

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

DANILO CARVALHO NEVES

**VARIABILIDADE DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO E PRODUTIVIDADE
DO ALGODOEIRO**

CHAPADÃO DO SUL – MS
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

DANILO CARVALHO NEVES

**ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPACIAL NO CULTIVO DE ALGODOEIRO POR
IMAGENS LANDSAT**

Orientador: Prof. Dr. Fábio Henrique Rojo Baio

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Mato
Grosso do Sul, para obtenção do
título de Mestre em Agronomia, área
de concentração: Produção Vegetal.

CHAPADÃO DO SUL – MS
2016



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Câmpus de Chapadão do Sul



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

DISCENTE: Danilo Carvalho Neves

ORIENTADOR (A): Prof. (a) Dr. (a) Fabio Henrique Rojo Baio

**VARIABILIDADE DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO E PRODUTIVIDADE DO
ALGODOEIRO**

Prof.(a) Dr.(a) Presidente Fabio Henrique Rojo Baio

Prof.(a) Dr.(a) Everton da Silva Neiro

Prof.(a) Dr.(a) Rone Batista de Oliveira

Chapadão do Sul, 17 de Março de 2016.

DEDICATÓRIA

*A Deus por estar sempre me abençoando e me amparando nos momentos
difíceis.
A toda minha família.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente ao professor e orientador Dr. Fábio Henrique Rojo Baio pela oportunidade de trabalharmos juntos, orientações e paciência durante todo desenvolvimento deste trabalho.

Ao Ao Grupo Wink pelo suporte e apoio concedido.

Aos professores e funcionários da UFMS-CPCS pelos ensinamentos.

RESUMO

Neves, Danilo Carvalho. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Variabilidade de índice de vegetação e produtividade do algodoeiro.

Professor Orientador: Prof. Dr. Fábio Henrique Rojo Baio.

A produtividade das culturas é resultante de uma combinação de fatores existentes no ambiente que afetam o crescimento das plantas. Pesquisas em sensoriamento remoto têm gerado vários estudos em escala regional e global para analisar parâmetros de crescimento e produtividade das culturas. O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é associado com parâmetros de crescimento e produtividade do algodoeiro com leituras em vários momentos do ciclo. O objetivo desse estudo foi relacionar a variabilidade espacial do NDVI, atributos químicos do solo e precipitação com a produtividade do algodoeiro ao longo de nove safras. O estudo foi desenvolvido com análise de 101 campos de produção localizados na região central do Brasil. Em cada talhão obteve-se a produtividade média, calculou-se o NDVI e o coeficiente de variação do NDVI (CV-NDVI); amostragem de solo, dados de precipitação em estação automática. As médias anuais do NDVI e produtividade apresentaram correlação significativa. O CV-NDVI teve correlação negativa, com queda na produtividade em $-58,1 \text{ kg ha}^{-1}$ ao aumentar 1 ponto percentual. Maior acumulado de precipitação no início do ciclo teve impacto negativo sobre a produtividade do algodoeiro. O maior valor médio do teor de Al, saturação por alumínio e acidez potencial (H+Al) aumentaram a variabilidade espacial no crescimento de plantas de algodão. O CV-NDVI explicou melhor diferenças na produtividade dos talhões que o NDVI médio.

PALAVRAS-CHAVE: NDVI; imagens orbitais; coeficiente de variação.

ABSTRACT

Neves, Danilo Carvalho. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Study of spatial variability in cotton cultivation by Landsat images

Author: Danilo Carvalho Neves.

Adviser: Prof. Dr. Fábio Henrique Rojo Baio.

The crop yield is the result of a combination of existing environmental factors affecting plant growth. Remote sensing studies has generated several cases on regional and global scale to study growth parameters and crop yield. The NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) is associated with growth parameters and cotton yield with readings at various times of the crop cycle. The aim of this study was to correlate spatial variability of NDVI, chemical soil properties and rainfall over nine cotton yield years. The study was developed with analysis of 101 production fields located in central Brazil. In each field was obtained average yield, NDVI and the CV (coefficient of variation) of the NDVI; soil sampling, precipitation data obtained by automatic station. The annual average NDVI and yield was significantly correlated. The coefficient of variation had a negative correlation, with descending -58.1 kg ha^{-1} to increase by 1%. The highest rainfall at the beginning of the crop cycle provided the negative impact over the cotton yield. The highest average value of Al content, aluminum saturation and potential acidity (H + Al) promoted variability in the growth of cotton plants. The coefficient of variation explained better the variability of productivity plots the average NDVI.

KEYWORDS: NDVI; vegetation index; coefficient of variation

SUMÁRIO

Introdução	8
Revisão de Literatura	10
Sensoriamento Remoto	10
Índices Espectrais nos Cultivos Agrícolas	12
Referência Bibliográfica	15
Capítulo 1 - Produtividade e variabilidade relativa do ndvi obtido por imagens landsat no cultivo de algodoeiro	18
Resumo	18
Introdução	18
Material e Métodos	20
Resultados e Discussão	23
Conclusão	29
Referência Bibliográfica	30
Capítulo 2 - Efeito de atributos químicos do solo e precipitação na variabilidade do ndvi e produtividade do algodoeiro	35
Introdução	36
Material e Métodos	38
Resultados e Discussão	42
Conclusão	54
Referencia Bibliográfica	54

INTRODUÇÃO

A produtividade das culturas é resultante de uma combinação de fatores existentes no ambiente que afetam o crescimento das plantas. O potencial de produtividade é associado às condições específicas de solo e clima de cada local. Essa por sua vez, sofrem alterações com o tempo, dada à dinâmica de mudanças das variáveis climáticas e a fenologia da cultura (ZENG et al., 2014).

Ferramentas de sensoriamento remoto são capazes de avaliar e descrever as interações do ambiente sobre o crescimento vegetal (OLLIGER 2011). Desde a disponibilização das imagens de satélites, têm-se gerado grande número de estudos regionais e globais que caracterizam o tipo de solo, vegetação, grau de conservação e vários parâmetros de crescimento vegetal como índice de área foliar (IAF), produção de biomassa, condição hídrica das plantas, eficiência no uso de recursos como a luz e nutrientes (ZHENG e MOSKAL, 2009; WIENS et al., 2009).

Propriedades como a retenção de água, textura e densidade do solo, teor de nutrientes, capacidade de troca dos cátions e teor de matéria orgânica são frequentemente relacionadas ao crescimento e a produtividade do algodoeiro. A variabilidade espacial dessas propriedades pode explicar a heterogeneidade do crescimento da cultura ao longo do ciclo (LEON et al. 2003; STADLER et al. 2015). Para os autores Vieira et al. (2003) os fatores que afetam o crescimento e a produtividade das culturas depende da espécie analisada e variações interanuais sugerem que as causas da variabilidade mudam com o tempo.

A taxa de crescimento das culturas é altamente variável devido aos processos que operam em várias escalas temporais e espaciais (LI et al. 2001; GUO et al., 2012; MUÑOZ et al., 2014). Koo e Cindy (2015) citam que o modo como as precipitações são distribuídas durante o ciclo em escala diária impacta na produtividade final das culturas e pode explicar as variações anuais entre as diferentes safras. Esses autores notaram que há uma grande variação da produtividade para precipitações de chuva semelhantes. O coeficiente de variação pode ser uma medida da variabilidade no regime hídrico de cada local e comparar diferenças regionais (JONES et al. 2003).

Hu e Mo (2011) relatam que modelos de crescimento podem simular a produtividade das culturas em diferentes situações de ambiente e de manejo. Entretanto, há grandes desafios para mensurar a variabilidade espacial e temporal, devido à incerteza da distribuição espacial de variáveis como precipitação, solo, irrigação, fertilização, manejo e suas interações. Stadler et al. (2015) ressaltam que a heterogeneidade espacial nos campos de cultivos agrícolas é raramente quantificada, mas é essencial para a estimativa da produtividade e a otimização de práticas de manejo.

Campos com maior uniformidade no crescimento das plantas tendem a produzir mais que campos com maior heterogeneidade. Com o propósito de verificar o efeito da variabilidade espacial dos talhões na produção de fibra, esse trabalho teve como objetivo relacionar a precipitação, propriedades químicas do solo com a variabilidade do crescimento a produtividade do algodoeiro ao longo de nove safras.

REVISÃO DE LITERATURA

Sensoriamento Remoto

A ciência do sensoriamento remoto envolve a obtenção de informações sobre determinado alvo, por meio da análise de dados coletados por sensores em plataformas terrestres, aéreas ou instalados em satélites (NOVO, 2010). O modo como as plantas interagem com a radiação solar é a base para inferir nas condições da vegetação através das informações de reflectância, em certos comprimentos de ondas específicos (OLLIGER, 2011).

A reflectância de uma vegetação é afetada pela composição química da planta, condição hídrica, arquitetura no nível de dossel, dado pelo arranjo e densidade de folhas, flores e ramos, e em nível de cobertura do solo (BOYDELL et al., 2002). Os dados espectrais da geração atual de satélites de observação da terra têm limitações em fornecer informações acuradas sobre estimativa de características biofísicas de culturas agrícolas ou vegetação natural. Outros alvos como solo também são difíceis de caracterizar por meio desses sensores dados devido à complexidade dos ambientes, com vários fatores que assumem diferentes assinaturas espectrais (CLAVERIE et al., 2015).

A composição ideal de cena é aquela que contém somente a vegetação alvo cobrindo completamente o solo, antes de haver saturação de biomassa pelo sensor. Associada à radiação solar uniforme e condições atmosféricas limpas. Entretanto, essas condições ocorrem com pouca frequência e as cenas contêm vários componentes que aumentam a complexidade do uso da reflectância espectral dos dosséis para obter informações oportunas para o manejo das culturas (WANJURA et al. 2003).

Medidas de reflectância do dossel vêm tomando importância para o manejo e estimativas da produtividade em grandes áreas. Leon et al. (2003) ressaltam que técnicas de sensoriamento remoto têm capacidade de distinguir vários parâmetros do cultivo de algodão durante o ciclo, com potencial de direcionar amostragem e auxiliar no manejo da cultura.

O “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) é um índice de vegetação bastante utilizado em pesquisas com uso de imagens multiespectrais e sensores, tendo sua representação gráfica descrita em

diversos trabalhos (WANT et al., 2012; SALVADOR, 2005). O calculo do NDVI é mostrado na Equação 1.

$$NDVI = \frac{I_{ver}-Ver}{I_{ver}+Ver} \quad \text{Equação 1}$$

onde:

NDVI = Índice de Vegetação com Diferença Normalizada, adimensional.

Assume valores de -1 a +1;

I_{ver} = refletância no comprimento de onda na faixa do Infravermelho próximo

Ver = reflectância no comprimento de onda na faixa do vermelho.

O NDVI é uma forma simples e rápida de identificação das áreas vegetadas, desenvolvido no inicio da década de 70. Continua a ser o mais conhecido e utilizado para estudar vegetação por sensoriamento remoto multiespectral. Recentemente, têm-se desenvolvido uma série de novos índices de vegetação em alternativa ao NDVI. Embora esse índice ainda apresenta bom desempenho para estimativa de parâmetros das culturas em relação aos novos índices (YANG e EVERITT, 2012).

O conceito básico por detrás do NDVI baseia-se no fato de que a energia refletida no vermelho e infravermelho próximo é diretamente relacionada à atividade fotossintética da vegetação. Os índices baseados em vermelho e infravermelho são conhecidos por uma forte correlação com as características das culturas, e suas principais bandas espectrais são localizadas na faixa de 650 – 700 nm, correspondente ao vermelho, e na faixa de 800 a 940 nm, na região do infravermelho (OLLINGER et al., 2011).

A região do vermelho consiste em comprimento de onda sensível ao conteúdo de clorofila na folha, o infravermelho esta relacionado à quantidade de folha, ou seja, ao índice de área foliar (IAF). Os sensores TM do Landsat 5 utilizados para cálculo do NDVI possui a leitura média da informação espectral na largura do pixel de 30 m (THENKABAIL et al. 2000).

A emergência de folhas verdes sobre o solo causa redução da refletância na banda do vermelho devido à absorção dessa energia luminosa pela clorofila. No geral, o infravermelho aumenta como resultado da estrutura do mesófilo foliar. A sensibilidade do NDVI com a vegetação é linear para

valores baixos de IAF, mas com o aumento da massa de folhas, o NDVI incrementa pouco com aumento do IAF (GUTIERREZ et al. 2012).

Outra opção de mensurar a reflectância da vegetação é pelo uso de sensores óticos ou ultrassônicos de vegetação. Durante as últimas décadas, a tecnologia de sensores foi aprimorada para medir o índice de vegetação e de sensores ultrassônicos para medir altura de plantas em culturas agrícolas (ZHOU e YIN 2014). Esses sensores atuam de maneira não destrutiva e com alta resolução espacial, tendo uso incrementado com o objetivo de obter informações acerca do crescimento das plantas, para aumento da eficiência no uso de fertilizantes, principalmente nitrogênio, e em última escala, o aumento da produtividade.

Índices espectrais nos cultivos agrícolas

Nos ambientes agrícolas informações relativas ao estresse nos dosséis das culturas causado por plantas daninhas, excesso ou falta de água, nitrogênio e ataque de pragas ou doenças, podem ser estimados pelo uso do sensoriamento remoto. Todavia, há necessidade de adequação e modelagem dos dados para estimativas e interpretações mais precisas. Um dos motivos da imprecisão dos dados é relativo às resoluções espacial e espectral das bandas dos satélites (VENTEIS et al., 2015).

Em diversas culturas os índices espectrais têm maior correlação com o IAF e a biomassa. As relações desses índices com a altura de planta, produtividade e cobertura do solo apresentam valores de coeficiente de correlação menores em comparação com o IAF (GUTIERREZ et al., 2012). A habilidade do índice de vegetação em detectar diferentes densidades do dossel, seja pela variação da biomassa ou do IAF, durante o crescimento do algodoeiro teve importantes implicações na estimativa de produtividade. Zarco-Tejada et al. (2005) concluíram que a relação temporal e espacial entre a produtividade de algodão e índice de refletância depende do momento de aquisição dos dados.

Iqbal et al. (2013) ressaltam que a correlação é menor entre índices espectrais e a biomassa em estádios fenológicos mais precoces, provavelmente devido à insuficiente quantidade de massa vegetal e IAF, para a adequada representação da atividade fotossintética das plantas do algodoeiro.

Zhao et al. (2007) ressaltaram que o rendimento de fibra é linearmente correlacionado com o NDVI, em qualquer período do ciclo após a emissão do botão floral, e essa correlação se apresenta maior quando a aquisição dos dados é no início do florescimento

Modelos temporais de reflectância de algodão foram relacionados ao crescimento de planta em vários estádios. Com possibilidade de uso para manejo de nitrogênio e água, contemplando variações temporais e espaciais da reflectância de planta e índice de vegetação. Entretanto, a dificuldade é pontuada no fato da complexidade dos dados espectrais das culturas serem afetados por diferenças de solo e variáveis fenológica das plantas. Além do efeito da geometria de aquisição da folha, estrutura do dossel, condições atmosféricas e do substrato (PLANT et al., 2000; MARTIN et al., 2012).

Em estudo conduzido por Jones et al. (2015) observaram diferenças significativas de NDVI obtido por sensor ótico ativo em função da classe de solo, orientação do sensor, tipo de palhada e teor de umidade do solo. Valores de NDVI foram maiores em solo úmido do que seco, resultando em variações desse índice não atribuídas ao dossel das plantas. A umidade do solo pode variar ao longo do talhão, seja pelo fluxo de água em relação à topografia ou diferença em precipitações ao longo de extensas áreas de cultivo.

Gutierrez et al. (2012) em estudo comparativo de diferentes índices de vegetação, observaram que o NDVI obteve menor correlação, quando comparado à outros índices, como RVI ("red vegetation index"), NIR ("near infrared") e SR ("Simple Ratio"). Segundo os autores, o NDVI saturou antes dos três índices, quando a biomassa do algodoeiro aumentou no início da fase de frutificação. A saturação do NDVI frente às grandes quantidades de biomassa é evidente devido à pequena mudança no valor do índice em relação ao incremento de biomassa

Outros usos do índice de vegetação podem ser ilustrados, como informações para modelos de crescimento de cultivos na estimativa do potencial e a variabilidade da produtividade da cultura (THORP et al., 2015). Diversos parâmetros podem ser mensurados relacionados ao crescimento vegetal e propriedades do solo, sendo possível mensurar a variabilidade temporal e espacial. Esses estudos têm relacionado parâmetros de

crescimento, nutricionais, fisiológicos, hídricos, produtividade e a qualidade dos produtos colhidos (YANG e EVERITT 2012; VENTERIS et al. 2015).

O cultivo do algodoeiro em grandes áreas apresenta variabilidade espacial na fertilidade do solo (SHANWAD et al. 2014). Essa heterogeneidade no crescimento do algodoeiro leva à dificuldade no manejo da cultura entre os talhões. Práticas como irrigação, adubação e aplicação de regulador de crescimento podem ter eficiência comprometida em talhões desuniformes, com aplicação de doses inadequadas de insumos para a demanda local. Wanruja et al. (2003) citam que a uniformidade espacial desde o estabelecimento do estande de plantas é fundamental para elevadas produtividades de algodão.

Efeito de fatores que influenciam a variabilidade espacial e temporal da produtividade das culturas é usualmente expresso nos parâmetros de crescimento. A biomassa, IAF e outras medidas biofísicas de plantas e solo podem ser utilizadas como referencia para tal propósito (STADLER et al., 2015). Consequentemente, monitorar o crescimento das culturas pode levar a uma base de informações para o manejo de sitio específico visando maiores produtividades ou melhoria da eficiência na utilização de insumos (MACHADO et al., 2002).

Na cultura do algodoeiro, variáveis relacionadas à retenção de água, principalmente a textura e a disponibilidade de nutrientes são fatores primários afetando a variabilidade espacial da produtividade (MALLARINO et al. 199). Li et al. (2001) relatam que o teor de nitrato e conteúdo de água no solo antes de semeadura pode ser importantes fatores da variabilidade no crescimento ou nas respostas à fertilização com nitrogênio na cultura do algodoeiro.

Gou et al. (2012) em estudo com cinco anos, observaram substancial variabilidade espacial e temporal na produtividade do algodoeiro. A produtividade média nesse período variou entre 253 a 1.508 kg ha⁻¹. Os anos com maior produtividade (1.363 kg ha⁻¹) foram os que mostraram menor variabilidade na produtividade indicada pelo coeficiente de variação (CV). Esses autores verificaram que condições que favoreçam o crescimento uniforme do algodoeiro são mais favoráveis a obtenção de maiores produtividades.

Brooker et al. (2015) demonstram que parâmetros de solo, do crescimento do algodoeiro e da exigência da cultura em diferentes condições

climáticas, podem ser modelados em escala temporal e espacial, possibilitando o seu emprego em práticas de manejo. Machado et al. (2002) ressaltam que a agricultura de precisão é uma importante estratégia para tal necessidade, de modo a atuar antes e ou durante o ciclo da cultura, pela aplicação em taxa variável de diversos insumos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BOOKER, J. D., LASCANO, R. J., MOLLING, C. C., ZARTMAN, R. E., ACOSTA-MARTÍNEZ, V. Temporal and spatial simulation of production-scale irrigated cotton systems. **Precision Agriculture**, 16(6), 630-653. 2015.

BOYDELL, B., MCBRATNEY, A. B.. Identifying potential within-field management zones from cotton-yield estimates. **Precision Agriculture**, 3(1), 9-23. 2002.

CLAVERIE, M., VERMOTE, E. F., FRANCH, B., MASEK, J. G. Evaluation of the Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ surface reflectance products. **Remote Sensing of Environment**, 169, 390-403. 2015.

GUO, W., MAAS, S. J., BRONSON, K. F. Relationship between cotton yield and soil electrical conductivity, topography, and Landsat imagery. **Precision Agriculture**, 13(6), 678-692. 2012.

GUTIERREZ, M., NORTON, R., THORP, K. R., WANG, G. Association of spectral reflectance indices with plant growth and lint yield in upland cotton. **Crop science**, 52(2), 849-857. 2012.

HU, S., MO, X. . Interpreting spatial heterogeneity of crop yield with a process model and remote sensing. **Ecological Modelling**, 222(14), 2530-2541. 2011.

IQBAL, J., READ, J. J., AND WHISLER, F. D. Using remote sensing and soil physical properties for predicting the spatial distribution of cotton lint yield. **Turkish Journal of Field Crops**, 18(2), 158-165. 2013.

JONES, J. R., FLEMING, C. S., PAVULURI, K., ALLEY, M. M., REITER, M. S., THOMASON, W. E. Influence of soil, crop residue, and sensor orientations on NDVI readings. **Precision Agriculture**, 16(6), 690-704. 2015.

KOO, J. CINDY, C. Effects of rainfall variability on maize yields. In K. Sebastian (Ed.). *Atlas Of African Agriculture Research & Development* (pp. 44-45). Washington , International Food Policy Research Institute. 2015.

LEON, C. T., SHAW, D. R., COX, M. S., ABSHIRE, M. J., WARD, B., WARDLAW III, M. C., WATSON, C. Utility of remote sensing in predicting crop and soil characteristics. **Precision Agriculture**, 4(4), 359-384. 2003.

LI, H., LASCANO, R. J. BARNES, E. M., BOOKER, J., WILSON, L. T., BRONSON, K. F., SEGARRA, E. Multispectral reflectance of cotton related to plant growth, soil water and texture, and site elevation. **Agronomy Journal**, 93(6), 1327-1337. (2001).

MACHADO, S., BYNUM, E. D., ARCHER, T. L., LASCANO, R. J., WILSON, L. T., BORDOVSKY, J., SEGARRA, E., BROSON, K., NESMITH, D. M., XU, W. Spatial and temporal variability of corn growth and grain yield. **Crop Science**, 42(5), 1564-1576. 2002.

MARTIN, D. E., LOPEZ, J. D, JR, LAN, Y. Laboratory evaluation of the GreenSeeker handheld optical sensor to variations in orientation and height above canopy. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, 5(1), 43–47. 2012.

MUÑOZ, J. D., STEIBEL, J. P., SNAPP, S., KRAVCHENKO, A. N. Cover crop effect on corn growth and yield as influenced by topography. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 189, 229-239. 2014.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4.ed., São Paulo: **Edgard**, p.351-357. 2010.

OLLINGER, S. V. Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. **New Phytologist**, 189(2), 375-394. 2011.

PLANT, R.E., D.S. MUNK, B.R. ROBERT, R.L. VARGAS, D.W. RAINS, R.L. TRAVIS, AND R.B. HUTMACHER. Relationships between remotely sensed reflectance data and cotton growth and yield. **Trans. ASAE** 43, 535–546. 2000.

SALVADOR, A., ANTUNIASSI, U.R. Imagens multiespectrais para identificação de zona de manejo e aplicação de taxa variavel em algodão. **Revista Energia na Agricultura**, 26(2), 1-19. 2011.

SHANWAD U. K., RAJESH, N. L, VEERESH, H. CRAIN J. PATIL, HIREMATH, M. B. G. M. PATIL, V. C. KHOSLA, R. Soil heterogeneity at the field scale: a challenge for precision agriculture in India. In: Proceedings of International Symposium New-Dimensions. **Anais Agro-meteorology for Sustainable Agriculture**. October 16-18, 2014. Pantnagar- India. India Council of Agricultural Research. 2014.

STADLER, A., RUDOLPH, S., KUPISCH, M., LANGENSIEPEN, M., VAN DER KRUK, J., EWERT, F. Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements. **European journal of agronomy**, 64, 8-20. 2015.

THENKABAIL, P. S., SMITH, R. B., De PAUW, E. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. **Remote sensing of Environment**, 71(2), 158-182. 2000.

THORP, K. R., HUNSAKER, D. J., FRENCH, A. N., BAUTISTA, E., BRONSON, K. F. Integrating geospatial data and cropping system simulation within a geographic information system to analyze spatial seed cotton yield, water use, and irrigation requirements. **Precision Agriculture**, 16(5), 532-557. 2015.

VENTERIS, E. R., TAGESTAD, J. D., DOWNS, J. L., MURRAY, C. J. Detection of anomalous crop condition and soil variability mapping using a 26 year

Landsat record and the Palmer crop moisture index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 160-170. 2015.

VIEIRA, S. R., PAZ GONZALEZ, A. Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. *Bragantia*, 62(1), 127-138. 2003.

WANG, Y. P., SHEN, Y. Identifying and characterizing yield limiting soil factors with the aid of remote sensing and data mining techniques. *Precision Agriculture*, 16(1), 99-118. 2015.

WANJURA, D. F., UPCHURCH, D. R., MAAS, S. J., WINSLOW, J. C. Spectral detection of emergence in corn and cotton. *Precision Agriculture*, 4(4), 385-399. 2003.

WANT, Y.P.; CHEN, S.H.; CHANG, K.W.; SHEN, Y. Identifying and characterizing yield limiting factors in paddy rice using remote sensing yield maps. *Springer Science*. 2012.

WIENS J. A., STRALBERG D., JONGSOMJIT D., HOWELL C. A., SNYDER M. A. Niches, models, and climate change: assessing the assumptions and uncertainties. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 106: 19729–19736. 2009.

YANG, C., EVERITT, J. H. Using spectral distance, spectral angle and plant abundance derived from hyperspectral imagery to characterize crop yield variation. *Precision agriculture*, 13(1), 62-75. 2012.

ZARCO-TEJADA, P. J., USTIN, S. L., WHITING, M. L. Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agronomy Journal*, 97(3), 641-653. 2005.

ZENG, L., MEREDITH JR, W. R., CAMPBELL, B. T., DEVER, J. K., ZHANG, J., GLASS, K. M., BOURLAND, F. M. Genotype-by-environment interaction effects on lint yield of cotton cultivars across major regions in the US cotton belt. *J. Cotton Sci*, 18, 75-84. 2014.

ZHAO, D., REDDY, K. R., KAKANI, V. G., READ, J. J., A. KOTI, S. Canopy reflectance in cotton for growth assessment and lint yield prediction. *European Journal of Agronomy*, 26(3), 335-344. 2007.

ZHENG, G., MOSKAL, L. M. Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors. *Sensors*, 9(4), 2719-2745. 2009.

ZHOU, G., YIN, X. Relationship of cotton nitrogen and yield with Normalized Difference Vegetation Index and plant height. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 100(2), 147-160. 2014.

CAPITULO 1 - Produtividade e variabilidade relativa do ndvi obtido por imagens Landsat no cultivo de algodoeiro

Resumo

Desde a disponibilização das imagens de satélites, tem-se gerado grande número de estudos regionais e globais para caracterizar a vegetação. Esses estudos têm relacionado parâmetros de crescimento, nutricionais, fisiológicos, hídricos e produtividade das culturas agrícolas ou vegetação nativa. O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é associado com parâmetros de crescimento e produtividade do algodoeiro com leituras em vários momentos do ciclo. O objetivo desse trabalho foi relacionar a variabilidade do NDVI em campos de produção de algodão e a produtividade pelo uso de imagens do satélite Landsat ao longo de nove safras. O estudo foi desenvolvido com análise de 101 campos de produção localizados na região central do Brasil. Foi utilizada uma imagem durante o ciclo da cultura e a produtividade média obtida. A produtividade de fibra variou de 393 a 2.030 kg ha⁻¹ e a correlação com NDVI foi de 0,37. O coeficiente de variação teve correlação negativa, com queda na produtividade em -58,1 kg ha⁻¹ ao aumentar um ponto percentual. O coeficiente de variação explicou melhor a variabilidade da produtividade dos talhões que o NDVI médio.

Palavra-chave: coeficiente de variação · imagem orbital · Índice de Vegetação

Abstract

Since the release of satellite images, it has generated large number of regional and global studies to characterize the vegetation. These studies have relating growth parameters, nutritional, physiological, water, agricultural productivity of native vegetation or crops. The NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) is associated with growth parameters and productivity of cotton with readings at various times of the cycle. The aim of this study was to relate the variability of NDVI vegetation index of cotton production fields and productivity satellite images usage by Landsat over nine seasons. The study was developed with analysis of 101 production fields located in central Brazil. They used images during the crop cycle and the average yield obtained. fiber productivity ranged from 30.2 to 393 kg ha⁻¹ and the correlation of NDVI was 0.37. The coefficient of variation had a negative correlation, with a drop in productivity -58.1 kg ha⁻¹ to increase by 1%. The coefficient of variation explained better the variability of productivity plots the average NDVI.

KEY WORDS: Coefficient of variation; Satellite image; Vegetation Index

INTRODUÇÃO

A utilização de técnicas que melhoram a eficiência na aplicação de insumos pode aumentar a produtividade de importantes cultivos agrícolas, como algodão, arroz, milho, soja, trigo e sorgo. As técnicas desenvolvidas com a agricultura de precisão são ferramentas importantes para esse propósito, de

modo a aumentar a disponibilidade de alimentos e reduzir os impactos ambientais (Walsh et al. 2012).

Ferramentas de sensoriamento remoto são capazes de avaliar e descrever as interações de variáveis do ambiente para o crescimento vegetal (Olliger 2011). Desde a disponibilização das imagens de satélites, têm-se gerado grande número de estudos regionais e globais que caracterizam o tipo de solo, vegetação. Esses fornecem o grau de conservação e vários parâmetros de crescimento vegetal como índice de área foliar (IAF), produção de biomassa, condição hídrica das plantas, eficiência no uso de recursos como a luz e nutrientes (ZHENG e MOSKAL, 2009; WIENS et al., 2009).

O algodoeiro é uma planta perene que vem sendo cultivada como anual. Nesse cultivo o balanço entre crescimento das estruturas vegetativas e reprodutivas é essencial para altas produtividades e um desafio no manejo desta cultura (Brooker et al. 2015). Gutierrez et al. (2012) citam que a produtividade do algodoeiro é relacionada com a quantidade de tecido fotossintetizante, a qual é altamente correlacionada com o IAF e a biomassa. E dois parâmetros de crescimento podem ser estimados por índices de vegetação (Yang e Everitt 2011; Yang et al. 2015).

A correlação entre o índice de vegetação e a produtividade é conhecida em varias culturas. Embora haja necessidade de esclarecer mais detalhes dessa interação, principalmente nas questões temporais e espaciais. Dentre os vários índices de vegetação, o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é amplamente estudado. A relação entre o NDVI e os parâmetros de crescimento e produtividade do algodoeiro é dependente do estágio fenológico no qual a leitura é realizada pelo sensor (Zarco-Tejada et al. 2005).

O estudo de aquisição de dados em diferentes estádios fenologicos sugere que leituras iniciais realizadas são relacionadas ao crescimento das plantas e auxiliam em decisões sobre doses de fertilizantes, regulador de crescimento e irrigação. Para a estimativa da produtividade, o momento da aquisição durante a frutificação é a fase que apresenta maior correlação (Gutierrez et al. 2012).

Venteris et al. (2015) citaram que comparações anuais do NDVI é difícil devido às diferenças na data de aquisição das imagens e a interação com o

estádio de crescimento da cultura. Mostrando restrição em comparações desse índice em diferentes anos.

A taxa de crescimento das culturas é altamente variável devido aos processos que operam em várias escalas temporais e espaciais. A variabilidade é regida pelas interações entre as propriedades do solo, aspectos da paisagem no que tange ao movimento de água, teor dos nutrientes e sedimentos (Li et al. 2001; Guo et al. 2012; Muñoz et al. 2014).

A produtividade das culturas é resultante de uma combinação de fatores existentes no ambiente que afetam o crescimento das plantas. O potencial produtivo é associado às condições específicas de solo e clima, estabelecidos localmente com a planta (Ollinger 2011). Koo e Cindy (2015) notaram que o modo como as precipitações são distribuídas durante o ciclo em escala diária impacta na produtividade final das culturas. Uma medida da variabilidade no regime hídrico de cada local é coeficiente de variação (Jones et al. 2003).

A heterogeneidade espacial nos campos de cultivos agrícolas raramente é quantificada, mas essencial para a estimativa da produtividade e a otimização de práticas de manejo (Stadler et al. 2015). Baio (2015) citam a importância de manejar a variabilidade no crescimento de plantas de algodoeiro pela aplicação de regulador em taxa variável. Com o propósito de verificar o efeito da variabilidade espacial do crescimento do algodoeiro na produção de fibra, esse trabalho teve com objetivo relacionar o NDVI, coeficiente de variação do NDVI e a produtividade média de talhões em diferentes safras.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados desse estudo são oriundos 101 áreas de cultivo de algodoeiro na região central do Brasil. Esses talhões estão localizados na região sudoeste do estado Goiás, no município de Chapadão do Céu e Norte do Estado de Mato Grosso do Sul, no município de Costa Rica. As coordenadas geográficas correspondentes são -18,0 a -19,1° de latitude e -52,4 a -53,6° de longitude.

O Cerrado é o bioma característico da região. O clima é caracterizado de acordo com a classificação Köppen-Geiger como Aw, ou clima tropical com estação seca no inverno. A precipitação média anual é 2.096 mm, distribuída entre Setembro a Abril. A temperatura média anual é de 22,3° C, com média

mensal de 20,1 a 23,5° C. A topografia é predominantemente plana, altitude média de 807 m, variando de 724 a 898 m em relação ao nível do mar.

Na região do estudo, o cultivo do algodoeiro ocorre com a semeadura tipicamente de Dezembro a Janeiro, e colheita de Julho a Agosto do ano seguinte (Anselmo et al. 2015). Desse modo, o ano agrícola refere-se a dois anos do calendário.

Os dados analisados são referentes à produtividade média de algodão de talhões nos anos agrícolas de 2004/05 a 2013/14, com exceção da safra 2005/06 cujas cenas apresentaram nuvens durante o período adequado para aquisição no ciclo da cultura. Foram 11 talhões em cada ano, em 2010, 2011 e 2012 foram analisados 12 talhões devido à disponibilidade de dados. Totalizando 101 casos e área total de 10.848 ha.

Em cada talhão obteve-se a produtividade média de fibra (kg ha^{-1}) obtida a partir do total colhido. Calculou-se o NDVI médio a partir das imagens orbitais Landsat e o coeficiente de variação do NDVI (CV-NDVI) obtido dessas imagens durante o ciclo em cada ano. O CV-NDVI foi calculado pelo desvio padrão dos pixels das imagens de NDVI de cada talhão dividido pela sua média.

As imagens orbitais utilizadas nos diferentes anos são apresentadas na Tabela 1. As características de cada sensor e aplicações de alguns produtos são descritas por Claverie et al. (2015). A partir do ano de 2012, foram utilizadas as imagens do Landsat 7 ETM+ em virtude do encerramento de aquisição pelo Landsat 5. Desde a falha permanente do sensor de correção de linha (SLC) em 2003, cerca de 20% dos pixels do instrumento imageador ETM+ não são escaneados (Zeng et al. 2013).

Tabela 1. Imagens utilizadas para cálculo do NDVI e coeficiente de variação dos talhões de algodão.

Ano	Data	Satélite*
2005	07/04/2005	Landsat 5 TM
2007	27/03/2007	
2008	30/03/2008	
2009	17/04/2009	
2010	20/04/2010	
2011	07/04/2011	
2012	02/04/2012	Landsat 7 ETM+
2013	20/04/2013	
2014	07/04/2014	

*Orbita/ponto: 224/073.

As imagens utilizadas foram selecionadas de modo a não apresentarem nuvem na área do talhão. O momento de aquisição das imagens para a análise foi determinado pelo estágio fenológico da cultura do algodoeiro entre os 80 a 120 dias após emergência. Esse período coincide ao momento de formação da maioria dos frutos viáveis, importante fase na determinação da produtividade. A atividade fisiológica da planta é intensa nessa fase, principalmente pela formação das sementes e fibra (Echer et al. 2014). Zhao et al. (2007) citam que nesse período é o de maior correlação entre o NDVI obtido por imagens orbitais e a produtividade de algodão. Iqbal et al. (2013) concluíram que uma única imagem durante a fase de frutificação é suficiente para estimativa da variabilidade espacial da produtividade de fibra de algodão.

As imagens selecionadas foram obtidas pelo site EarthExplore do USGS (United State Geological Survey). A composição de bandas, reprojeção para o hemisfério sul, georreferenciamento e cálculo do NDVI foram realizados no software ArcMap 10.3 (ESRI, Redlands, CA, USA). As imagens foram georreferenciadas por meio de limites dos talhões analisados. O limite de cada talhão foi obtido pelo contorno do perímetro munido de GNSS modelo Stafire 3000, com correção diferencial John Deere SF 2 (John Deere, Moline, IL, USA).

Para garantir que os valores de cada pixel das imagens de satélite fossem oriundos da refletância do dossel das plantas do algodoeiro, foi construído um buffer pelo deslocamento do limite ao interior do talhão em 30 m. A distância equivale à dimensão do pixel das imagens, de modo que fossem retirados os efeitos de áreas circunvizinhas, como estradas ou porções de talhões não analisados.

Os dados foram analisados por estatística descritiva, análise de correlação linear de Pearson dos dados de NDVI, coeficiente de variação do NDVI (CV-NDVI) e a produtividade média dos talhões de algodoeiro. Foi ajustado o modelo de regressão segmentado entre o CV-NDVI e a produtividade:

$$\text{Produtividade (kg ha}^{-1}\text{)} = \begin{cases} \alpha + (\beta * \text{CV-NDVI}) & \text{se CV-NDVI} < \Phi \\ \alpha + (\beta * \Phi) & \text{se CV-NDVI} \geq \Phi \end{cases} \quad [1]$$

Onde α representa o valor inicial (kg ha⁻¹), β é a taxa de queda na produtividade (kg ha⁻¹), CV-NDVI valor do coeficiente de variação obtido no talhão, Φ correspondente ao valor no qual se atinge o patamar (kg ha⁻¹).

A regressão linear segmentada foi ajustada para produtividade como variável dependente e CV-NDVI como variável independente para encontrar o quanto a variabilidade reduz a produção de algodão e até que valor de CV-NDVI o efeito é significativo. A metodologia utilizada no ajuste do modelo de regressão foi proposta por Ryan e Porth (2007). Nesse modelo de regressão, diferentes retas são ajustadas, com o ponto de mudança da taxa, ou inclinação, em determinado valor da variável independente.

Os autores Peixoto et al. (2011) e Sousa et al. (2015) obtiveram resultados satisfatórios pelo uso desse modelo ao ajustar o coeficiente de variação em relação ao número de repetições em ensaios *in vitro*. O Programa utilizado na análise estatística foi o INFOSTAT 2015e (Universidad Nacional de Cordoba, Cordoba, Argentina).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os 101 talhões analisados ao longo das nove safras obtiveram produtividade de fibra média de 1.281 kg ha⁻¹, variando entre 393 a 2.030 kg ha⁻¹ (Tabela 2). Esses resultados mostram grande variação da produtividade ao longo das safras analisadas. Cerca de um quarto dos talhões obtiveram produtividade inferior a 974 kg ha⁻¹, enquanto que nos 25% superiores, a produtividade foi acima de 1.600 kg ha⁻¹.

Tabela 2. Estatística descritiva dos dados de produtividade de fibra, NDVI e coeficiente de variação do NDVI (CV-NDVI).

Variável	Fibra (kg ha ⁻¹)	NDVI	CV-NDVI (%)
n	101	101,00	101,0
média	1.281	0,58	13,5
mínimo	393	0,34	2,5
máximo	2.030	0,76	48,7

Diversos fatores colaboram para a variação de produtividade do algodoeiro. Lamas (2011) cita importantes fatores para produtividade de algodão na região de cultivo, destacando a adoção de tecnologia e investimento realizados pelo produtor, disponibilidade de novas variedades e biotecnologias e rotação de culturas. Outras variáveis de natureza climáticas experimentadas ao longo do ciclo, também são importantes na definição da produtividade.

O NDVI médio dos talhões de algodão foi de 0,58, com variação de 0,34 a 0,76. Zarco-Tejeda et al. (2005) obtiveram valor médio semelhante de NDVI oriundo de imagens hiperespectrais em época de aquisição semelhante. Brandão et al. (2011) apresentaram variações do valor de NDVI de 0,35 a 0,81 calculados de imagens Landsat no ano de 2007.

O CV-NDVI variou de 2,5 a 48,7%, com média em 13,5%. A consideração do valor do coeficiente de variação depende do tipo de variável analisada. Para produtividade de cultivos agrícolas, valores maiores de 16% podem ser considerados como elevados para a produtividade de soja e 22% para o milho (Carvalho et al. 2003). Brandão et al. (2014) obtiveram coeficiente de variação do NDVI de 3,4 calculado por imagens orbitais em um único talhão de algodão em 2011.

O NDVI apresentou correlação significativa com a produtividade de fibra, r de 0,37 (Fig. 4 A). Zhao et al. (2007) mencionam correlação entre NDVI e produtividade de algodão de 0,54 a 0,76, em dois anos de avaliação. Dalezios et al. (2001) analisaram imagens orbitais em diferentes locais em 3 anos com o objetivo de estimar a produção de algodão em escala regional. Obtiveram correlação de 0,62 entre o NDVI e a produtividade, e concluíram que o grau de correlação entre esses dois fatores dependeu do local e do ano, embora as variações dos valores médios de NDVI refletissem as variações da produtividade regional nas três safras.

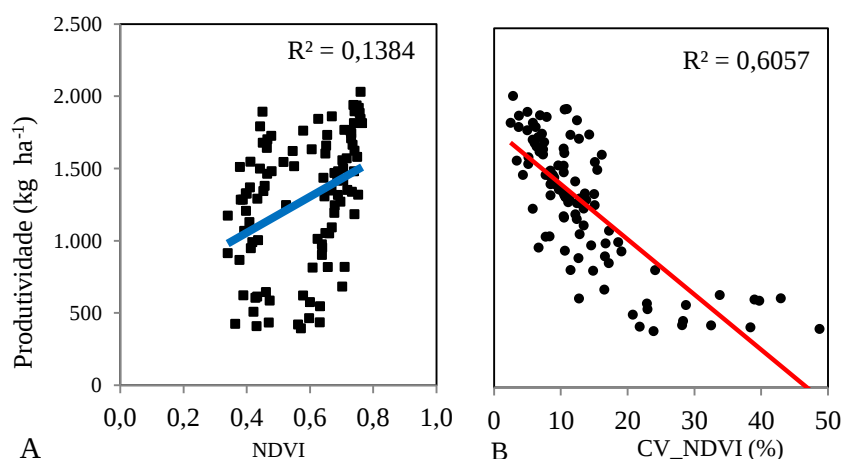


Fig. 1 Corelação linear de Pearson da produtividade do algodoeiro e NDVI (A). Produtividade do algodoeiro e coeficiente do NDVI-CV-NDVI (B).

Brandão et al. (2011) obtiveram boas estimativas de produtividade média de talhões de algodoeiro por meio do NDVI calculado de imagens Landsat 5. Esses autores utilizaram imagens coletadas na mesma fase do ciclo

e região de cultivo com características semelhantes às apresentadas nesse trabalho.

Gutierrez et al. (2012) demonstraram que o uso de índices espectrais de vegetação como o NDVI na estimativa da produtividade pode ter restrições em algumas situações, principalmente quando há desequilíbrio entre o crescimento vegetativo e o reprodutivo. O algodoeiro é uma planta com sistema fotossintético C3, cuja produção de biomassa não apresenta correlação direta com a produtividade, diferentemente ao que ocorre com as plantas C4, como as gramíneas (Thenkaball et al. 2000).

Os valores dos índices de vegetação podem sofrer influencia de outros fatores além dos relacionados com a reflectância do dossel das dos cultivos. Jones et al. (2012) em estudaram o efeito de diferentes solos, orientação do sensor em relação ao alinhamento de plantio, tipo de palhada e teor de umidade do solo no valor do NDVI calculado por um sensor ótico ativo de vegetação. Os autores concluíram que a variação de todos esses fatores induziu em diferenças no valor do índice. As variações levaram a erros da ordem de 15 a 35% sobre o valor calculado do NDVI, essa diferença significa até 500 kg ha⁻¹ na estimativa da produtividade da cultura do milho.

O CV-NDVI apresentou significativa correlação com a produtividade média dos talhões, entretanto, a relação foi negativa, $r -0,78$ (Fig. 2 B). O coeficiente de variação como medida de dispersão relativa pode ser relacionado com a variabilidade espacial no crescimento das plantas de algodoeiro. Zarco-Tejada et al. (2005) demonstraram a heterogeneidade de índices de vegetação durante o ciclo da cultura e a correspondente variabilidade espacial da produtividade.

Na Fig. 2 é possível notar o efeito da variabilidade do NDVI sobre a produtividade média em três anos consecutivos. Em 2009, a produtividade de 1.664 kg ha⁻¹ foi 25% superior à média, o CV-NDVI de 7,3% correspondeu 46% menor que o valor médio. Em 2010 a produtividade foi 473 kg ha⁻¹ e CV-NDVI de 26,9 %, devido ao excesso de chuva no estabelecimento da cultura. Houve severas restrições no crescimento do algodoeiro nos locais de acúmulo de umidade ao longo do talhão. Nesse ano o algodoeiro apresentou maior variabilidade do NDVI e menor produtividade em relação aos anos 2009 e 2011. Guo et al. (2012) também relacionou maior produção de algodão ao

longo de cinco safras quando menor variabilidade espacial da produtividade no talhão analisado indicado pelo coeficiente de variação.

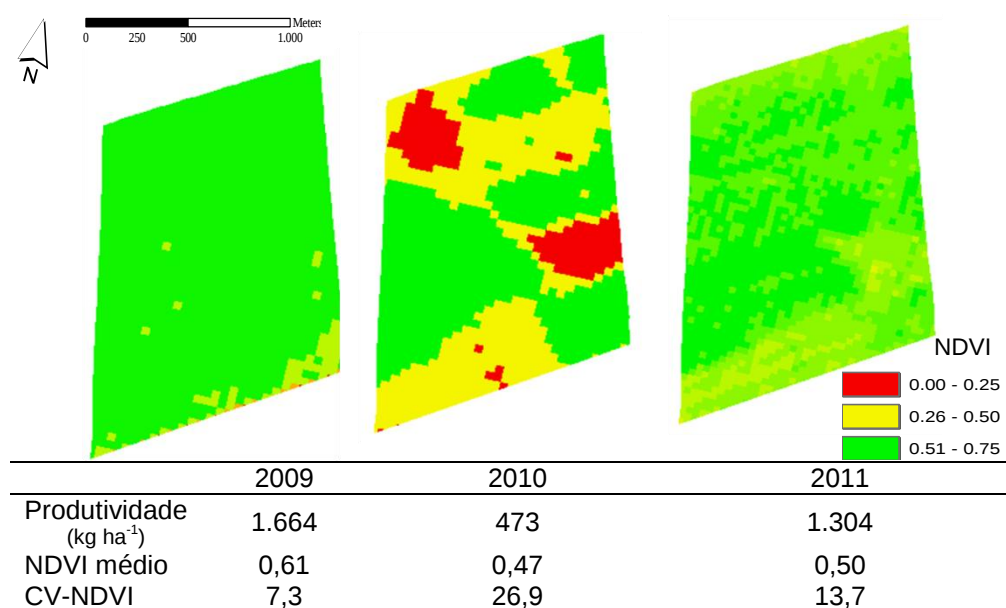


Fig. 2. Produtividade do algodão em fibra, NDVI e coeficiente de variação do NDVI (CV-NDVI) em três anos consecutivos de cultivo em um talhão utilizado como exemplo.

Iqbal et. at. (2013) citam que diferenças em propriedade físicas do solo nos talhões influenciam o crescimento e valor do NDVI da cultura, de modo a provocar variabilidade na produtividade do algodão. Li et al. (2001) relatam que o teor de nitrato e conteúdo de água no solo antes de semeadura pode ser um importante fator da variabilidade do crescimento e na resposta à fertilização. Segundo Mallarino et al. (1999), as variáveis relacionadas à retenção de água, principalmente textura, e disponibilidade de nutrientes foram os fatores primários para a variabilidade espacial da produtividade de algodão. Leon et al. (2003) citam que aspectos da topografia e disponibilidade de nutrientes foram os principais fatores para variabilidade no crescimento e produtividade dentro dos campos de algodão.

O CV-NDVI apresentou maior grau de relacionamento com a produtividade do algodoeiro que valor do NDVI (Fig. 1). Venteris et al. (2015) relataram que análises interanual de dados de NDVI podem ser prejudicadas devido à interferência de vários fatores, dentre os quais destaca a diferença na data de aquisição das imagens e a interação com o estágio de crescimento da cultura. Esses autores propuseram método alternativo de análise para melhorar

estudos interanuais de valores de NDVI. O método consiste no uso de valores transformados com uso da probabilidade acumulativa do marcador normal equivalente do índice para acessar padrões espaciais relativos à condição da cultura.

O efeito do índice CV-NDVI sobre a produtividade média dos talhões de algodoeiro foi modelado e pode ser visualizado na Fig. 4. Os talhões que apresentaram menor índice CV-NDVI, indicando maior uniformidade no crescimento de plantas, obtiveram maiores produtividades.

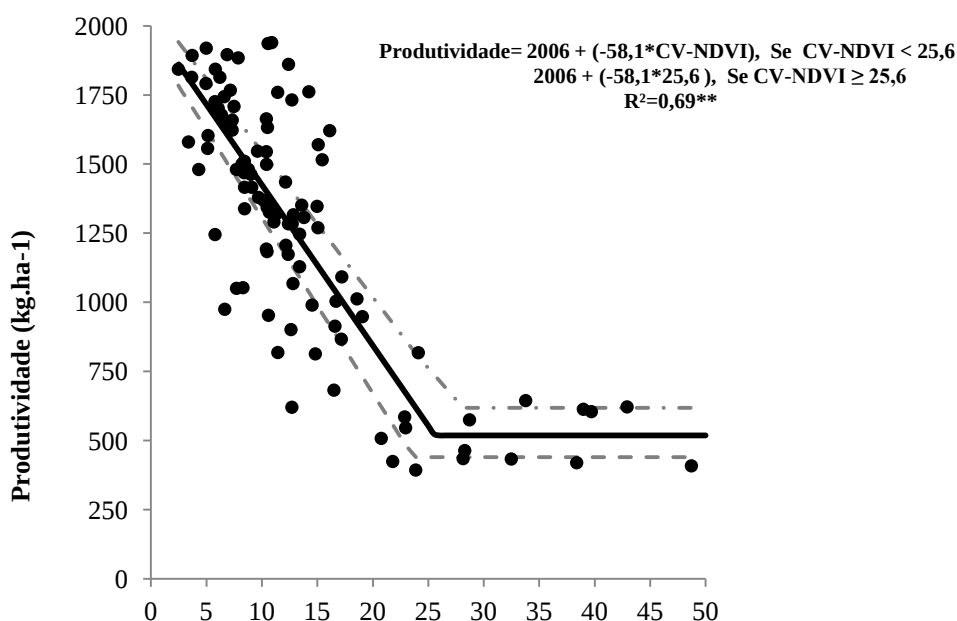


Fig. 3. Relação entre produtividade de fibra de algodão em função do coeficiente de variação do NDVI (CV-NDVI) obtido de imagens Landsat durante o ciclo da cultura em nove safras.

** p valor 0,0001

Linha contínua: modelo linear com patamar ajustado; Linha tracejada: intervalo de confiança de 95%.

Com o aumento do índice CV-NDVI a produtividade do algodoeiro foi reduzida gradualmente à taxa constante até 25,6 %. Após esse valor, a produtividade permaneceu estável mesmo com aumento da variabilidade. Cada ponto percentual no CV-NDVI refletiu em -58,1 kg ha⁻¹ de fibra de algodão. Utilizando a unidade de comercialização internacional de algodão, libra-peso (lb), a redução verificada equivale a 128 lb. Em dezembro de 2015, a cotação na Bolsa de Nova York foi de 0,63 dólares americanos por libra-peso (Trangcharts 2015). Assim, a maior variabilidade dos talhões de algodão pode acarretar grande impacto na receita ao final no cultivo de algodão.

Na Fig. 5 é possível observar a produtividade relativa à máxima obtida no conjunto de dados analisado em função da variação do índice CV-NDVI. A produtividade média de 1.281 kg ha⁻¹ representou 63% em relação à máxima produtividade, com índice CV-NDVI correspondente a 12,8 %. No ponto onde a produtividade foi de 80%, 1.624 kg ha⁻¹, o CV-NDVI foi 6,9%. Brandão et al. (2014) obtiveram variabilidade espacial da produtividade de algodão, com CV de 4,2%, associado a valor de CV-NDVI de 3,4% calculado por imagem orbital aos 120 DAE.

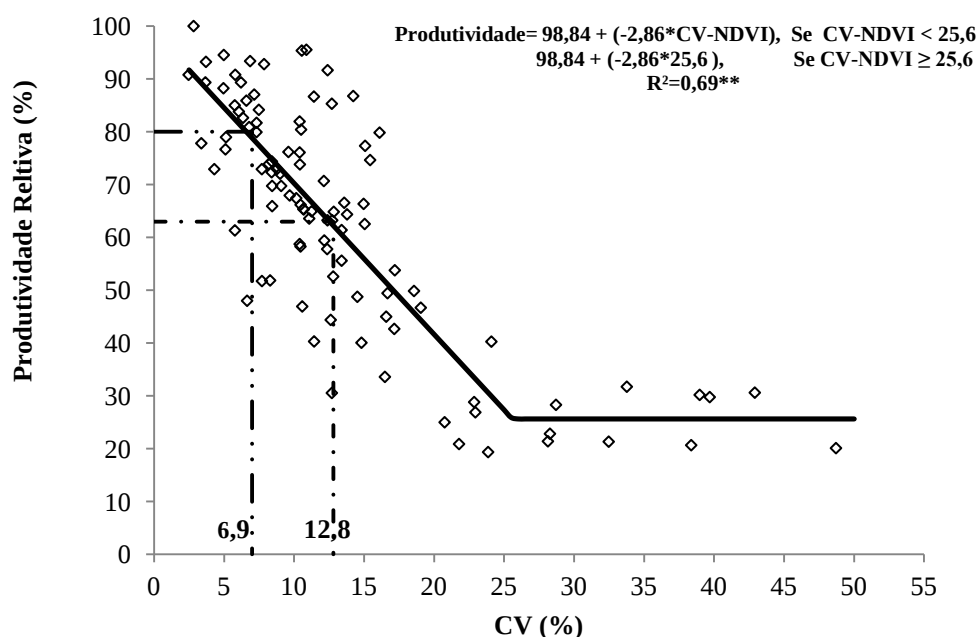


Fig. 4. Produtividade relativa algodão em função do coeficiente de variação do NDVI (CV-NDVI) obtido de imagens Landsat durante o ciclo em nove safras.

** p valor 0,0001

Os valores de CV acima de 25,6%, correspondente ao patamar do modelo, apresentaram produtividade estimada em 518 kg ha⁻¹. Esse valor é 60% abaixo da média e representa cerca de ¼ da máxima produtividade. Os casos com CV-NDVI superiores a 25% foram associados a alguma situação crítica durante o desenvolvimento da cultura, excesso de chuvas, ataque de pragas como *Helicoverpa zea*, *Scaptocoris castanea* e *Anthomonas grandis*, ou à ocorrência de geadas (Tomquelski 2013).

A heterogeneidade no crescimento do algodoeiro leva à dificuldade no manejo da cultura entre os talhões. Práticas como irrigação, adubação e aplicação de regulador de crescimento podem ter sua eficiência comprometida

em talhões desuniformes, com aplicação inadequada de insumos para a demanda local. Wanruja et al. (2003) citam que a uniformidade espacial desde o estabelecimento do estande de plantas é fundamental para elevadas produtividades de algodão.

Efeito de fatores que influenciam a variabilidade espacial e temporal da produtividade das culturas é usualmente expresso nos parâmetros de crescimento. Consequentemente, monitorar o crescimento das culturas pode ser uma base para o manejo sitio específico visando maiores produtividade ou melhorar a eficiência na utilização de insumos (Machado et al. 2002). A agricultura de precisão é uma importante estratégia para tal necessidade, de modo a atuar antes e ou durante o ciclo da cultura, seja pela correção do solo em locais específicos ou pela aplicação em taxa variável de sementes, fertilizante nitrogênio, regulador de crescimento ou desfolhante.

Brooker et al. (2015) demonstram que parâmetros de solo, crescimento e exigência do algodoeiro em diferentes condições climáticas podem ser modelados em escala temporal e espacial para emprego em praticas de manejo. Outra opção de manejo da variabilidade das culturas é pela aplicação de nitrogênio em taxa variável em culturas como milho e algodão com doses mais adequadas nos diferentes locais dos talhões (Mahlein et al. 2012; Holland e Schepers 2013; Bragagnolo et al. 2013; Zhou e Yin 2014).

CONCLUSÃO

O aumento da variabilidade do NDVI, indicada pelo CV desse índice de vegetação calculado a partir de uma imagem multiespectral, reflete em menor produtividade média dos campos de algodoeiro.

O índice CV-NDVI caracteriza melhor as variações de produtividade da cultura em diferentes safras analisadas quando comparado ao uso do valor absoluto do NDVI.

A redução da produtividade média de algodão em relação ao aumento do CV foi constante até esse índice atingir 25,6%.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Anselmo, J. L., Andrade, B. G. M., da Silva, D. C., Viana, D. R., de Ávila, J., da Silva, T. R., Mudinutti, L., Teixeira, D. S., & Merloti, L. F. (2015). Ensaio comparativo de variedade de algodão em época e espaçamento distintos, Chapadão do Sul-MS (Comparative cotton variety test at different time and spacing, Chapadão do Sul-MS). *Fundação Chapadão*, 5, 18-23.
- Baio, F. H. J. (2015). Aplicação na dose certa (Application in the right rate). *Cultivar Máquina*, 8, 12-18.
- Booker, J. D., Lascano, R. J., Molling, C. C., Zartman, R. E., & Acosta-Martínez, V. (2015). Temporal and spatial simulation of production-scale irrigated cotton systems. *Precision Agriculture*, 16, 630-653.
- Bragagnolo, J., Amado, T. J. C., Nicoloso, R. D. S., Jasper, J., Kunz, J., & Teixeira, T. D. G. (2013). Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: i-plant nutrition and dry matter production. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 1288-1298.
- Brandão, Z. N., Sofiatti, V., & da Silva, B. B. (2011). Índice de vegetação obtido por imagens de satélite como estimadores do IAF e nitrogênio do algodoeiro (Vegetation indices obtained satellite images as the LAI and nitrogen estimators in the cotton). In *XV Congresso Brasileiro de Algodão* (pp. 15-18). São Paulo: Embrapa Algodão.
- Brandão, Z. N., Grego, C. R., Inamasu, R. Y., & Jorge, L. A. (2014). Spectral reflectance of satellite images using geostatistics methods to estimate growth and cotton yield. In *XVI Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hidrology* (pp. 923920-1 - 923920-8). Amsterdam: International Society for Optics and Photonics.
- Carvalho, C. G. P. D., Arias, C. A. A., Toledo, J. F. F. D., Almeida, L. A. D., Kiihl, R. A. D. S., Oliveira, M. F. D., Hiromoto, D. M. & Takeda, C. (2003). Proposta de classificação dos coeficientes de variação em relação à produtividade e altura da planta de soja (Proposed classification of the coefficients of variation in relation to productivity and soybean plant height). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38, 187-193.

- Claverie, M., Vermote, E. F., Franch, B., & Masek, J. G. (2015). Evaluation of the Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ surface reflectance products. *Remote Sensing of Environment*, 169, 390-403.
- Dalezios, N. R., Domenikiotis, C., Loukas, A., Tzortzios, S. T., & Kalaitzidis, C. (2001). Cotton yield estimation based on NOAA/AVHRR produced NDVI. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 26, 247-251.
- Echer, F. R. (2014). O algodoeiro e os estresses abióticos (The cotton crop and abiotic stress). In F. Echer (Ed), *O algodoeiro e os estresses abióticos: temperatura, luz, água e nutrientes* (The cotton crop and abiotic stresses: temperature, light, water and nutrients) (pp 9-13). Cuiabá, Brazil: Instituto Mato-Grossense do Algodão.
- Guo, W., Maas, S. J., & Bronson, K. F. (2012). Relationship between cotton yield and soil electrical conductivity, topography, and Landsat imagery. *Precision Agriculture*, 13, 678-692.
- Gutierrez, M., Norton, R., Thorp, K. R., & Wang, G. (2012). Association of spectral reflectance indices with plant growth and lint yield in upland cotton. *Crop Science*, 52, 849-857
- Holland, K. H., & Schepers, J. S. (2013). Use of a virtual-reference concept to interpret active crop canopy sensor data. *Precision Agriculture*, 14, 71-85.
- Iqbal, J., Read, J. J., & Whisler, F. D. (2013). Using remote sensing and soil physical properties for predicting the spatial distribution of cotton lint yield. *Turkish Journal of Field Crops*, 18, 158-165.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K.J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy*, 18, 235–265.
- Jones, J. R., Fleming, C. S., Pavuluri, K., Alley, M. M., Reiter, M. S., & Thomason, W. E. (2015). Influence of soil, crop residue, and sensor orientations on NDVI readings. *Precision Agriculture*, 16, 690-704.
- Koo, J., & Cindy, C. (2015). Effects of rainfall variability on maize yields. In K. Sebastian (Ed.). *Atlas of African Agriculture Research & Development* (pp. 44-45). Washington, USA: International Food Policy Research Institute.
- Lamas, F. M., & Ferreira, A. C. B. (2011). Reguladores de crescimento, desfolhantes e maturadores (Growth Regulators, defoliantes and ripeners).

- In E. C. Freire (Ed.) Algodão no Cerrado do Brasil (2nd E. pp. 777-790). Brasília: ABRAPA.
- Leon, C. T., Shaw, D. R., Cox, M. S., Abshire, M. J., Ward, B., & Wardlaw III, M. C. (2003). Utility of remote sensing in predicting crop and soil characteristics. *Precision Agriculture*, 4, 359-384.
- Li, H., Lascano, R. J., Barnes, E. M., Booker, J., Wilson, L. T., Bronson, K. F., & Segarra, E. (2001). Multispectral reflectance of cotton related to plant growth, soil water and texture, and site elevation. *Agronomy Journal*, 93, 1327-1337.
- Machado, S., Bynum, E. D. Jr., Archer, T. L., Lascano, R. J., Wilson, L. T., Bordovsky, J., Segarra, E., Bronson, K., Nesmith, D. M., & Xu, W. (2002). Spatial and temporal variability of corn growth and grain yield. *Crop Science*, 42, 1564-1576.
- Mahlein, A. K., Oerke, E. C., Steiner, U., & Dehne, H. W. (2012). Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection. *European Journal of Plant Pathology*, 133, 197-209.
- Mallarino, A. P., Oyarzabal, E. S., & Hinz, F. N. (1999). Interpreting within-field relationships between crop yield and plant variables using factor analysis. *Precision Agriculture* 1, 15-25.
- Muñoz, J. D., Steibel, J. P., Snapp, S., & Kravchenko, A. N. (2014). Cover crop effect on corn growth and yield as influenced by topography. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 189, 229-239.
- Ollinger, S. V. (2011). Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. *New Phytologist*, 189, 375-394.
- Peixoto, A. P. B., Faria, G. A., Morais, A. R. (2011). Modelos de regressão com platô na estimativa do tamanho de parcelas em experimento de conservação in vitro de maracujazeiro (Regression models with plateau in estimating the size of plots in conservation experiment vitro passionflower). *Ciência Rural*, 41, 1907-1913.
- Ryan, S. E., & Porth, L. S. (2007). A tutorial on the piecewise regression approach applied to bedload transport data (41 p.). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins: USA.

- Shanwad, U. K., Rajesh, N. L., Veeresh, H., Crain J., Patil, M. B., Hiremath G. M., Patil, V. C., & Khosla, R. (2014). Soil heterogeneity at the field scale: a challenge for precision agriculture in India. In Proceedings of International Symposium New-Dimensions in Agro-meteorology for Sustainable Agriculture (pp. 1-11). Pantnagar- India: India Council of Agricultural Research.
- Sousa, R. P., Paulo, S. L., Silva, J. P., da Silva, J., de Oliveira, V. R., & Oliveira, A. M. D. P. (2015). Tamanho ótimo de parcela para avaliação do rendimento de grãos do girassol (Optimal size of plots for evaluation of sunflower grain yield). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19, 21-26.
- Stadler, A., Rudolph, S., Kupisch, M., Langensiepen, M., van der Kruk, J., & Ewert, F. (2015). Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements. *European journal of agronomy*, 64, 8-20.
- Thenkabail, P. S., Smith, R. B., & de Pauw, E. (2000). Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote sensing of Environment*, 71, 158-182.
- Tomquelski, G. V. (2013). Pragas em algodoeiro na região dos Chapadões (Pests in cotton in the region of Chapadões). *Fundação Chapadão*, 5, 07-32.
- TrangCharts (2015). Commodity futures price quotes for cotton. Resource TradingCharts.com. <http://futures.tradingcharts.com> Accessed 01 Dezembro 2015.
- Venteris, E. R., Tagestad, J. D., Downs, J. L., & Murray, C. J. (2015). Detection of anomalous crop condition and soil variability mapping using a 26 year Landsat record and the Palmer crop moisture index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 160-170.
- Walsh, O. S., Klatt, A. R., Solie, J. B., Godsey, C. B., & Raun, W. R. (2013). Use of soil moisture data for refined GreenSeeker sensor based nitrogen recommendations in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Precision Agriculture*, 14, 343-356.

- Wanjura, D. F., Upchurch, d. R., Maas, S. J., & Winslow, J. C. (2003). Spectral detection of emergence in corn and cotton. *Precision Agriculture*, 4, 385-399.
- Wiens, J. A., Stralberg, D., Jongsomjit, D., Howell, C. A., & Snyder, M. A. (2009). Niches, models, and climate change: assessing the assumptions and uncertainties. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 106, 19729–19736.
- Yang, C., & Everitt, J. H. (2012). Using spectral distance, spectral angle and plant abundance derived from hyperspectral imagery to characterize crop yield variation. *Precision agriculture*, 13, 62-75.
- Yang, C., Odvody, G. N., Fernandez, C. J., Landivar, J. A., Minzenmayer, R. R., & Nichols, R. L. (2015). Evaluating unsupervised and supervised image classification methods for mapping cotton root rot. *Precision Agriculture*, 16, 201-215.
- Zarco-Tejada, P. J., Ustin, S. L., & Whiting, M. L. (2005). Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agronomy Journal*, 97, 641-653.
- Zhao, D., Reddy, K. R., Kakani, V. G., Read, J. J., & Koti, S. (2007). Canopy reflectance in cotton for growth assessment and lint yield prediction. *European Journal of Agronomy*, 26, 335-344.
- Zheng, G., & Moskal, L. M. (2009). Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors. *Sensors*, 9, 2719-2745.
- Zeng, C., Shen, H., & Zhang, L. (2013). Recovering missing pixels for Landsat ETM+ SLC-off imagery using multi-temporal regression analysis and a regularization method. *Remote Sensing of Environment*, 131, 182-194.
- Zhou, G., Yin, X. (2014). Relationship of cotton nitrogen and yield with Normalized Difference Vegetation Index and plant height. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 100, 147-160.

CAPÍTULO 2 - Efeito de atributos químicos do solo e precipitação na variabilidade do NDVI e produtividade do algodoeiro

Resumo

A produtividade das culturas é resultante de uma combinação de fatores existentes no ambiente que afetam o crescimento das plantas. Com o propósito de verificar o efeito da variabilidade espacial dos talhões de algodoeiro na produtividade de fibra, esse trabalho teve com o objetivo relacionar a precipitação e propriedades químicas do solo na variabilidade do crescimento e produtividade do algodoeiro. Os dados desse estudo são oriundos de nove safras monitoradas em 101 talhões de cultivo de algodoeiro localizados na região central do Brasil. Em cada talhão obteve-se a produtividade média, calculou-se o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o CV (Coeficiente de Variação) desse mesmo índice; resultados de análises químicas provenientes de amostragem de solo, e dados de precipitação em estação automática. As médias anuais do NDVI e produtividade apresentaram correlação significativa (r 0,50). Com o aumento do CV-NDVI, a produtividade do algodoeiro foi reduzida gradualmente à uma taxa constante até aos 25,6 %. A maior precipitação no início do ciclo da cultura proporcionou provocou impacto negativo sobre a produtividade do algodoeiro. O maior valor médio do teor de Al, saturação por alumínio e acidez potencial (H+Al) promoveram variabilidade no crescimento de plantas de algodão. O maior volume de chuva no estabelecimento da cultura aumenta a variabilidade do crescimento do algodão durante do ciclo.

Palavra-chave: coeficiente de variação · imagem de satélite · Landsat

Chapter 2 - EFFECT OF CHEMICAL ATTRIBUTES OF SOIL AND PRECIPITATION OVER THE VARIABILITY OF NDVI AND COTTON PRODUCTIVITY

Abstract

The productivity of crops is the result of a combination of existing environmental factors affecting plant growth. In order to verify the effect of spatial variability of cotton plots in fiber productivity, this study was aimed to relate precipitation and chemical properties of soil variability in the growth and productivity of cotton over nine seasons. The data in this study are from 09 vintages monitored on

101 plots of cotton cultivation in the central region of Brazil. In each plot was obtained average productivity, calculated the NDVI (Normalized difference Vegetation Index) and CV (coefficient of variation) of that index; results of chemical analyzes from soil sampling, and rainfall data in automatic station. The annual average NDVI and productivity were significantly correlated ($r^2 = 0.50$). With the increase of CV-NDVI cotton yield was reduced gradually at a constant rate up to 25.6%. The highest rainfall at the beginning of the crop cycle provided the negative impact on the productivity of cotton. The highest average value of Al content, aluminum saturation and potential acidity ($H + Al$) promoted variability in the growth of cotton plants. The greatest amount of rainfall increases in crop establishment variability of the cotton during the growth cycle.

Keyword: coefficient of variation -satellite image - Landsat

INTRODUÇÃO

A produtividade das culturas é resultante de uma combinação de fatores existentes no ambiente que afetam o crescimento das plantas. O potencial de produtividade é associado às condições específicas de solo e clima. Essas sofrem alterações com o tempo, dada à dinâmica de mudanças das variáveis climáticas e a fenologia da cultura (Zeng et al. 2014).

Ferramentas de sensoriamento remoto são capazes de avaliar e descrever as interações do ambiente sobre o crescimento vegetal (Olliger 2011). Desde a disponibilização das imagens de satélites, têm-se gerado grande número de estudos regionais e globais que caracterizam o tipo de solo e vegetação, índice de área foliar (IAF), eficiência no uso de recurso, como a luz e nutrientes, produção de biomassa, condição hídrica das plantas, conservação e parâmetros biofísicos da vegetação (Zheng e Moskal 2009; Wiens et al. 2009).

Diversos índices espectrais podem ser relacionados ao crescimento vegetal, propriedades do solo, variabilidade temporal e espacial desses atributos. Diversos estudos têm relacionando parâmetros de crescimento, nutricionais, fisiológicos, hídricos, produtividade e qualidade dos produtos colhidos (Thenkabail et al. 2000; Yang e Everitt 2012; Venter et al 2015). Boydell e McBratney (2002) concluíram que técnicas de sensoriamento remoto

têm capacidade de distinguir vários parâmetros do cultivo de algodão durante o ciclo, com potencial de direcionar a amostragem pontual e auxiliar no manejo da cultura.

Propriedades como a retenção de água no solo, textura e densidade do solo, teor de nutrientes, capacidade de troca dos cátions e teor de matéria orgânica são frequentemente relacionadas ao crescimento e a produtividade do algodoeiro. A variabilidade espacial dessas propriedades pode explicar a heterogeneidade do crescimento da cultura ao longo do ciclo (Leon et al. 2003; Stadler et al. 2015). Vieira et al. (2003) demonstraram que os fatores que afetam o crescimento e a produtividade das culturas variam entre as espécies analisadas. Ademais, variações interanuais sugerem que as causas da variabilidade mudam com o tempo.

O algodoeiro é uma planta perene que vem sendo cultivada como anual. Apesar da seleção de novos cultivares, o balanço entre crescimento das estruturas vegetativas e reprodutivas é essencial para altas produtividades e um desafio no manejo desta cultura (Robertson et al. 2007). A produtividade do algodoeiro é correlacionada com a quantidade de tecido fotossintetizante, a qual é altamente relacionada com a biomassa e o IAF, estas por sua vez podem ser estimadas por índices espectrais de refletância do dossel (Yang e Everitt 2012; Muharam et al. 2014; Yang et al. 2015).

Durante o desenvolvimento do sensor TM (Thematic Mapper) dos satélites Landsat, as bandas foram selecionadas de forma a maximizar a coleta de dados para o estudo da vegetação em ambientes naturais ou agrícolas, conforme (Thenkabail et al. 2000). Dentre os vários índices de vegetação, o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é amplamente estudado.

A relação entre o NDVI e os parâmetros de crescimento ou da produtividade do algodoeiro é dependente do estágio fenológico no qual leitura é realizada pelo sensor (Zarco-Tejada et al. 2005). Para a estimativa da produtividade, o momento da aquisição desse índice durante a frutificação é a fase do ciclo da cultura que apresenta maior correlação com os índices de refletância capturados pelo sensor multiespectral (Zarco-Tejada et al. 2005; Gutierrez et al. 2012)

A taxa de crescimento das culturas é altamente variável devido aos processos que operam em várias escalas temporais e espaciais. Na escala

entre talhões, diferenças são atribuídas por práticas culturais como época de plantio, tipo de cultura e ciclo da cultivar. Dentro do talhão, a variabilidade é regida pelas interações entre as propriedades do solo, aspectos da paisagem no que tange ao movimento de água, teor dos nutrientes e sedimentos, além das variáveis de clima como precipitação (Li et al. 2001; Guo et al. 2012; Muñoz et al. 2014).

Koo e Cindy (2015) citam que o modo como as precipitações são distribuídas durante o ciclo em escala diária impacta na produtividade final das culturas e pode explicar as variações anuais entre as diferentes safras. Esses autores notaram que há uma grande variação da produtividade para precipitações de chuva semelhantes. Além do tipo de solo, fatores ligados ao regime hídrico explicam tais variações. O coeficiente de variação pode ser uma medida da variabilidade no regime hídrico de cada local e comparar diferenças regionais (Jones et al. 2003).

Ho e Mo (2011) relatam que modelos de crescimento da cultura podem simular a produtividade das culturas em diferentes situações de ambiente e de manejo. Entretanto, há grandes desafios para mensurar a variabilidade espacial e temporal da produtividade das culturas, devido à incerteza da distribuição espacial de variáveis como precipitação, solo, irrigação, fertilização e manejo e suas interações. Stadder et al. (2015) ressaltam que a heterogeneidade espacial nos campos de cultivos agrícolas é raramente quantificada, mas é essencial para a estimativa da produtividade e a otimização de práticas de manejo. Com o propósito de verificar o efeito da variabilidade espacial dos talhões de algodoeiro na produtividade de fibra, esse trabalho teve como objetivo relacionar a precipitação e propriedades químicas do solo sobre a variabilidade do crescimento e a produtividade do algodoeiro ao longo de nove safras.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados desse estudo são oriundos 101 áreas de cultivo de algodoeiro na região central do Brasil. Esses talhões estão localizados na região sudoeste do estado Goiás, no município de Chapadão do Céu e Norte do Estado de

Mato Grosso do Sul, no município de Costa Rica. As coordenadas geográficas correspondentes são -18,0 a -19,1° de latitude e -52,4 a -53,6° de longitude.

O Cerrado é o bioma característico da região. O clima é caracterizado de acordo com a classificação Köppen-Geiger como Aw, ou clima tropical com estação seca no inverno. A precipitação média anual é 2.096 mm, distribuída entre Setembro a Abril. A temperatura média anual é de 22,3° C, com média mensal de 20,1 a 23,5° C. A topografia é predominantemente plana, altitude média de 807 m, variando de 724 a 898 m em relação ao nível do mar.

Na região do estudo, o cultivo do algodoeiro ocorre com a semeadura tipicamente de Dezembro a Janeiro, e colheita de Julho a Agosto do ano seguinte (Anselmo et al. 2015). Desse modo, o ano agrícola refere-se a dois anos do calendário.

Os dados analisados são referentes aos anos agrícolas de 2004/05 a 2013/14, com exceção da safra 2005/06 cujas imagens Landsat apresentaram nuvens durante o período adequado para aquisição no ciclo da cultura. Em cada talhão obteve-se a produtividade média de fibra, NDVI e coeficiente de variação do NDVI (CV-NDVI) de imagens LandSat, precipitação durante o ciclo e análise química do solo. Foram analisados 11 talhões em 2005, 2007, 2008, 2009, 2013 e 2014, e 12 talhões em 2010, 2011 e 2012. Totalizando 101 casos com área total de 10.848 ha e média de 107 ha por talhão.

A produtividade média de fibra (kg ha^{-1}) estimada a partir do total colhido no talhão. Calculou-se o NDVI médio a partir das imagens orbitais Landsat. O CV-NDVI foi calculado pelo desvio padrão dos pixels das imagens de NDVI de cada talhão dividido pela sua média. As imagens orbitais utilizadas nos diferentes anos são apresentadas na Tabela 1. As características de cada sensor e aplicações de alguns produtos são descritas por Claverie et al. (2015).

Tabela 3 Imagens utilizadas para cálculo do NDVI e coeficiente de variação dos talhões de algodão.

Ano	Data	Satélite*
2005	07/04/2005	Landsat 5 TM
2007	27/03/2007	
2008	30/03/2008	
2009	17/04/2009	
2010	20/04/2010	
2011	07/04/2011	Landsat 7 ETM+
2012	02/04/2012	
2013	20/04/2013	
2014	07/04/2014	

*Orbita/ponto: 224/073.

A partir do ano de 2012, foram utilizadas as imagens do Landsat 7 ETM+ em virtude do encerramento de aquisição pelo Landsat 5. Desde a falha permanente do sensor de correção de linha (SLC) em 2003, cerca de 22% dos pixels do instrumento imageador ETM+ não são escaneados (Zeng et al. 2013).

As imagens utilizadas foram selecionadas de modo a não apresentarem nuvem na área do talhão. O momento de aquisição das cenas para a análise foi determinado pelo estágio fenológico da cultura do algodoeiro entre os 80 a 120 dias após emergência. Esse período coincide ao momento de formação da maioria dos frutos viáveis, importante fase na determinação da produtividade. A atividade fisiológica da planta é intensa nessa fase, principalmente pela formação das sementes e fibra (Echer et al. 2014). Zhou (2014) citam que nesse período é o de maior correlação entre o NDVI obtido por imagens orbitais e a produtividade de algodão. Iqbal et al. (2013) concluíram que uma única imagem durante a fase de frutificação é suficiente para estimativa da variabilidade espacial da produtividade de fibra de algodão.

As imagens selecionadas foram obtidas pelo site EarthExplore do USGS (United State Geological Survey). A composição de bandas, reprojeção para o hemisfério sul, georreferenciamento e cálculo do NDVI foram realizados no software ArcMap 10.3 (ESRI, Redlands, CA, USA). As imagens foram georreferenciadas por meio de limites dos talhões analisados. O limite de cada talhão foi obtido pelo contorno do perímetro munido de GNSS modelo Stafire 3000, com correção diferencial John Deere SF 2 (John Deere, Moline, IL, USA).

Para garantir que os valores de cada pixel das imagens de satélite fossem oriundos da refletância do dossel das plantas do algodoeiro, foi construído um buffer pelo deslocamento do limite ao interior do talhão em 30 m. A distância equivale à dimensão do pixel das imagens, de modo que fossem retirados os efeitos de áreas circunvizinhas, como estradas ou porções de talhões não analisados.

Ao final do ciclo da cultura foram coletadas amostras de solo de 0-0,2 m de profundidade, em sistema de grade quadrática com 223 m de distância entre os pontos, perfazendo uma amostra a cada 5 ha. Na representação da amostragem pontual de solo, cada amostra foi composta por 10 subamostras e coletadas no interior de um círculo com um raio máximo de 10 m do ponto central de referência. Utilizou-se um trado do tipo rosca com acionamento automático por sistema hidráulico, montado em um quadriciclo ou trator. Foram analisadas 2.223 amostras em laboratório certificado pelo método EMBRAPA (1997). Durante o processo de amostragem de solo, foi registrada a classe de solo predominante em cada talhão, as classes encontradas foram Latossolo e Gleissolo (Ferrolsol ou Gleysol).

Durante o ciclo do algodoeiro foram coletados dados de precipitação e temperatura em estação automática em frequência de 15 minutos. Foram analisados dados de dezembro a junho, totalizando 212 dias, 20.352 informações por safra e 183.168 dados ao longo do período analisado. A estação localizava-se a distância máxima de 18 km dos talhões mais distante. Realizou soma da precipitação em período de 10 dias e soma térmica durante o ciclo. A soma térmica foi calculada conforme Oosterhuis (1999), com temperatura base de 60 °F.

Os dados foram analisados por estatística descritiva, análise de correlação linear de Pearson e regressão. A correlação testada foi dos dados de NDVI e CV-NDVI com a produtividade média dos talhões e dos dados de precipitação e análise química do solo com o CV-NDVI e produtividade. Foi realizada uma regressão entre o CV-NDVI e a produtividade pelo medelo linear segmentado conforme equação 1.

$$\text{Produtividade (kg ha}^{-1}\text{)} = \begin{cases} \alpha + (\beta * \text{CV-NDVI}) & \text{se CV-NDVI} < \Phi \\ \alpha + (\beta * \Phi) & \text{se CV-NDVI} \geq \Phi \end{cases} \quad (1)$$

Onde α representa o valor inicial (kg ha^{-1}), β é a taxa de queda na produtividade (kg ha^{-1}), CV-NDVI valor do coeficiente de variação obtido no talhão, Φ correspondente ao valor no qual muda a inclinação da reta.

A regressão linear segmentada foi ajustada para produtividade como variável dependente e CV-NDVI como variável independente para encontrar o quanto a variabilidade reduz a produção de algodão e até que valor de CV-NDVI o efeito é significativo. A metodologia utilizada no ajuste do modelo de regressão foi proposta por Ryan e Porth (2007). Nesse modelo de regressão, diferentes retas são ajustadas, com o ponto de mudança da taxa, ou inclinação, em determinado valor da variável independente.

Os autores Peixoto et al. (2011) e Sousa et al. (2015) obtiveram resultados satisfatórios pelo uso desse modelo ao ajustar o coeficiente de variação em relação ao número de repetições em ensaios *in vitro*. O Programa utilizado na análise estatística foi o INFOSTAT 2015e (Universidad Nacional de Cordoba, Cordoba, Argentina).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados provenientes das nove safras analisadas proporcionaram produtividade de fibra média anual de 1.375 kg ha^{-1} , variando de 723 a 1.736 kg ha^{-1} (Tabela 2). Houve grande variação da média de produtividade ao longo do período analisado. Diversos fatores colaboraram para a variação registrada na produtividade de algodão. Lamas (2011) cita importantes fatores para produtividade de algodão na região de cultivo, destacando a adoção de tecnologia e investimento realizados pelo produtor, disponibilidade de novas variedades, biotecnologias e rotação de culturas. Outras variáveis de natureza climáticas experimentadas ao longo do ciclo também são importantes na definição da produtividade.

Tabela 2 Valores médios de produtividade de algodão, NDVI e coeficiente de variação do NDV (CV-NDVI) em diferentes anos.

Ano	Produtividade (kg ha ⁻¹)	NDVI	CV-NDVI
2005	1.112	0,72	12,7
2007	1.786	0,72	10,1
2008	1.620	0,71	18,8
2009	1.781	0,71	11,0
2010	791	0,61	19,0
2011	1.423	0,63	10,8
2012	1.235	0,55	12,4
2013	723	0,52	29,7
2014	1.738	0,56	9,6
Média	1.357	0,64	12,8
r*		0,50	-0,72

*correlação com a produtividade (Pearson).

O algodoeiro é altamente responsivo as variações climáticas e as práticas de manejo. Diversos fatores climáticos podem afetar a produtividade desse cultivo, principalmente aqueles relacionados à disponibilidade de água e temperatura. A variação interanual desses fatores aliados às práticas agrícolas podem explicar as variações na produtividade (Rosolem e Mellis 2010).

O NDVI médio de todos os talhões entre todas as safras foi de 0,64, com valores variando entre 0,52 a 0,72 (Tabela 2). Zarco-Tejeda et al. (2005) obtiveram valor médio semelhante de NDVI oriundo de imagens hiperespectrais. As médias anuais do NDVI e produtividade apresentaram correlação significativa ($r = 0,50$). Zhao et al. (2007) citam correlação de NDVI aos 100 dias após semeadura com produtividade de algodão de 0,54 e 0,76 em dois anos de avaliação. Dalezios et al. (2001) analisaram imagens orbitais com objetivo de estimar a produção de algodão em escala regional e obteve correlação de 0,62 entre NDVI e produtividade. Os autores concluíram que a correlação dependeu do local e do ano, embora as variações dos valores médios de NDVI refletissem as variações da produção regional nas três safras.

O CV-NDVI variou entre 9,6 a 29,7%, com média em 12,8%. A consideração do parâmetro coeficiente de variação depende da variável analisada. Carvalho et al. (2003) mencionam que valor de CV maior de 16% podem ser considerado como alto para produtividade de soja e 22% para o milho. Brandão et al. (2014) obtiveram coeficiente de variação do NDVI de 3,4 calculado por imagens orbitais em talhão de algodão em 2011.

O CV-NDVI apresentou significativa correlação com a produtividade média anual, entretanto, a relação foi marcadamente negativa, r de -0,72 (Tabela 2). O coeficiente de variação como medida de dispersão relativa pode ser relacionado com a heterogeneidade espacial no crescimento das plantas de algodoeiro. Zarco-Tejada et al. (2005) demonstraram a heterogeneidade de índices de vegetação durante o ciclo da cultura e a correspondente variabilidade espacial da produtividade. Guo et al. (2012) citam que em cinco safras analisadas as maiores produtividades foram obtidas quando a variabilidade espacial indicada pelo coeficiente de variação foi menor. Zhao et al. 2007 relataram maior variação dos índices de vegetação durante o ciclo do algodoeiro em ano com maior coeficiente de variação da produtividade.

O CV-NDVI apresentou maior grau de relacionamento com a produtividade do algodoeiro que valor do NDVI. Venteris et al. (2015) relataram que análises interanual de dados de NDVI podem ser prejudicadas devido à interferência de vários fatores, dentre os quais pode-se destacar as diferenças na data de aquisição das imagens e a interação com o estágio de crescimento da cultura. Esses autores propuseram método alternativo de análise para melhorar estudos interanuais de valores de NDVI. O método consiste no uso de valores transformados do índice para acessar padrões espaciais relativos à condição da cultura, com uso da probabilidade acumulativa do marcador normal equivalente.

O efeito do CV-NDVI sobre a produtividade média dos talhões de algodoeiro foi modelado e sua equação pode ser visualizada na Fig. 2. Talhões que apresentaram maior uniformidade no crescimento ou vigor de plantas, indicado pelo CV-NDVI, obtiveram maiores produtividades.

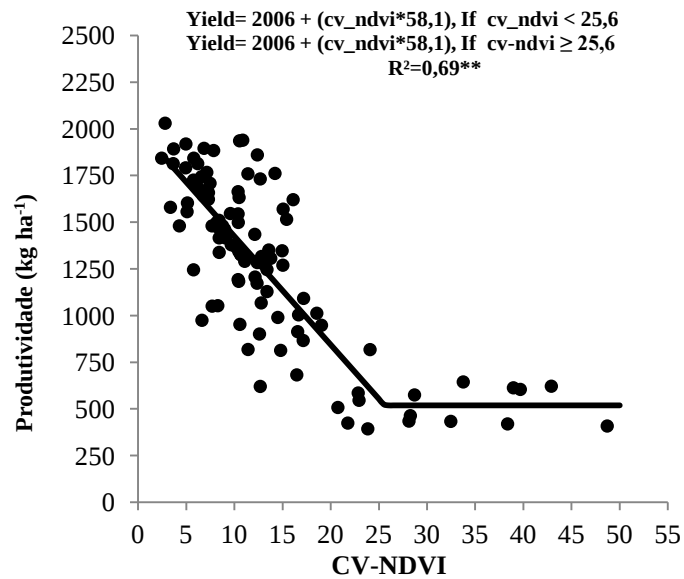


Fig. 5 Produtividade de fibra de algodão em função do coeficiente de variação do NDVI (CV-NDVI) obtido a partir de imagens Landsat em nove safras. Linha contínua: modelo linear com patamar ajustado; ** significativo a 1%.

Com o aumento do CV-NDVI, a produtividade do algodoeiro foi reduzida gradualmente à uma taxa constante até aos 25,6 %. Após esse valor, a produtividade permaneceu estável, mesmo com aumento da variabilidade. Cada ponto percentual no CV-NDVI refletiu em -58,1 kg ha⁻¹ de fibra de algodão.

Stadler et al. (2015) ao avaliarem variações de crescimento nas culturas de trigo, cevada e beterraba açucareira obtiveram pequeno coeficiente de variação médio dentro do talhão para a altura de planta (8,6%). Entretanto, outros parâmetros de crescimento como biomassa e índice de área foliar mostraram alta heterogeneidade, com valores de CV da ordem de 60 e 30 %, respectivamente.

Os valores de CV-NDVI acima de 25,6%, correspondente ao patamar do modelo, apresentaram produtividade estimada em 520 kg ha⁻¹. Nos talhões com valores de CV-NDVI superior a 25% ocorreram alguma situação crítica durante o desenvolvimento da cultura. Os eventos associados à situação citadas registradas no período de estudo na região foram excesso de chuvas durante o ciclo, ataque de pragas como *Helicoverpa zea*, *Scaptocoris castanea* e *Anthomonas grandis* e ocorrência de geadas (Tomquelski 2013). Na Figura 3

é possível visualizar os efeitos desses agentes nos campos de cultivos analisados.

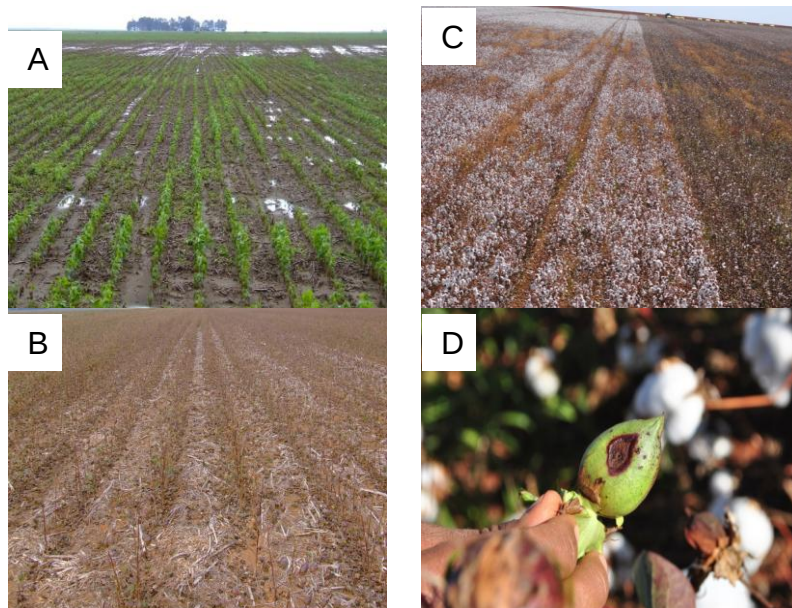


Fig. 3 Ilustrações dos principais que fatores que afetaram o crescimento e a produtividade do algodoeiro ao longo de nove safras. A – talhão com solo alagado (2010); B – Talhão sob ataque de percevejo castanho (2009); C – ocorrência de geada (2010); D – ataque de *Helicoverpa armigera* (2013).

Os valores de precipitação mensal podem ser visualizados na Fig. 4, sendo possível notar grande variabilidade na pluviosidade nessa escala de avaliação. O mês de Janeiro foi aquele que apresentou menor variabilidade no período analisado (CV de 20%), enquanto os meses com menores médias de precipitação (Maio, Junho e Julho) os de maiores oscilação interanual (CV de 70, 120 e 190 % respectivamente). O padrão de variabilidade encontrado no período avaliado está de acordo com Thornton et al. (2013). Esses autores relatam maior variabilidade nos meses com menor quantidade de precipitação.

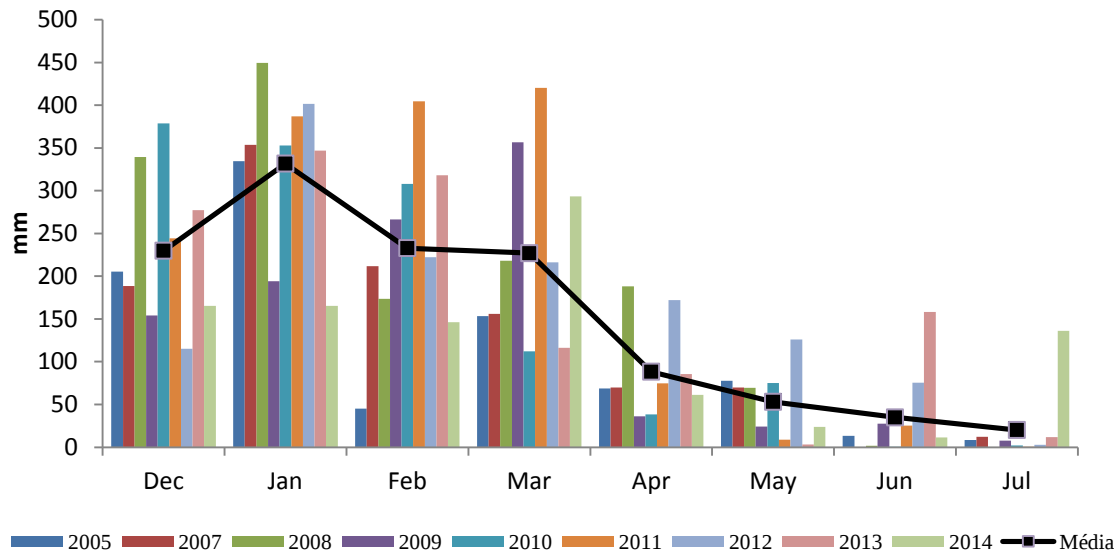


Fig. 4 Média Mensal de precipitação durante o ciclo do algodão nas safras analisadas.

O modo como as precipitações são distribuídas durante o ciclo da cultura em escala diária impacta na produtividade final da cultura e na variação desse índice entre as diferentes safras (Jones et al. 2003; Koo e Cox 2015). Os estádios de crescimento da cultura diferem quanto à tolerância ou sensibilidade aos fatores ambientais, como a falta ou excesso de água disponível no solo.

Na Fig. 5 é possível visualizar as médias, máximos e mínimos das precipitações mensuradas no período de 10 dias (decêndios) durante o ciclo nas nove safras avaliadas. Houve grandes diferenças entre os decêndios quanto à precipitação média mensurada. Apesar de Fevereiro ser um mês com média mensal de precipitação em 233 mm, houve decêndio sem precipitação durante o período analisado. Dez dias sem precipitação durante o ciclo da cultura pode ser suficiente para provocar estresse hídrico no algodoeiro, dependendo do solo e da demanda atmosférica. Na fase de frutificação a demanda por água pelas plantas de algodão pode chegar a $8 \text{ mm}^{-1} \text{ dia}$ (Brandão et. al 2011).

Os valores de precipitação acima de 200 mm em 10 dias podem ocasionar estresse à cultura por excesso de água no solo em situação de menor drenagem, principalmente solo compactado ou muito argiloso. A soma térmica média foi de 2.620 unidade de calor, com taxa diária de 12,6 unidades de calor.

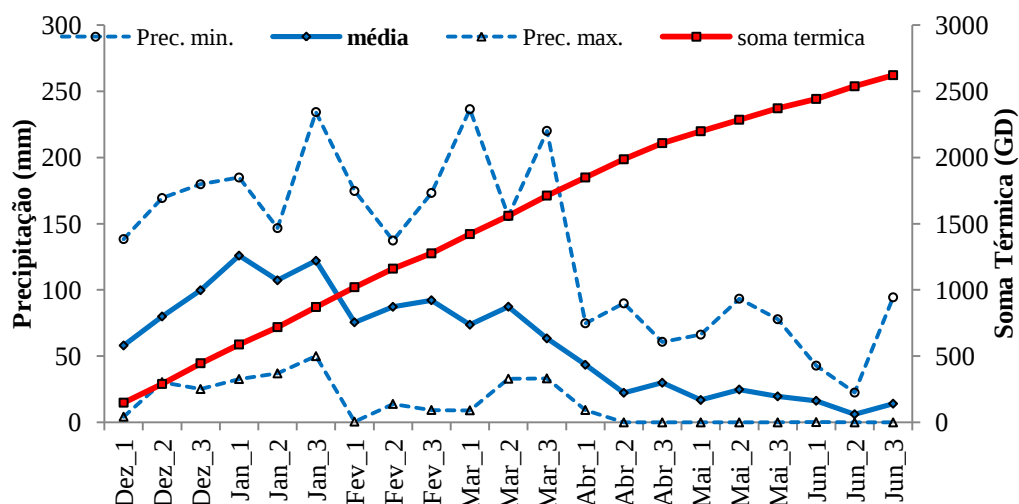


Fig. 5 Precipitação e soma térmica média (10 dias) durante do ciclo do algodoeiro em nove safras (2005; 2007 a 2014) na região do estudo.

A Figura 6 apresenta a correlação entre a precipitação média nos três períodos mensais e a produtividade dos 101 talhões cultivados com algodoeiro na região analisada. A maior precipitação no início do ciclo dessa cultura proporcionou o impacto negativo sobre a produtividade do algodoeiro. No mês de Dezembro, o qual concentra a atividade da semeadura do algodão na região, a correlação entre precipitação e produtividade foi de -0,61 a -0,39 na terceira dezena. Houve diferenças no efeito da precipitação quanto à classe do solo predominante na área analisada (Figura 6). Nos talhões cultivados onde havia predominância do Gleissolo esse efeito foi mais negativo, possivelmente devido à menor drenagem nesse tipo de solo. Nessa fase do ciclo da cultura, a umidade favorece a incidência de doenças, as quais provocam tombamento de plântulas (*damping off*) e prejudicam o estabelecimento da cultura, seja pela redução do número de plantas ou pelo prejuízo na uniformidade no crescimento inicial.

Yeats (2010) menciona que a umidade do solo em excesso pode ser prejudicial ao crescimento do algodoeiro pela inibição da atividade da raiz e estímulo do crescimento da parte aérea. Quando a inibição das raízes ocorrer em maior intensidade pode haver redução da absorção de nutrientes, do potencial de água da folha e consequentemente, na atividade fotossintética.

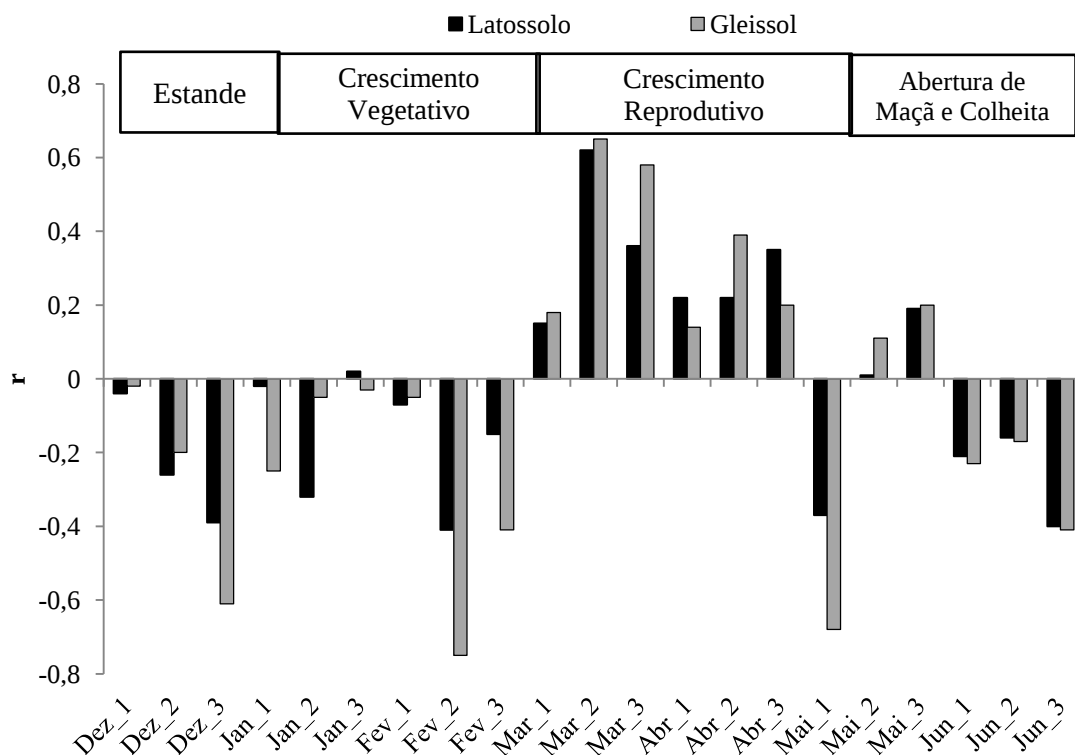


Fig. 6 Coeficiente de correlação linear de Pearson da precipitação durante o ciclo do algodoeiro em duas classes de solo.

Barra em preto apresenta dados Latossolos; barras em cinza talhões com Gleissol.

No segundo decêndio de Fevereiro, o período apresentou significativa correlação com a precipitação, r^2 de -0,41 para o Latossolo e -0,75 no Gleissol. Nesse período, a cultura do algodoeiro encontrava início do florescimento, com elevadas taxas de crescimento, a qual é prejudicada pelo maior índice pluviométrico. Pode relacionar essa causa ao excesso de umidade no solo com efeitos citados anteriormente, ou pela menor incidência de luz relacionada ao período mais chuvoso. Echer (2014) relata situação semelhante no Estado do Mato Grosso/Brasil, principalmente quando a cultura do algodoeiro é semeada em Dezembro, onde a quantidade elevada de chuvas prejudica a semeadura, crescimento inicial das plantas e início da frutificação nos meses de fevereiro.

No período que a frutificação foi predominante, correspondente aos meses de Março e Abril, a quantidade de precipitação apresentou correlação positiva com a produtividade. Nesse período, o valor do coeficiente de correlação foi acima de 0,4 a 0,62 (Fig. 6). A demanda de água pela cultura nessa fase é a maior durante o ciclo, pode chegar a oito mm por dia (Brandão et al. 2011).

No início do mês de Maio a correlação foi negativa em virtude da ocorrência de geada associado com chuvas em alguns anos no início do mês de maio (07/05/2008; 05/05/2010 e 09/05/ 2011). A correlação negativa no mês de Junho é em virtude da exposição da fibra pela abertura do capulho. Precipitações nesse período impacta diretamente na qualidade da fibra, eficiência de colheita e queda de fibra do capulho. Zhao et al. (2007) citam menor produtividade de algodão devido à chuva no final do ciclo da cultura.

Iqbal et al. (2013) realizaram estudo da correlação entre NDVI e a produtividade ao longo do ciclo, em anos mais chuvosos, a correlação foi menor do que aquela apresentada em ano mais secos. Zhou e Yin (2014) relataram que as variações locais e anuais de clima e teor de nitrogênio no solo antes na semeadura provocam variações do R^2 e nos parâmetros das regressões de NDVI com produtividade de plantas de algodão.

Na Fig. 7 é apresentada a relação da quantidade de precipitação no mês de Dezembro e o coeficiente de variação do NDVI na fase de frutificação. Nos talhões com solos do tipo Gleissolo a correlação foi de 0,79, com maior variabilidade no crescimento da cultura durante o ciclo, nos talhões com solo do tipo Latossolos a correlação não foi significativa (Fig. 7). Para Bange et al. (2010), o estresse causado à planta por excesso de água desde o início do ciclo impacta na produtividade final da fibra de algodão. Os autores observaram queda de 58 kg ha^{-1} de algodão a cada dia de excesso de umidade no talhão. Wanruja et al. (2003) citam que a uniformidade no estabelecimento e emergência de plantas é fundamental para altos rendimentos de algodão.

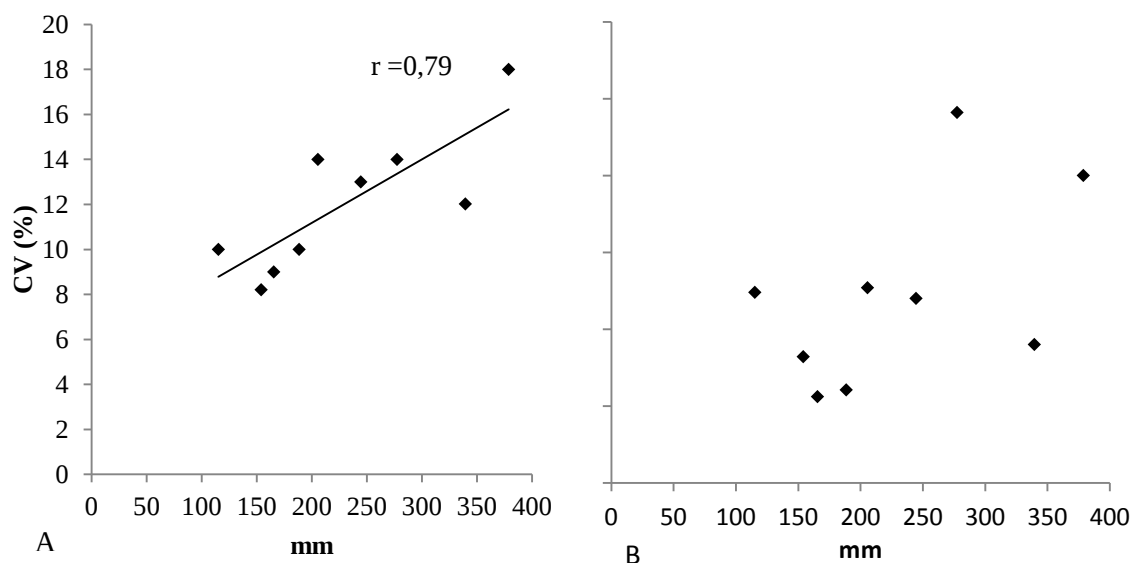


Fig. 7 Efeito da quantidade de precipitação no período de semeadura (mês de dezembro) e coeficiente de variação do NDVI na fase de frutificação no cultivo de algodão em duas classes de solo (Gleissolo - A; Latossolo - B) em nove safras analisadas.

Padrões espaciais ligados à topografia podem afetar a produtividade do algodoeiro por meio da redistribuição de partículas de solo, nutrientes e matéria orgânica, resultando em diferenças de propriedades químicas e físicas do solo (Li et al 2001; Venter et al. 2015). Li et al (2001) relataram fatores relacionados à heterogeneidade da reflectância do dossel de algodão. Nesse estudo, variações na elevação local, conteúdo de água e textura do solo foram agentes importantes na variabilidade do NDVI.

Segundo Read et al (2006), as propriedades químicas do solo têm importante efeito na produtividade do algodoeiro. O cultivo de algodoeiro em grandes áreas encontra variabilidade espacial na de atributos químicos do solo (Shanwad et al. 2014). Na Tabela 2 é apresentada a média, mínimo e máximo das principais características químicas do solo nos talhões de algodão analisado.

Tabela 3 Média, máximo e mínimo valores dos teores de nutrientes das análises de solo dos talhões cultivados com algodão nas 9 safras analisadas.

	pH	M.O.	CTC	Ca	Mg	Al	H+Al	K	P	Sat. Base	Sat. Al	%Ca	%Mg	%K	Ca: Mg
	g kg ⁻¹		cmol _e dm ⁻³				mg dm ⁻³			%					
média	5,0	36	10,0	3,5	1,0	0,1	5,2	78,9	10,7	47	2,1	35,2	10,1	2,1	3,6
minimo	4,6	24	6,4	2,2	0,5	0,1	3,3	37,6	4,1	37	0,7	27,3	7,0	1,3	2,6
maximo	5,5	45	13,2	6,1	1,6	0,2	6,4	132,8	18,6	61	4,3	46,6	14,2	4,3	4,8

M.O: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca de cátions; Ca :cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; K: potássio; P: Fósforo; Sat. Base: Saturação de Bases; Sat. Al: saturação de alumínio; % Ca: saturação de Cálcio; % Mg:saturação de magnésio; % K: saturação de potássio.

De modo geral, a média dos teores de nutrientes está em níveis adequados para cultivo do algodoeiro na região. As variações dos valores de CTC e pH refletem a heterogeneidade dos solos cultivados na região. Os solos de Cerrado para cultivo de algodoeiro são beneficiados pelo uso do calcário para aumento do pH, dos teores de Ca e Mg e neutralização do alumínio tóxico (Souza e Lobato 2004).

A variabilidade dos atributos químicos do solo foi significativa sobre a uniformidade do crescimento (CV-NDVI) e a produtividade de algodoeiro. A Fig. 8 apresenta a correlação das propriedades químicas do solo com CV-NDVI e a produtividade da cultura.

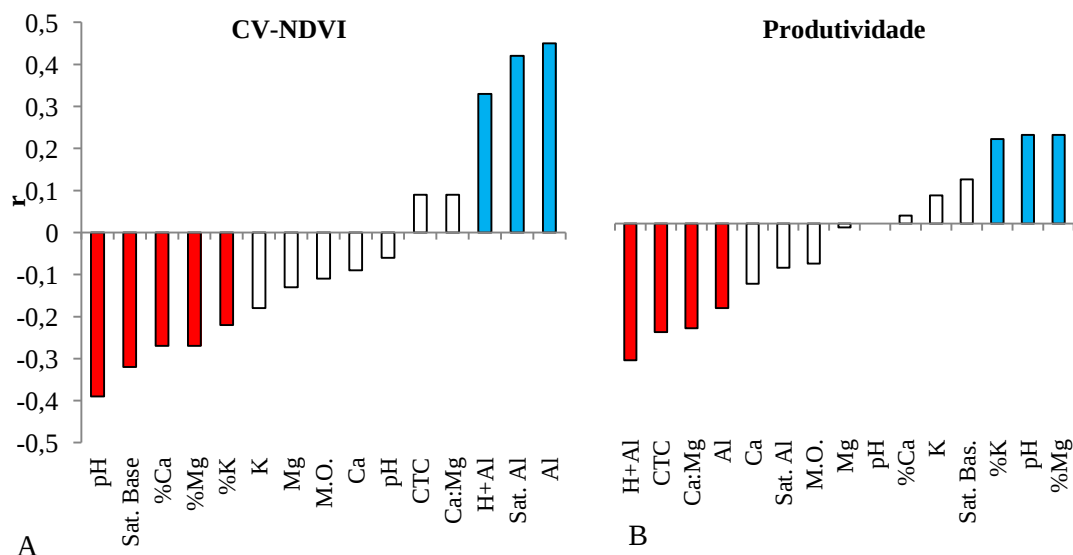


Fig. 8 Coeficiente de correlação linear de Pearson entre coeficiente de variação do NDVI (A) e produtividade (B) com parâmetros químicos do solo.

Barras com preenchimento são significativas a 5%.

M.O: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca de cátions; Ca:cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; K: potássio; P: Fósforo; Sat. Base: Saturação de Bases; Sat. Al: Saturação de alumínio; % Ca: saturação de Cálcio; % Mg:saturação de magnésio; % K: saturação de potássio.

O maior valor médio do teor de Al, saturação por alumínio e acidez potencial (H+Al) promoveram variabilidade no crescimento de plantas de

algodão (Fig. 8 a). Por sua vez, pH saturação de bases, cálcio e magnésio reduziram o CV-NDVI. As variáveis que promoveram maior uniformidade no crescimento do algodoeiro tiveram correlação positiva com a produtividade de algodão (Fig. 8 b). As que tiveram correlação negativa com a produtividade foram H+Al, CTC, relação Ca/Mg e Al. Esse conjunto de variáveis mostra a sensibilidade do algodoeiro à presença de alumínio no solo e a necessidade de correção da acidez e adubação para fornecimento de cálcio, magnésio e potássio.

Silva et al. (1995) em trabalho de longa duração mostrou os efeitos negativos do alumínio no solo sobre o cultivo de algodoeiro. Quando esse elemento apresentou altos níveis no solo, houve prejuízo sobre o crescimento de raízes, na absorção de água e de nutrientes. Em outro estudo direcionado a verificar o crescimento de raízes, valores de saturação por bases acima de 50%, no qual não há alumínio disponível, proporcionou máximo crescimento radicular (Rosolem et al. 1997).

A correlação da CTC com a produtividade foi negativa, r de -0,29. Esse resultado é contrário ao obtido por Leon et al. (2003) e Guo et al. (2012). A correlação negativa com essa variável pode ser relacionada ao crescimento vegetativo em excesso em locais com valores maiores de CTC. A região analisada é caracterizada por extensas áreas de cultivo, a média dos talhões analisado foi de 107 ha. As aplicações de fertilizantes e regulador de crescimento são normalmente com dose única em toda a área aplicada. Podendo acarretar em aplicações de doses inadequadas à necessidade local, propiciando desequilíbrio entre o crescimento reprodutivo e vegetativo. Gutierrez et al (2012) ressaltam que qualquer fator que promova desequilíbrio entre o crescimento vegetativo e reprodutivo pode levar a perda de estruturas de frutificação, resultando em plantas com muita biomassa e baixa produtividade.

Os fatores que afetam o crescimento têm combinação local com cada cultura e podem ser alterados dependendo das condições climáticas experimentadas em cada estação de crescimento. Shanwad et al. (2014) demonstraram que 14 propriedades químicas do solo explicaram 64% da variabilidade na produtividade de algodão. Brooker et al. (2015) demonstram que parâmetros de solo, de crescimento do algodoeiro e da exigência da

cultura em diferentes condições climáticas podem ser modelados em escala temporal e espacial para serem utilizados em praticas de manejo.

Baio (2015) mostraram resultados adequados da aplicação de regulador de crescimento de algodão em taxa variável com uso de índice de vegetação correlacionados com parâmetros de crescimento das plantas. Outra opção de manejo da variabilidade das culturas é pela aplicação de nitrogênio e sementes em taxa variável. Diversos trabalhos têm demonstrados a possibilidade dessas praticas para milho e algodão (Mahlein et al. 2012; Holland e Schepers 2012; Bragagnolo et al. 2013; Zhou e Yin 2014).

CONCLUSÃO

A maior pluviosidade no estabelecimento da cultura aumenta a variabilidade do crescimento do algodão durante do ciclo.

O efeito da precipitação depende da fase fenológica e do tipo de solo.

No inicio do ciclo e o final da maturação a precipitação tem correlação negativa com a uniformidade do crescimento e produtividade.

Solo do tipo Gleissolo tem maior impacto da quantidade de precipitação.

Variáveis químicas do solo relacionadas ao Alumínio tem correlação negativa com a produtividade.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Anselmo, J. L., Andrade, B. G. M., da Silva, D. C., Viana, D. R., de Ávila, J., da Silva, T. R., Mudinutti, L., Teixeira, D. S., & Merloti, L. F. (2015). Ensaio comparativo de variedade de algodão em época e espaçamento distintos, Chapadão do Sul-MS (Comparative cotton variety test at different time and spacing, Chapadão do Sul-MS). *Fundação Chapadão*, 5, 18-23.
- Baio, F. H. J. (2015). Aplicação na dose certa (Application in the right rate). *Cultivar Máquina*, 8, 12-18.
- Bange, M., Milroy, S., Ellis, M., Thongbai, P. (2010). Opportunities to reduce the impact of water-logging on cotton. In: Dove H, Culvenor RA, eds. Proceedings of 15th Agronomy Conference. Lincoln, New Zealand.

- Booker, J. D., Lascano, R. J., Molling, C. C., Zartman, R. E., & Acosta-Martínez, V. (2015). Temporal and spatial simulation of production-scale irrigated cotton systems. *Precision Agriculture*, 16, 630-653.
- Boydell, B., & McBratney, A. B. (2002). Identifying potential within-field management zones from cotton-yield estimates. *Precision Agriculture*, 3, 9-23.
- Bragagnolo, J., Amado, T. J. C., Nicoloso, R. D. S., Jasper, J., Kunz, J., & Teixeira, T. D. G. (2013). Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: i-plant nutrition and dry matter production. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 1288-1298.
- Brandão, Z. N., Sofiatti, V., & da Silva, B. B. (2011). Índice de vegetação obtido por imagens de satélite como estimadores do IAF e nitrogênio do algodoeiro (Vegetation indices obtained satellite images as the LAI and nitrogen estimators in the cotton). In *XV Congresso Brasileiro de Algodão* (pp. 15-18). São Paulo: Embrapa Algodão.
- Brandão, Z. N., Grego, C. R., Inamasu, R. Y., & Jorge, L. A. (2014). Spectral reflectance of satellite images using geostatistics methods to estimate growth and cotton yield. In *XVI Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hidrology* (pp. 923920-1 - 923920-8). Amsterdam: International Society for Optics and Photonics.
- Carvalho, C. G. P. D., Arias, C. A. A., Toledo, J. F. F. D., Almeida, L. A. D., Kiihl, R. A. D. S., Oliveira, M. F. D., Hiromoto, D. M. & Takeda, C. (2003). Proposta de classificação dos coeficientes de variação em relação à produtividade e altura da planta de soja (Proposed classification of the coefficients of variation in relation to productivity and soybean plant height). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38, 187-193.
- Claverie, M., Vermote, E. F., Franch, B., & Masek, J. G. (2015). Evaluation of the Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ surface reflectance products. *Remote Sensing of Environment*, 169, 390-403.
- Dalezios, N. R., Domenikiotis, C., Loukas, A., Tzortzios, S. T., & Kalaitzidis, C. (2001). Cotton yield estimation based on NOAA/AVHRR produced NDVI. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 26, 247-251.
- Echer, F. R. (2014). O algodoeiro e os estresses abióticos (The cotton crop and abiotic stress). In F. Echer (Ed), *O algodoeiro e os estresses abióticos*:

temperatura, luz, água e nutrientes (The cotton crop and abiotic stresses: temperature, light, water and nutrients) (pp 9-13). Cuiabá, Brazil: Instituto Mato-Grossense do Algodão.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997). Manual de métodos de análises de solo (Manual methods of soil analysis). Rio de Janeiro, Brasil: Embrapa Solos.

Guo, W., Maas, S. J., & Bronson, K. F. (2012). Relationship between cotton yield and soil electrical conductivity, topography, and Landsat imagery. *Precision Agriculture*, 13, 678-692.

Gutierrez, M., Norton, R., Thorp, K. R., & Wang, G. (2012). Association of spectral reflectance indices with plant growth and lint yield in upland cotton. *Crop Science*, 52, 849-857

Holland, K. H., & Schepers, J. S. (2013). Use of a virtual-reference concept to interpret active crop canopy sensor data. *Precision Agriculture*, 14, 71-85.

Hu, S., Mo, X. (2011). Interpreting spatial heterogeneity of crop yield with a process model and remote sensing. *Ecological modelling*, 222(14), 2530-2541.

Iqbal, J., Read, J. J., & Whisler, F. D. (2013). Using remote sensing and soil physical properties for predicting the spatial distribution of cotton lint yield. *Turkish Journal of Field Crops*, 18, 158-165.

Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K.J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy*, 18, 235–265.

Koo, J., & Cindy, C. (2015). Effects of rainfall variability on maize yields. In K. Sebastian (Ed.). *Atlas of African Agriculture Research & Development* (pp. 44-45). Washington, USA: International Food Policy Research Institute.

Lamas, F. M., & Ferreira, A. C. B. (2011). Reguladores de crescimento, desfolhantes e maturadores (Growth Regulators, defoliant and ripeners). In E. C. Freire (Ed.) *Algodão no Cerrado do Brasil* (2nd E. pp. 777-790). Brasília: ABRAPA.

Leon, C. T., Shaw, D. R., Cox, M. S., Abshire, M. J., Ward, B., & Wardlaw III, M. C. (2003). Utility of remote sensing in predicting crop and soil characteristics. *Precision Agriculture*, 4, 359-384.

- Li, H., Lascano, R. J., Barnes, E. M., Booker, J., Wilson, L. T., Bronson, K. F., & Segarra, E. (2001). Multispectral reflectance of cotton related to plant growth, soil water and texture, and site elevation. *Agronomy Journal*, 93, 1327-1337.
- Mahlein, A. K., Oerke, E. C., Steiner, U., & Dehne, H. W. (2012). Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection. *European Journal of Plant Pathology*, 133, 197-209.
- Muñoz, J. D., Steibel, J. P., Snapp, S., & Kravchenko, A. N. (2014). Cover crop effect on corn growth and yield as influenced by topography. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 189, 229-239.
- Ollinger, S. V. (2011). Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. *New Phytologist*, 189, 375-394.
- Oosterhuis, D.M. (1999). Growth and development of the cotton plant. In: E. Cia; E. C. Freire, W. J., Santos,(Eds.), *Cultura do Algodoeiro* (Cotton crop) (pp. 35-55). Piracicaba, Brazil: Potafos.
- Peixoto, A. P. B., Faria, G. A., Morais, A. R. (2011). Modelos de regressão com platô na estimativa do tamanho de parcelas em experimento de conservação in vitro de maracujazeiro (Regression models with plateau in estimating the size of plots in conservation experiment vitro passionflower). *Ciência Rural*, 41, 1907-1913.
- Read, J. J.; Reddy, K. R.; & Jenkins, J. N. (2066). Yield and fiber quality of upland cotton as influenced by nitrogen and potassium nutrition. *European Journal of Agronomy*, 24, 282-290.
- Robertson, B., Bednarz, C., & Burmester, C. (2007). Growth and development: first 60 days. *Cotton Physiology Today*, 13, 1-5.
- Rosolem, C. A., Mellis, & V. van. (2010). Monitoring nitrogen nutrition in cotton. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 34, 1601-1607.
- Rosolem, C. A., Giommo, G. S., & Laurenti, R. L. B. (1997). Crescimento radicular e nutrição de cultivares de algodão em resposta à calagem (Root growth and nutrition of cotton cultivars in response to liming). In 26º Congresso Brasileiro de Ciência do Solo (pp. 150-155). Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Ryan, S. E., & Porth, L. S. (2007). A tutorial on the piecewise regression approach applied to bedload transport data (41 p.). U.S. Department of

Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins: USA.

- Salvador, A., & Antuniassi, U.R. (2011). Imagens aéreas multiespectrais na identificação de zonas de manejo em áreas de algodão para aplicação localizada de insumos (multispectral aerial images to identify management zones in cotton areas for localized application of inputs. *Revista Energia na Agricultura*, 261-19.
- Shanwad, U. K., Rajesh, N. L., Veeresh, H., Crain J., Patil, M. B., Hiremath G. M., Patil, V. C., & Khosla, R. (2014). Soil heterogeneity at the field scale: a challenge for precision agriculture in India. In Proceedings of International Symposium New-Dimensions in Agro-meteorology for Sustainable Agriculture (pp. 1-11). Pantnagar- India: India Council of Agricultural Research.
- Silva, N. M.; Carvalho, L. H.; & Quaggio, J. A. (1995). Ensaio de longa duração com calcário e cloreto de potássio na cultura do algodoeiro (Long-term test with lime and potassium chloride in cotton). *Bragantia*, 54:353-360.
- Sousa, R. P., Paulo, S. L., Silva, J. P., da Silva, J., de Oliveira, V. R., & Oliveira, A. M. D. P. (2015). Tamanho ótimo de parcela para avaliação do rendimento de grãos do girassol (Optimal size of plots for evaluation of sunflower grain yield). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19, 21-26.
- Souza, D.M.G, & Lobato, E. (2004). Cerrado: correção e adubação do solo (Savana: soil correction and fertilization). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Cerrados.: Planaltina, GO, Brazil:
- Stadler, A., Rudolph, S., Kupisch, M., Langensiepen, M., van der Kruk, J., & Ewert, F. (2015). Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements. *European journal of agronomy*, 64, 8-20.
- Thenkabail, P. S., Smith, R. B., & de Pauw, E. (2000). Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote sensing of Environment*, 71, 158-182.
- Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M., & Challinor, A. J. (2014). Climate variability and vulnerability to climate change: a review. *Global change biology*, 20, 3313-3328.

- Tomquelski, G. V. (2013). Pragas em algodoeiro na região dos Chapadões (Pests in cotton in the region of Chapadões). *Fundação Chapadão*, 5, 07-32.
- Venteris, E. R., Tagestad, J. D., Downs, J. L., & Murray, C. J. (2015). Detection of anomalous crop condition and soil variability mapping using a 26 year Landsat record and the Palmer crop moisture index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 160-170.
- Vieira, S. R., & Paz Gonzalez, A. (2003). Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. *Bragantia*, 62, 127-138.
- Wanjura, D. F., Upchurch, d. R., Maas, S. J., & Winslow, J. C. (2003). Spectral detection of emergence in corn and cotton. *Precision Agriculture*, 4, 385-399.
- Wiens, J. A., Stralberg, D., Jongsomjit, D., Howell, C. A., & Snyder, M. A. (2009). Niches, models, and climate change: assessing the assumptions and uncertainties. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 106, 19729–19736.
- Yang, C., Everitt, J. H., & Bradford, J. M. (2009). Evaluating high resolution SPOT 5 satellite imagery to estimate crop yield. *Precision agriculture*, 10, 292-303.
- Yang, C., & Everitt, J. H. (2012). Using spectral distance, spectral angle and plant abundance derived from hyperspectral imagery to characterize crop yield variation. *Precision agriculture*, 13, 62-75.
- Yang, C., Odvody, G. N., Fernandez, C. J., Landivar, J. A., Minzenmayer, R. R., & Nichols, R. L. (2015). Evaluating unsupervised and supervised image classification methods for mapping cotton root rot. *Precision Agriculture*, 16, 201-215.
- Yeates, S. J.; Constable, G. A.; & Mccumstie, T. (2010). Irrigated cotton in the tropical dry season. II. Biomass accumulation, partitioning and RUE. *Field Crops Research*, 116, 290-299.
- Zarco-Tejada, P. J., Ustin, S. L., & Whiting, M. L. (2005). Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agronomy Journal*, 97, 641-653.

- Zhao, D., Reddy, K. R., Kakani, V. G., Read, J. J., and Koti, S. (2007). Canopy reflectance in cotton for growth assessment and lint yield prediction. *European Journal of Agronomy*, 26(3), 335-344.
- Zeng, C., Shen, H., & Zhang, L. (2013). Recovering missing pixels for Landsat ETM+ SLC-off imagery using multi-temporal regression analysis and a regularization method. *Remote Sensing of Environment*, 131, 182-194.
- Zheng, G., & Moskal, L. M. (2009). Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors. *Sensors*, 9, 2719-2745.
- Zeng, L., Meredith Jr, W. R., Campbell, B. T., Dever, J. K., Zhang, J., Glass, K. M., & Bourland, F. M. (2014). Genotype-by-environment interaction effects on lint yield of cotton cultivars across major regions in the US cotton belt. *Journal Cotton Science*, 18, 75-84.
- Zhou, G., Yin, X. (2014). Relationship of cotton nitrogen and yield with Normalized Difference Vegetation Index and plant height. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 100, 147-160.