



## Desempenho de índices de vegetação na avaliação da resposta do algodoeiro à adubação nitrogenada

**Rodrigo Gonçalves Trevisan** <sup>(1)</sup>; **Mateus Tonini Eitelwein** <sup>(1)</sup>; **Gustavo Portz** <sup>(1)</sup>;  
**Natanael de Santana Vilanova Júnior** <sup>(1)</sup>; **José Paulo Molin** <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Pós-graduando em Engenharia de Sistemas Agrícolas; Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo (ESALQ – USP); rodrigoagronomia@hotmail.com; <sup>(2)</sup> Professor Associado III; ESALQ – USP.

**RESUMO:** O diagnóstico do status nutricional do algodoeiro pode ser realizado em tempo real e com alta resolução espacial por meio do uso de sensores de dossel. Existe, entretanto, a necessidade de uso de índices adequados às condições edafoclimáticas de desenvolvimento da cultura. O objetivo desse trabalho foi avaliar o desempenho de índices de vegetação obtidos por sensores ativos de dossel em estimar a resposta do algodoeiro ao nitrogênio aplicado em cobertura. Quatro índices de vegetação foram correlacionados com doses de nitrogênio (N) variando de 0 a 300 kg ha<sup>-1</sup>, além da condutividade elétrica aparente do solo (CE<sub>a</sub>). O índice de vegetação que apresentou maior capacidade em prever a resposta do algodoeiro à adubação nitrogenada foi o índice de clorofila terrestre MERIS (MTCI), com coeficiente de correlação máximo de 0,76 aos 60 dias após a emergência. O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) apresentou as maiores correlações com a CE<sub>a</sub> e as menores correlações com a dose de N dentre os índices avaliados.

**Termos de indexação:** Agricultura de precisão, sensores ativos de dossel, condutividade elétrica aparente do solo.

### INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) é um dos nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas. No algodoeiro estimula o crescimento e o florescimento, regulariza o ciclo da planta, aumenta a produtividade e melhora o comprimento e a resistência da fibra, desde que fornecido em doses adequadas. Entretanto, quando aplicado em excesso pode causar desequilíbrio nutricional que causa aumento no crescimento vegetativo da planta em detrimento da produção e a formação tardia das estruturas reprodutivas do algodoeiro (Staut *et al.*, 2002).

Uma técnica que vem sendo desenvolvida para permitir o diagnóstico do status nutricional da cultura em tempo real e com alta resolução espacial é o uso de sensores de dossel. Esses sensores foram concebidos a partir do estudo das curvas espectrais de vegetação, que relacionam a proporção de luz que é refletida em função do comprimento da onda eletromagnética.

Historicamente, diferentes comprimentos de onda e funções matemáticas têm sido usados para relacionar os dados dos sensores a parâmetros culturais de interesse agrônomo (Jordan, 1969). Especialmente em relação à predição do conteúdo de clorofila e de N na planta, merecem destaque os trabalhos com a utilização de comprimentos de onda no limiar entre o vermelho e o infravermelho próximo. Esta porção do espectro entre 650 e 800 nm é conhecida como “red-edge” e é definida como o comprimento de onda com a maior taxa de variação da reflectância (Horler *et al.*, 1983).

Entretanto, não há um consenso sobre o melhor índice para todos os parâmetros de interesse em todas as culturas. Melhores resultados são observados em experimentos que contemplem as condições edafoclimáticas de desenvolvimento da cultura.

Diante disso, o objetivo desse trabalho foi avaliar o desempenho de índices de vegetação obtidos por sensores ativos de dossel em estimar a resposta do algodoeiro ao nitrogênio aplicado em cobertura.

### MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na safra de algodão 2015, no município de Campo Verde – MT, nas coordenadas 15°14'20" S e 54°57'54" O. O solo predominante na área é classificado como Neossolo Quartzarênico (Santos *et al.*, 2013), com teores médios de 880 g kg<sup>-1</sup> de areia, 20 g kg<sup>-1</sup> de silte e 100 g kg<sup>-1</sup> argila. A análise química (0-0,20 m) resultou em valores de 4,6 para o pH em CaCl<sub>2</sub>, 18 g dm<sup>-3</sup> de matéria orgânica do solo, 39 mg dm<sup>-3</sup> de P (Resina), 4 mg dm<sup>-3</sup> de S, 1,6 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de K, 11 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de Ca, 2 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de Mg, 2 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de Al, 36,6 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de CTC e 40% de saturação por bases.

A semeadura foi realizada no dia 17/01/2015, em sistema de semeadura direta sobre palhada de soja. Utilizou-se a cultivar de algodão TMG 81 WS, semeada no espaçamento de 0,45 m entre fileiras, e população final de 200.000 plantas ha<sup>-1</sup>. No dia seguinte a semeadura, realizou-se a aplicação a lanço de 100 kg ha<sup>-1</sup> do fertilizante NPK 12-46-00. Foram realizadas duas adubações potássicas de cobertura, aplicando-se 45 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O em cada, usando como fonte o Cloreto de Potássio.



A adubação nitrogenada de cobertura foi parcelada em quatro aplicações, usando como fontes o Sulfato de Amônio nas duas primeiras e a Ureia nas duas últimas. As doses médias aplicadas foram 30 kg ha<sup>-1</sup> de N aos 21 e 36 dias após a emergência (DAE) e 45 kg ha<sup>-1</sup> de N aos 48 e 60 DAE, variando-se de 0 ao dobro da dose média.

As condições climáticas foram adequadas ao desenvolvimento da cultura e foram observadas chuvas de pelo menos 20 mm em no máximo 48 h após cada aplicação de N. As demais práticas culturais e de controle fitossanitário foram as usualmente empregadas na propriedade, seguindo as recomendações para a cultura.

A área experimental utilizada foi de 17 ha, divididos em seis blocos. Cada bloco apresentou dimensões de 73,44 m, equivalente à largura de três faixas de aplicação, e 400 m de comprimento, o que permitiu a recomendação de 80 doses diferentes de nitrogênio total em cobertura, variando-se linearmente de 0 a 300 kg de N ha<sup>-1</sup>. As doses foram distribuídas nos blocos com valores crescentes ou decrescente de forma alternada, sem haver aleatorização.

Os dados de condutividade elétrica aparente do solo (CE<sub>a</sub>) foram obtidos através do sensor modelo Veris 3100, que efetuou o levantamento da área no dia anterior ao plantio, utilizando largura das faixas de 12 m, velocidade de 4 m s<sup>-1</sup> e taxa de aquisição de 1 Hz. Os dados coletados referem-se à camada de 0 – 0,3 m e foram georreferenciados com auxílio de um receptor de sistema de navegação global por satélites (GNSS), o que produziu cerca de 200 pontos ha<sup>-1</sup>.

Os índices de vegetação foram obtidos por coletas de dados realizadas com o sensor ativo de dossel CropCircle modelo ACS 430. O sensor utiliza um conjunto de LED's policromáticos como fonte luminosa e possui receptores para quantificar a radiação refletida pelo dossel cultural em três comprimentos de onda: vermelho (670 nm), "red edge" (730 nm) e infravermelho próximo (780 nm).

Os sensores foram montados sobre um distribuidor de fertilizantes autopropelido, usando-se quatro sensores, distantes 2,7 e 3,4 m para a esquerda e para a direita do centro da máquina. Manteve-se uma altura média de 1,2 m entre o sensor e o topo do dossel cultural. A velocidade média de deslocamento da máquina foi de 5 m s<sup>-1</sup> e a largura das faixas adotada foi de 24,48 m.

Cada sensor foi configurado para coletar dados a 5 Hz, sendo a posição da coleta georreferenciada com auxílio de um receptor GNSS com tecnologia Real Time Kinematic (RTK). Esse procedimento de

coleta produziu cerca de 1.600 pontos ha<sup>-1</sup>. Os valores de reflectância coletados pelos sensores foram então utilizados para calcular os índices de vegetação descritos na **Tabela 1**.

**Tabela 1.** Descrição dos índices de vegetação utilizados.

Índice <sup>(1)</sup>	Bandas	Fórmula
NDRE	780, 730	$(R_{780} - R_{730}) / (R_{780} + R_{730})$
NDVI	780, 670	$(R_{780} - R_{670}) / (R_{780} + R_{670})$
CCCI	780, 730, 670	NDVI / NDRE
MTCI	780, 730, 670	$(R_{780} - R_{730}) / (R_{730} - R_{670})$

<sup>(1)</sup> NDRE: Índice de vegetação por diferença normalizada pelo "red-edge" (Horler *et al.*, 1983); NDVI: Índice de vegetação por diferença normalizada (Jordan, 1969); CCCI: Índice do conteúdo de clorofila no dossel (Barnes *et al.*, 2000); MTCI: Índice de clorofila terrestre MERIS (Dash & Curran, 2004);

Todos os dados foram interpolados em uma superfície regular, com pixels medindo 5 m no sentido de deslocamento da máquina e 12,24 m de largura, usando-se o pacote gstat no software estatístico R, versão 3.1.3 (R Core Team, 2015). As análises foram então executadas com os valores de todas as variáveis em cada pixel.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de correlação linear entre a CE<sub>a</sub> e os índices de vegetação (**Tabela 2**), revelou que o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) foi o índice que mais se correlacionou com a CE<sub>a</sub>, em todas as avaliações realizadas. A textura arenosa da área e os baixos valores de CE<sub>a</sub> contribuem para que pequenos incrementos nos valores de CE<sub>a</sub> representem às plantas um ambiente mais adequado ao seu desenvolvimento, produzindo plantas mais vigorosas e com maior acúmulo de biomassa, o que está diretamente relacionado ao NDVI. O índice de vegetação por diferença normalizada do "red-edge" (NDRE) apresentou comportamento semelhante, porém com coeficientes de correlação inferiores.

**Tabela 2.** Coeficiente de correlação linear entre a condutividade elétrica aparente do solo e índices de vegetação obtidos por sensor ativo de dossel.

IV <sup>(1)</sup>	26 DAE	42 DAE	60 DAE	88 DAE
NDRE	0,30	0,41	0,46	0,51
NDVI	0,43	0,49	0,49	0,52
CCCI	-0,36	-0,47	0,22	0,39
MTCI	-0,34	-0,29	0,38	0,46

<sup>(1)</sup> IV: Índice de vegetação; DAE: Dias após a emergência;

O índice do conteúdo de clorofila no dossel (CCCI) e o índice de clorofila terrestre MERIS (MTCI), exibiram comportamento inverso aos demais nas duas primeiras avaliações. Esses índices buscam relacionarem-se com o teor de clorofila do dossel, indiferentes ao volume de biomassa. Assim, inicialmente os teores de clorofila nas regiões de alta  $CE_a$  podem ser menores, pois o N disponível está diluído num volume maior de biomassa, entretanto com o passar do tempo a maior disponibilidade de N nos locais com maior  $CE_a$  leva ao incremento da concentração foliar, e as correlações passam a ser positivas.

Na análise de correlação linear entre a dose de N aplicada e os índices de vegetação (Tabela 3), observa-se que na primeira avaliação nenhum índice apresentou coeficientes de correlação significativos, o que indica que a alocação das doses de N foi adequada, não sendo relacionada à variabilidade pré-existente. Na segunda avaliação o índice que apresentou melhor desempenho em diferenciar as doses de N foi o NDRE.

**Tabela 3.** Coeficiente de correlação linear entre as doses de nitrogênio aplicado em cobertura e índices de vegetação obtidos por sensor ativo de dossel.

IV <sup>(1)</sup>	26 DAE	42 DAE	60 DAE	88 DAE
NDRE	0,02	0,45	0,68	0,61
NDVI	0,01	0,35	0,57	0,49
CCCI	0,03	0,02	0,72	0,69
MTCI	0,03	0,27	0,76	0,68

<sup>(1)</sup> IV: Índice de vegetação; DAE: Dias após a emergência;

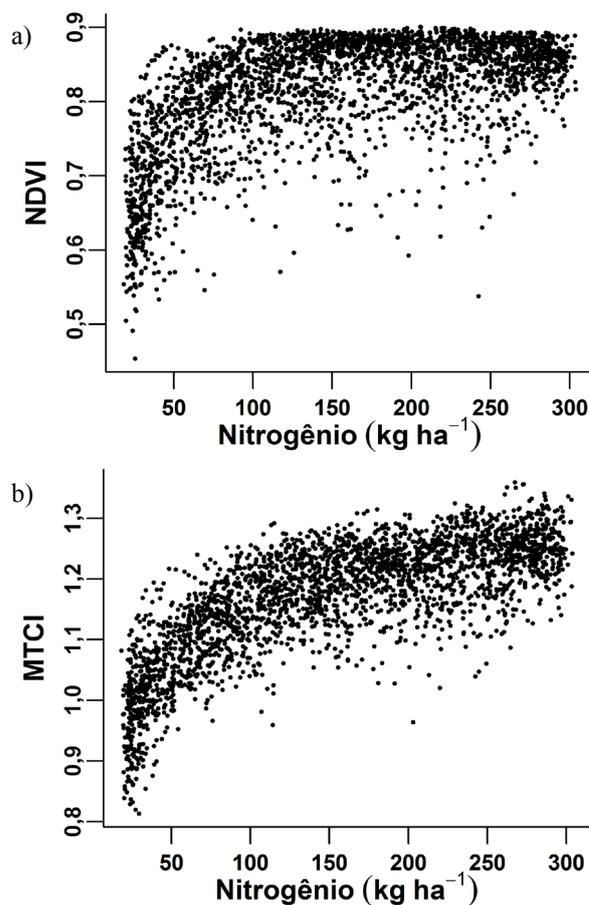
Nas duas últimas avaliações o MTCI e o CCCI apresentaram desempenho superior aos demais, chegando ao valor de correlação máximo de 0,76 entre a dose de N aplicada e o MTCI aos 60 DAE. De modo geral, o NDVI apresentou as menores correlações com as doses de N aplicadas, o que está de acordo com o que foi discutido quanto a relação entre NDVI e  $CE_a$ , por se tratar de um índice com alta correlação com biomassa e vigor vegetativo.

Embora as aplicações de N em cobertura no algodoeiro sejam normalmente realizadas até os 60 DAE, esta avaliação aos 88 DAE é importante para avaliar o resultado da última aplicação de N que foi realizada e permite estudar melhor o comportamento dos índices em condições de elevadas quantidades de biomassa da cultura, principalmente no que diz respeito aos efeitos de saturação do sinal dos sensores.

Observa-se que aos 60 DAE (Figura 1.a) o NDVI foi capaz de diferenciar as doses de N até aproximadamente 100 kg ha<sup>-1</sup>, enquanto entre 100 e

300 kg ha<sup>-1</sup> os valores estão concentrados próximo a 0,9 e não se observa incremento do NDVI com o aumento da dose de N aplicada. Esse comportamento é conhecido como saturação do sinal e ocorre devido à presença de quantidades elevadas de biomassa na cultura.

AMARAL & MOLIN (2014), observaram efeito semelhante na cultura da cana-de-açúcar, principalmente após as plantas superarem os 60 cm de altura de palmito.



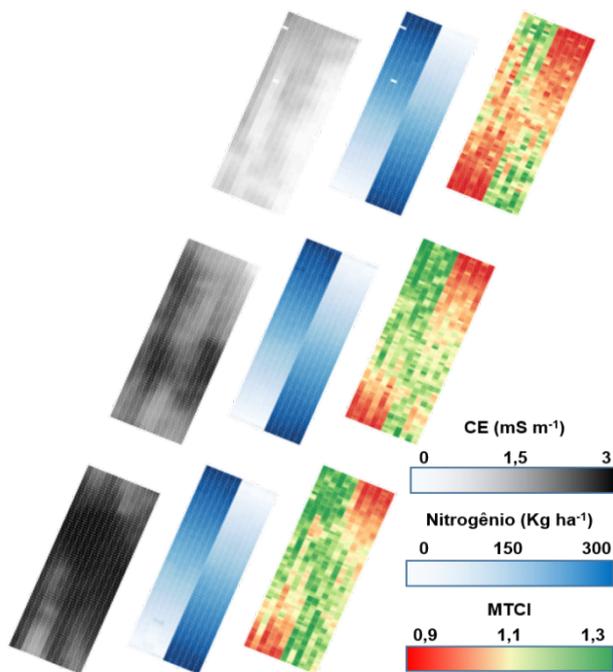
**Figura 1.** Relação das doses de nitrogênio aplicadas em cobertura no algodoeiro com (a) o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e (b) o índice de clorofila terrestre MERIS (MTCI) aos 60 dias após a emergência da cultura.

Por outro lado, o MTCI (Figura 1.b), apresenta uma relação com a dose de N aplicada semelhante ao que é descrito na lei dos incrementos decrescentes (Mitscherlich, 1909, *apud* Brorsen & Richter, 2012), segundo a qual ao se adicionar doses crescentes de um nutriente, o maior incremento em produção é obtido com a primeira dose. Com aplicações sucessivas do nutriente, os incrementos de produção são cada vez menores.



Dessa forma, o MTCl foi capaz de diferenciar as doses de N mesmo quando esta foi maior que os valores normalmente empregados no algodoeiro, não exibindo as limitações descritas para o NDVI quanto a saturação. Resultados semelhantes foram observados por Shiratsuchi, *et al.* (2011), trabalhando com milho nos Estados Unidos. Segundo eles o MTCl apresentou boa capacidade de diferenciar doses de N e foi menos afetado pelo estresse hídrico que os outros índices avaliados.

A correlação entre o MTCl e as doses de N aplicadas é evidenciada na análise visual da distribuição espacial dessas variáveis (**Figura 2**). Também é possível observar a correlação entre o MTCl e a  $CE_a$ , notando-se que nos dois blocos superiores os valores da  $CE_a$  são inferiores, e que nesses locais os valores de MTCl estão abaixo do valor médio, mesmo onde doses altas de N foram aplicadas, o que não ocorre nos dois blocos inferiores, onde a  $CE_a$  é maior.



**Figura 2.** Mapas da distribuição espacial da condutividade elétrica aparente do solo ( $CE_a$ ), das doses de nitrogênio aplicado em cobertura e do MTCl aos 60 dias após a emergência do algodoeiro.

## CONCLUSÕES

O índice de vegetação que apresentou maior capacidade em prever a resposta do algodoeiro à adubação nitrogenada foi o índice de clorofila terrestre MERIS (MTCl), com coeficiente de correlação máximo de 0,76 aos 60 dias após a emergência. O índice de vegetação por diferença

normalizada (NDVI) apresentou as maiores correlações com a condutividade elétrica do solo e as menores correlações com a dose de nitrogênio dentre os índices avaliados.

## AGRADECIMENTOS

Ao Grupo Bom Futuro pela disponibilização das áreas e apoio na realização dos experimentos.

## REFERÊNCIAS

AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P. The effectiveness of three vegetation indices obtained from a canopy sensor in identifying sugarcane response to nitrogen. *Agronomy Journal*, 106(1), 273-280. 2014.

BARNES, E. M.; *et al.* Coincident detection of crop water stress, nitrogen status, and canopy density using ground-based multispectral data. In Proc. 5th Intl. Conference on Precision Agriculture. Madison, Wisc.: ASA-CSSA-SSSA. 2000.

DASH, J.; CURRAN, P. J. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *International Journal of Remote Sensing*, 25:23, 5403-5413, 2004.

SANTOS, H. G. *et al.* (Eds.). Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: Embrapa, 3.ed., 2013. 353p.

MITSCHERLICH E. A. Des Gesetz des Minimums und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. *Landwirsch Jahrb*, 3, 537-552. 1909. Citado por: BRORSEN, B. W.; RICHTER, F. G. C. Experimental designs for estimating plateau-type production functions and economically optimal input levels. *Journal of Productivity Analysis*, 38(1), 45-52. 2012.

HORLER, D. N. H.; DOCKRAY, M.; BARBER, J. The red-edge of plant leaf reflectance. *Int. J. Remote Sensing*, v. 4, p. 273-288. 1983.

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

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2015.

SHIRATSUCHI, L. *et al.* Water and nitrogen effects on active canopy sensor vegetation indices. *Agronomy Journal*, 103(6), 1815-1826. 2011.

STAUT, L. A. *et al.* Adubação nitrogenada em cobertura na cultura do algodoeiro em sistema plantio direto. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2002. 4p. (Comunicado Técnico, 67)