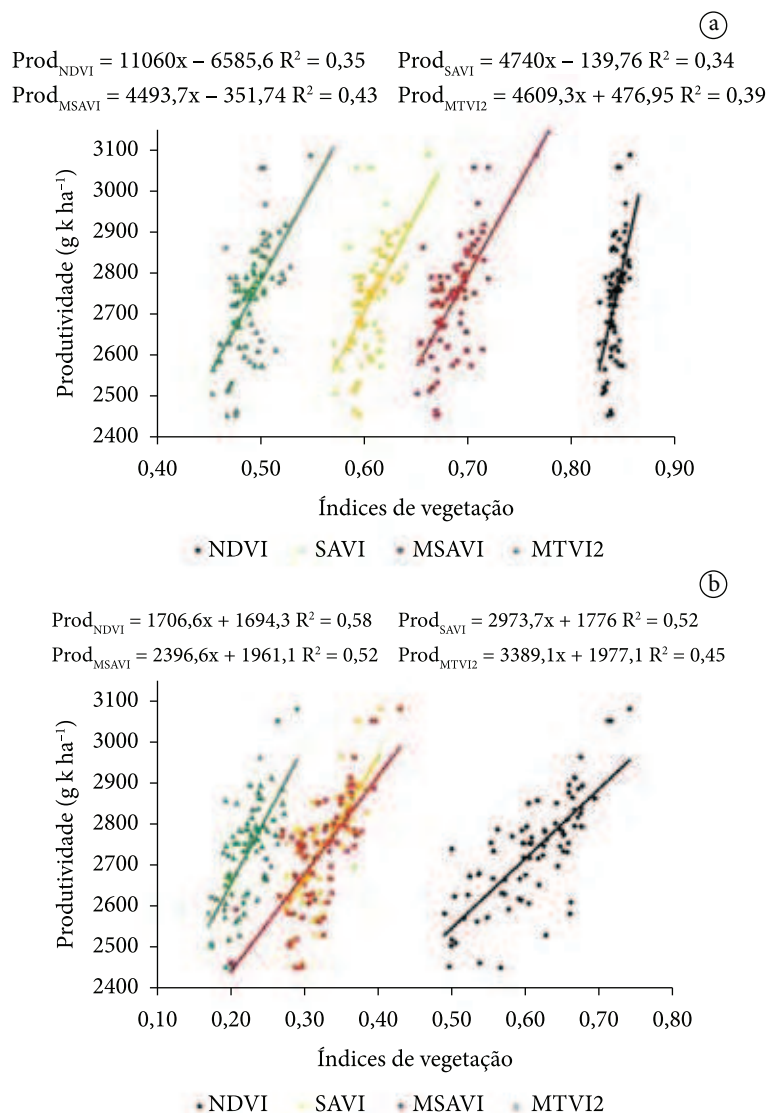


Figura 4. Equações de regressão para produtividade do algodoeiro como função dos índices de vegetação obtidos através das imagens do sensor TM do Landsat-5, em dois estádios fenológicos, para o NDVI, SAVI, MSAVI e MTVI2. (a) aos 125 DAE e (b) aos 170 DAE.

amarelecimento (HABOUDANE et al., 2004). Aos 170 DAE o MTVI2 apresentou correlação de 0,67 com a produtividade. Esse efeito também foi observado por Brandão (2009) num estudo de avaliação do crescimento do algodoeiro irrigado no semiárido, onde obteve correlações de 0,74 e 0,73 entre a produtividade e os IVs MSAVI e MTVI2, respectivamente, no estágio de frutificação e usando imagens do Landsat-5.

Enquanto os IVs obtidos por imagens de satélite apresentaram potencial para estimativa da produtividade, o NDRGI obtido por fotografia aérea de alta resolução mostrou-se um bom preditor das variáveis biofísicas da cultura, em

especial o IAF e a altura de plantas. Embora o voo tenha ocorrido próximo a primeira data da imagem Landsat, o IAF estimado por satélite apresentou boas correlações com o NDRGI nas duas épocas avaliadas (Tabela 1).

Apesar da baixa correlação entre a produtividade e o NDRGI (Tabela 1), a produtividade está bem correlacionada com o índice de área foliar de várias culturas, tendo sido reportadas correlações superiores a 0,85 em diversas pesquisas para o algodoeiro (HABOUDANE et al., 2004; READ; REDDY; JENKINS, 2006; BRANDÃO, 2009). Assim, a possibilidade de predição do IAF da cultura através do NDRGI pode ser

útil na delimitação de zonas de manejo por produtividade, tendo como base os níveis do IAF na área estudada.

Os mapas krigados do NDRGI e da produtividade na área experimental são apresentados na Figura 5 onde podem ser observadas a similaridade da distribuição desse IV com a produtividade.

Os fatores responsáveis pela variabilidade espacial da produtividade incluem a quantidade de água disponível às plantas, topografia, uniformidade na aplicação de fertilizantes, variação genética, propriedades nutricionais do solo, bem como a infestação de pragas e doenças (ZHANG; WANG; WANG, 2002). Todos esses fatores influenciam o arranjo e distribuição das plantas no campo bem como o vigor das mesmas, sendo realçados pelo IAF (ZHAO et al., 2007). Essas características têm sido utilizadas para definição de zonas de manejo e podem ser recuperadas através do NDRGI (MOTOHKA et al., 2010; LYLE; LEWIS; OSTENDORF, 2012). O mais importante é a observação constante da área de produção e delimitação de áreas de manejo considerando as variações observadas ano a ano (DIKER; HEERMANN; BRODAHL, 2004), uma vez que interferências provocadas por manejo ou aplicação de fertilizantes vão alterando as características morfológicas e nutricionais observadas na área estudada.

Os índices de vegetação obtidos por satélite são apropriados para estimativa da produtividade,

desde que se conheçam as condições a que o campo foi submetido, as quantidades de fertilizantes e as condições climáticas e atmosféricas. Gitelson et al. (2012) citam a importância da calibração atmosférica e redução de ruídos nas imagens de satélite, tendo obtido até 20% de melhoria na predição da produtividade após a correção das imagens. Neste trabalho tanto o MSAVI como o MTVI2 se mostraram apropriados para a estimativa da produtividade do algodoeiro, mesmo em estádios mais avançados.

4. Conclusões

Os índices de vegetação obtidos através de imagens do Landsat-5 se mostraram apropriadas para predição da produtividade desde que consideradas e conhecidas as condições a que a cultura foi submetida.

Mesmo considerando que as imagens foram obtidas a partir da frutificação da cultura, para as duas épocas de avaliação o MSAVI se apresentou como o melhor estimador da produtividade do algodoeiro.

O MTVI2 se apresentou estável mesmo quando as condições atmosféricas são adversas mostrando potencial para avaliação do estágio fenológico do algodoeiro.

O NDRGI obtido a partir de imagens aéreas de alta resolução não se mostrou apropriado para estimativa direta da produtividade, mas sim do índice de área foliar, sendo sensível ao vigor e distribuição das plantas em campo.

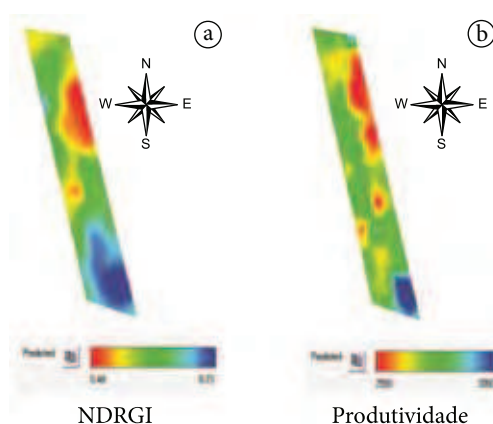


Figura 5. Mapas da krigagem para o (a) NDRGI e (b) Produtividade mecanizada, coletados em plantio comercial do algodoeiro na Fazenda Pamplona, GO, na safra 2011.

Agradecimentos

A Rede de Agricultura de Precisão da Embrapa que nos apoiou e deu suporte aos trabalhos e a SLC Agrícola pela excelente parceria, sem a qual esse trabalho não teria êxito.

Referências

BRANDÃO, Z. N. **Estimativa da produtividade e estado nutricional da cultura do algodão irrigado via técnicas de sensoriamento remoto.** 2009. 152 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais)- Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

- BRANDÃO, Z. N.; BEZERRA M. V. C.; FREIRE E. C.; DA SILVA B. B. Agricultura de precisão para gerenciamento do algodão. In: AZEVÊDO, D. M. P.; BELTRÃO, N. E. M. **O Agronegócio do Algodão no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. cap. 20, v. 2, 1309 p.
- CARVALHO, M. C. S.; FERREIRA, G. B. **Calagem e adubação do algodoeiro no Cerrado**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2006. 16 p. (Embrapa Algodão. Circular Técnica, n. 92). Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/276782/1/CIRTEC92.pdf>>.
- DIKER, K.; HEERMANN, D. F.; BRODAHL, M. K. Frequency analysis of yield for delineating yield response zones. **Precision Agriculture**, v. 5, p. 435-444, 2004. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-004-5318-9>
- GITELSON, A. A.; PENG, Y.; MASEK, J. G.; RUNDQUIST, D. C.; VERMA, S.; SUYKER, A.; BAKER J. M.; HATFIELD, J. L.; MEYERS, T. Remote estimation of crop gross primary production with Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, v. 121, p. 404-414, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.017>
- HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; PATTEY E.; ZARCO-TEJADA P. J.; STRACHAN, I. B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 337-352, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.013>
- HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295-309, 1988. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- JONES JUNIOR, J. B.; WOLF, B.; MILLS, H. A. **Plant analysis handbook: a practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide**. Athens, 1991. 213 p.
- LIU, L.; WANG, J.; BAO, Y.; HUANG, W.; MA, Z.; ZHAO, C. Predicting winter wheat condition, grain yield and protein content using multi-temporal EnviSat-ASAR and Landsat TM satellite images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, p. 737-753, 2006. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160500296867>
- LOUHAICHI, M.; YOUNG, W. C.; JOHNSON, D. E. Reliability of Yield Mapping System for Estimating Perennial Ryegrass Seed Yield. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 7, p. 133-138, 2013.
- LYLE, G.; LEWIS, M.; OSTENDORF, B. Testing the temporal ability of Landsat imagery and precision agriculture technology to provide high resolution historical. **Remote Sensing**, v. 5, p. 1549-1567, 2013. <http://dx.doi.org/10.3390/rs5041549>
- MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of higher plants**. 2nd. ed. Londres: Academic Press, 1995. 889 p.
- MOTOHKA, T.; NASAHARA, K. N.; OGUMA, H.; TSUCHIDA, S. Applicability of Green-Red Vegetation Index for Remote Sensing of Vegetation Phenology. **Remote Sensing**, v. 2, p. 2369-2387, 2010. <http://dx.doi.org/10.3390/rs2102369>
- PINTER, P. J.; HATFIELD, J. L.; SCHEPERS, J. S.; BARNES, E. M.; MORAN, M. S.; DAUGHTRY, C. S. T.; UPCHURCH, D. R. Remote sensing for crop management. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 69, p. 647-664, 2003.
- READ, J. J.; REDDY, K. R.; JENKINS, J. N. Yield and fiber quality of upland cotton as influenced by nitrogen and potassium nutrition. **European Journal Agronomy**, Amsterdam, v. 24, p. 282-290, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2005.10.004>
- THENKABAIL, P. S.; SMITH, B. B.; PAUW, E. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, p. 158-182, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00067-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00067-X)
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. **Landsat 8 - Data product information**. USGS, 2013. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/LDCM_DataProduct.ph>. Acesso em: 30 maio 2013.
- WHELAN, B. M.; McBRATNEY, A. B.; MINASNY, B. Vesper - Spatial Prediction Software for Precision Agriculture. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE - ECPA, 3., Montpellier. **Proceedings...** Montpellier, 2001. p. 139-144.
- YAMADA, T.; MALAVOLTA, E.; MARTINS, O. C.; ZANCANARO, L.; CASALE, H.; BAPTISTA, I. **Teores foliares de nutrientes observados em áreas de alta produtividade**. Piracicaba: Potafos, 1999.
- YANG, C.; EVERITT, J. H. Using spectral distance, spectral angle, and plant abundance derived from hyperspectral imagery to characterize crop yield variation. **Precision Agriculture**, v. 13, p. 62-75, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-011-9248-z>
- ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture - a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 36, p. 113-132, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00096-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0)
- ZHAO, D.; HUANG, L.; LI, J.; QI, J. A comparative analysis of broadband and narrowband derived vegetation indices in predicting LAI and CCD of a cotton canopy. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 62, p. 25-33, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.01.003>