



Utilização de sensor óptico ativo para detectar deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro¹

Anamari V. de A. Motomiya²; José P. Molin³ & Ederaldo J. Chiavegato³

RESUMO

Visou-se com este trabalho, avaliar, em condições de campo, o efeito da variação de doses de nitrogênio na detecção do teor de nitrogênio foliar do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L. var. latifolium Hutch), utilizando-se propriedades de reflectância obtidas por um sensor óptico ativo. O delineamento experimental foi o aleatorizado em blocos, com cinco tratamentos (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N) e quatro repetições. Os dados do Índice de Vegetação Diferença Normalizada (NDVI) e da razão simples vermelho/infravermelho próximo (V/IVP) foram coletados no período de 23 a 92 dias após a emergência (DAE) totalizando nove datas de coleta; coletaram-se também dados referentes ao índice de clorofila, índice de área foliar (IAF) e altura de plantas. Os valores do NDVI apresentaram tendência crescente ao longo do período das leituras, enquanto a relação V/IVP teve comportamento inverso e, a partir de 45 DAE, foram afetados significativamente pelas doses de N aplicadas. Relações significativas foram observadas entre os valores do NDVI, índice de clorofila e IAF; aos 92 DAE o NDVI apresentou relação linear positiva e altamente significativa com o teor foliar de N. O sensor utilizado pode ser uma ferramenta efetiva para estimar a deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro.

Palavras-chave: agricultura de precisão, NDVI, estado nutricional

Use of an active optical sensor to detect leaf nitrogen deficiency in cotton

ABSTRACT

This study aimed to evaluate, under field conditions, the effect of variation in levels of nitrogen fertilization on the detection of nitrogen content in cotton (*Gossypium hirsutum* L. var. latifolium Hutch) leaves using reflectance properties registered by an active optical sensor. The experiment was conducted in randomized blocks and treatments consisted of five levels of nitrogen (0, 50, 100, 150 and 200 kg of N ha⁻¹) with four replications. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the ratio Red/Near infrared (RED/NIR) data were collected 23 to 92 days after the emergence (DAE), with the total of 9 dates. Data referring to the chlorophyll index, leaf area index (LAI) and plant height were also collected. The values of NDVI presented a tendency to increase along the period, while Red/NIR presented an inverse trend, being significantly affected by the rates of applied N starting from 45 DAE. At 92 DAE, NDVI presented a positive linear relationship with N contents of leaves. Significant relationships were observed between the values of NDVI and chlorophyll index and LAI. The sensor may be a potential tool for nitrogen deficiency detection in cotton.

Key words: precision agriculture, NDVI, nutritional state

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada à USP/ESALQ

² Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Bolsista FUNDECT/MS. Rod. MS 306, km 6, CEP 79540-000, Cassilândia, MS. Fone: (67) 3596-2021. E-mail: anamari.v@uol.com.br

³ ESALQ/USP, CP 9, CEP 13418-900, Piracicaba, SP. Fone: (19) 3447-8502. E-mail: jpmolin@esalq.usp.br; (19) 3429-4115. E-mail: ejchiave@esalq.usp.br

INTRODUÇÃO

Dentre as espécies de algodoeiro cultivadas no Brasil, o algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum* var. *latifolium* Hutch) merece destaque não apenas pelo volume e valor da produção mas também pela elevada utilização de insumos como corretivos e fertilizantes, herbicidas, inseticidas, fungicidas e reguladores de crescimento. Em termos de custos de produção, a utilização de fertilizantes e corretivos é responsável por 30% do custo com insumos e cerca de 15% do custo total de produção da cultura (Carvalho & Ferreira, 2006). Nos últimos anos, o Brasil passou de importador a exportador de algodão, com reflexos significativos no mercado mundial.

A utilização de grandes quantidades de insumos, por um lado, tem aumentado a produtividade das culturas; por outro, pode ter efeitos danosos ao meio ambiente; ante este dilema, a aplicação regionalizada de insumos, de acordo com as necessidades específicas dentro de uma lavoura, permite a otimização na utilização de insumos sem prejuízos à produtividade mas respeitando o equilíbrio ambiental. A adoção de técnicas racionais de uso de insumos vai além do propósito de se obter lucro ou evitar prejuízos, haja vista que possibilita um controle da quantidade de insumos que estão sendo lançados no meio ambiente. Aplicação de doses mais precisas de fertilizantes, por exemplo, permite que a planta tenha, à sua disposição, a quantidade de que ela realmente necessita, sem excessos ou faltas, e que esta, então, possa expressar ao máximo seu potencial produtivo.

O nitrogênio é um dos insumos que têm freqüentemente causado problemas de mau uso, devido à variabilidade dos processos de mineralização, lixiviação, desnitrificação e absorção pela cultura (Booij et al., 2001). Em geral, este nutriente é considerado fator limitante para a produtividade do algodoeiro, tanto em áreas irrigadas como no cultivo de sequeiro; entretanto, aplicações excessivas podem reduzir a produção e a qualidade da fibra (Hutmacher et al., 2004). Segundo Staut & Kurihara (2001), o nitrogênio é fundamental no desenvolvimento da planta, principalmente dos órgãos vegetativos; quando em doses adequadas, estimula o crescimento e o florescimento, regulariza o ciclo da planta, aumenta a produtividade e melhora o comprimento e a resistência da fibra e, em doses elevadas, verifica-se um aumento no desenvolvimento vegetativo da planta em detrimento da produção e formação tardia dos frutos do algodoeiro. Cisneros & Godfrey (2001) salientaram que o excesso de N pode afetar indiretamente a qualidade das fibras pelo aumento da infestação de pulgões (*Aphis gossypii* Glover), os quais, segundo Slosser et al. (1999), prejudicam a desfolha e podem causar problemas de pegajosidade no algodoeiro em virtude das secreções açucaradas liberadas por este inseto.

A deficiência de nitrogênio causa mudanças previsíveis no desenvolvimento e composição das folhas das plantas e, indiretamente, mudanças na distribuição espectral de radiação refletida pelas folhas de plantas deficientes (Tarpley et al., 2000). O monitoramento do status de nitrogênio em uma cultura, é um pré-requisito para a aplicação de fertilizante com precisão temporal e, segundo Read et al. (2003), as

mudanças no estado nutricional do algodoeiro podem ser determinadas diretamente em laboratório, por análise química de amostras de tecido, ou indiretamente no campo, medindo a reflectância foliar em estreitos comprimentos de onda; em parte, isto ocorre porque a reflectância na região visível do espectro eletromagnético (300-700 nm) varia em função da concentração de clorofila na folha, a qual está relacionada com o nitrogênio foliar.

Sui et al. (1998) desenvolveram um sensor óptico para diagnose de sanidade de plantas de algodoeiro. O sensor mede a reflectância do dossel nas bandas do visível e do IVP. Os resultados mostraram que a reflectância do dossel de algodoeiro foi fortemente correlacionada com a produtividade e estresse de nitrogênio. Fridgen & Varco (2004) consideraram que a aplicação de diferentes doses de nitrogênio induziu a uma ampla variação na concentração de nitrogênio foliar com um aumento efetivo na concentração de clorofila; desta forma, a distinção de plantas deficientes em nitrogênio pode ser detectada pela reflectância foliar na faixa do visível ao infravermelho próximo, desde que nenhum outro nutriente esteja em falta na cultura.

Quando as plantas estão sujeitas a estresses, ocorre aumento nas concentrações de carotenóides e redução na produção de clorofila, o que causa menor absorção de energia pelas folhas e, portanto, um aumento na reflectância visível e assim a planta aparecerá amarela ou clorótica, devido ao aumento das concentrações de carotenóides (Young & Britton, 1990 apud Ferri, 2002). Clorofilômetros manuais determinam com rapidez o conteúdo de clorofila nas folhas e permitem estimar o estado nutricional de uma cultura para aplicações eficientes de fertilizantes nitrogenados. Como a maior parte do N foliar está contida nas moléculas de clorofila, há uma estreita relação entre N foliar e conteúdo de clorofila. Vários estudos ilustram altas correlações entre leituras de clorofilômetros manuais e concentrações de N foliar em algodoeiro (Malavolta et al., 2004; Neves et al., 2005).

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar, em condições de campo, o efeito da variação de doses de nitrogênio na detecção do teor de nitrogênio foliar utilizando-se um medidor portátil de clorofila e propriedades de reflectância obtida com o uso de um sensor óptico ativo.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na área experimental do Departamento de Produção Vegetal da USP/ESALQ, em Piracicaba, SP, com coordenadas geográficas 22° 42' 30" S e 47° 38' 00" W, altitude média de 546 m e relevo suave ondulado. O solo da área de estudo pertence à classe Nitossolo Eutrófico, textura argilosa.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos aleatorizados, com cinco tratamentos e quatro repetições, totalizando 20 parcelas; cada parcela, com quatro linhas de plantas, teve as dimensões de 3,6 x 5,0 m (área total de 18 m²). Os dados foram coletados em duas linhas centrais de 4,0 m de comprimento descartando-se uma linha de bordadura de cada lado da parcela e 0,5 m nas outras duas extremidades.

Utilizou-se a cultivar Delta Opal, a qual, segundo Beltrão (2003) é altamente produtiva, podendo atingir produtividade de 5700 kg ha⁻¹ em agricultura empresarial; tem ciclo entre 140 a 210 dias, dependendo do ambiente, e elevado rendimento de fibras; é susceptível à ramulária, resistente a viroses e medianamente resistente a ramulose. A semeadura foi realizada manualmente, em espaçamento de 0,90 m, no dia 14/03/2006; a adubação de semeadura foi realizada de acordo com a análise do solo, aplicando-se o correspondente a 250 kg ha⁻¹ da fórmula 8-28-16; por outro lado, os tratamentos fitossanitários e demais tratamentos culturais foram realizados para garantir o bom desenvolvimento das plantas, de maneira uniforme em todos os tratamentos; a emergência das plantas ocorreu no dia 20/03/06.

Os tratamentos consistiram das doses de N de 0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹, aplicadas em cobertura e parceladas em três aplicações utilizando-se, como fonte, o fertilizante uréia; as adubações em cobertura com uréia foram realizadas nos dias 11/04, 26/04 e 10/05 de 2006, respectivamente aos 22, 37 e 45 dias após a emergência das plantas (DAE) sempre seguidas de incorporação do adubo e irrigação; realizou-se, aos 23 DAE, o ajuste do estande a fim de se obter 10 pl m⁻¹ linear.

As leituras do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI) e da razão simples vermelho/infravermelho próximo (V/IVP) foram realizadas no período de 23 a 92 dias, após a emergência (DAE), totalizando 9 datas de coleta de dados e se utilizando um sensor óptico ativo comercial (GreenSeeker Hand Held™, NTech Industries, Inc., Ukiah, CA), que emite luz no comprimento de onda do vermelho (660 nm) e do infravermelho próximo (770 nm), mede a luz refletida pelas plantas e calcula automaticamente o NDVI. O sensor foi desenvolvido para coletar dados a uma altura variável entre 0,80 e 1,20 m de distância do alvo, com largura constante de 61 cm. De acordo com o fabricante, neste intervalo o sensor é insensível à variação na altura, não alterando o valor do NDVI.

Os sensores utilizados pelo sensoriamento remoto são dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética em determinada faixa do espectro eletromagnético e gerar informações que possam ser transformadas em um produto passível de interpretação, quer seja na forma de imagem, na forma gráfica ou de tabelas. Os sistemas sensores são formados, basicamente, de uma parte óptica (coletor), constituída por lentes e espelhos, que tem o objetivo de captar e direcionar a energia proveniente dos alvos para os detectores. Quando o sistema sensor emite radiação e após ter interagido com o alvo, capta a parte que voltou, o sistema é denominado ativo, por possuir sua própria fonte de radiação; caso em que o sensor pode operar durante o dia ou à noite (Moreira, 2001).

As leituras com o clorofilômetro foram realizadas na quinta folha completamente expandida a partir do ápice das plantas em 10 plantas por parcela, aos 45, 53, 60 e 85 DAE. O medidor de clorofila mede o tom de verde da folha, o qual é afetado por vários fatores, sendo o principal o teor de N na planta; o equipamento utilizado foi o SPAD-502, Minolta, que calcula o índice de clorofila pela razão entre dois com-

primentos de onda transmitidos a 650 nm (vermelho) e 940 nm (IVP).

As medidas do índice de área foliar (IAF) foram realizadas por meio de um método não destrutivo, utilizando-se o equipamento "Plant Canopy Analyzer", modelo LAI-2000 (LI-COR, Inc., Lincoln, Nebraska, EUA). Para estimar o IAF, as medidas de radiação difusa, acima e abaixo do dossel do algodoeiro, foram tomadas nas mesmas posições dentro das parcelas, em três pontos preestabelecidos.

Realizou-se a amostragem de tecido foliar aos 92 DAE, com a cultura iniciando o estágio de florescimento, através de uma amostra composta de 20 folhas por parcela, para determinação dos teores de nitrogênio, conforme métodos descritos por Malavolta et al. (1997). Ressalta-se que o início do florescimento ocorreu aos 92 DAE devido a semeadura tardia da cultura.

Para as análises estatísticas utilizou-se o programa SAS (1998). O efeito dos tratamentos e da relação entre as variáveis foi avaliado por meio de análise de variância, verificando-se a significância pelo teste F de Snedecor, análise de regressão e correlação linear de Pearson.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Relação entre teor foliar de N e doses aplicadas

Devido às baixas temperaturas durante o período de condução do experimento, as plantas apresentaram desenvolvimento lento, não atingindo o florescimento pleno até os 92 DAE. Edmisten (2008) destacou que o crescimento vegetativo e reprodutivo do algodoeiro está fortemente relacionado à temperatura, quando encontra umidade adequada no solo. Segundo Albers (2005), o crescimento da planta do algodoeiro depende da combinação de três fatores: da radiação solar, utilizada por folhas saudáveis para a produção de carboidratos; da temperatura, para um rápido desenvolvimento da planta e do sistema radicular saudável para absorção de nutrientes necessários para a estrutura básica das plantas e para o desenvolvimento de novas estruturas.

Na Figura 1 é possível observar o comportamento quadrático do teor de N no tecido foliar aos 92 DAE, em relação às doses de N aplicadas. Os teores foliares médios de N foram baixos nas doses de 0 e 50 kg ha⁻¹ de N, enquanto nas

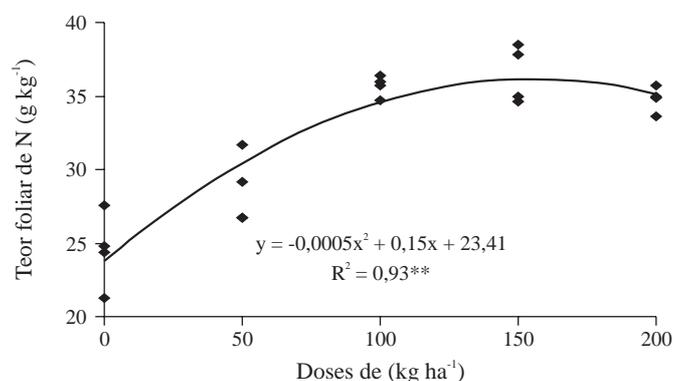


Figura 1. Relação entre doses de N aplicadas e teores foliares de N, aos 92 DAE

demais se mantiveram dentro da faixa de teores adequados (35-43 g kg⁻¹), segundo critérios estabelecidos por Silva (1999). Fazendo-se a derivada da equação de regressão, obtém-se o ponto de máximo teor foliar de N (34,66 g kg⁻¹) exatamente quando aplicada a dose de 150 kg ha⁻¹ de N em cobertura.

Relações entre NDVI, V/IVP, índice de clorofila e IAF com doses de N aplicadas

As relações entre as doses de N aplicadas e a resposta da cultura através do NDVI, V/IVP, índice de clorofila e IAF, são apresentadas na Tabela 1. Os valores do coeficiente de variação (CV) para o NDVI foram baixos e indicaram tendência de diminuição com o decorrer do experimento, com valor máximo de 9,8 aos 23 DAE e mínimo de 1,4 aos 85 DAE. A razão simples V/IVP apresentou valores de CV crescentes ao longo do período e, geralmente, maiores que os do NDVI, exceto na primeira leitura (CV de 7,24%), embora os valores tenham permanecido sempre abaixo de 20% (exceto na 4ª leitura, quando o CV chegou a 20,4%). Embora o sensor óptico

Tabela 1. Média geral, coeficiente de variação (CV) e relação entre doses de nitrogênio aplicadas e leitura do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), razão simples vermelho/infravermelho próximo (V/IVP), índice de clorofila e índice de área foliar (IAF)

DAE	média	CV(%)	equação	R ²
NDVI				
23	0,339	9,8	y = -5E-05x + 0,3436	0,05 ^{ns}
29	0,498	8,0	y = 9E-05x + 0,4916	0,03 ^{ns}
45	0,584	8,4	y = 0,0005x + 0,5389	0,49 ^{**}
51	0,725	5,1	y = 0,0004x + 0,6853	0,41 ^{**}
60	0,758	4,5	y = -3E-06x ² + 0,0011x + 0,6928	0,56 ^{**}
65	0,832	2,6	y = 0,0002x + 0,8075	0,36 [*]
74	0,830	3,1	y = -3E-06x ² + 0,0009x + 0,7813	0,51 ^{**}
85	0,849	1,4	y = -2E-06x ² + 0,0008x + 0,8092	0,71 ^{**}
92	0,833	2,2	y = -4E-06x ² + 0,0013x + 0,7663	0,72 ^{**}
V/IVP				
23	0,495	7,2	y = 0,00005x + 0,5091	0,07 ^{ns}
29	0,339	10,0	y = -0,00009x + 0,3634	0,06 ^{ns}
45	0,264	15,7	y = -0,00038x + 3595	0,47 ^{**}
51	0,159	20,4	y = -0,00031x + 2049	0,29 ^{**}
60	0,138	17,6	y = 0,000003x ² - 0,0010x + 0,1945	0,57 ^{**}
65	0,090	16,0	y = -0,00015x + 1116	0,33 ^{**}
74	0,090	16,1	y = 0,000002x ² - 0,00064x + 12,25	0,57 ^{**}
85	0,079	9,3	y = 0,000001x ² - 0,0005x + 0,1049	0,71 ^{**}
92	0,089	12,9	y = 0,000003x ² - 0,0008x + 0,1318	0,71 ^{**}
Índice de clorofila				
45	44,15	4,55	y = 0,04x + 37,26	0,73 ^{**}
53	46,56	4,84	y = -0,0003x ² + 0,11x + 37,77	0,72 ^{**}
60	47,48	3,88	y = -0,0005x ² + 0,16x + 36,47	0,89 ^{**}
85	49,53	3,74	y = -0,0008x ² + 0,21x + 40,42	0,92 ^{**}
IAF				
58	0,45	30,44	y = 0,001x + 0,2525	0,31 [*]
66	0,71	21,97	y = 0,0015x + 0,401	0,44 ^{**}
73	0,88	20,18	y = 0,0022x + 0,4308	0,56 ^{**}
80	1,63	13,75	y = -0,00003x ² + 0,0093 + 0,7874	0,73 ^{***}
95	1,92	14,08	y = -0,00001x ² - 0,0068x + 1,172	0,64 ^{***}

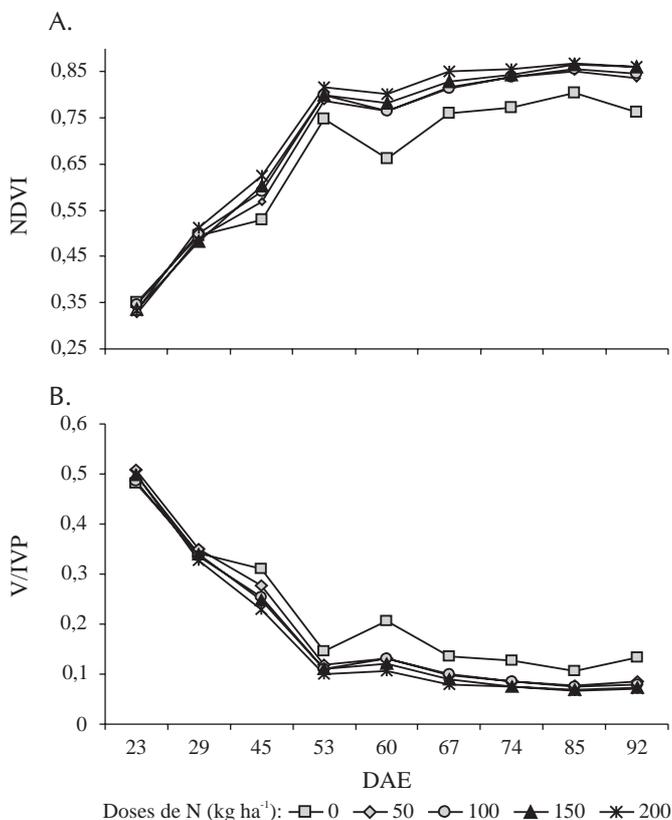
DAE: dias após a emergência; R²: coeficiente de determinação do modelo; ns: não significativo; *, ** e ***: significativo a nível de 0,05; 0,01 e 0,001 de probabilidade

utilizado seja ativo, ou seja, emita radiação independente da luz solar, para evitar interferências devido à intensidade da radiação solar que pode influenciar na atividade fotossintética, as leituras foram realizadas preferencialmente no período da manhã. Kim et al. (2005) constataram que a luz solar exerceu efeito sobre as leituras do mesmo sensor ativo comercial (GreenSeeker) durante o dia, com valores de NDVI menores ao meio dia e aumentando gradualmente até a noite. Em um ensaio de 26 horas mostrou um desvio padrão menor que 0,051 no NDVI, porém com mínima variação entre o céu limpo ou com presença de nuvens.

Uma aplicação de fungicida à base de estrobirulina, aos 45 DAE, causou fitotoxicidade às plantas, o que se manifestou como avermelhamento das folhas, fato este detectado aos 60 DAE pelo sensor óptico, em todas as doses mas com maior expressão na dose de 0 kg ha⁻¹ e, também, pelo clorofilômetro, nas doses de 0 e 50 kg ha⁻¹, resultando em uma diminuição nos valores obtidos do NDVI e índice de clorofila.

Os valores de NDVI (Figura 2A) e do índice de clorofila apresentaram tendência crescente ao longo do período das leituras enquanto a razão simples V/IVP teve comportamento inverso (Figura 2B).

Encontra-se, na Figura 3, resposta do NDVI e do índice de clorofila à aplicação de N em quatro datas de coleta de dados; a primeira leitura, com o sensor óptico ativo, foi realizada logo após a aplicação da primeira adubação de cobertura nitrogenada; assim era previsível que não haveria diferenças entre os tratamentos pois o N aplicado não



havia sido completamente absorvido e, tampouco, metabolizado; a partir da terceira leitura (45 DAE), os valores de NDVI e V/IVP foram afetados significativamente pelas doses de N aplicadas, indicando a utilização de N pelas plantas, que é maior durante os estágios de maior crescimento vegetativo.

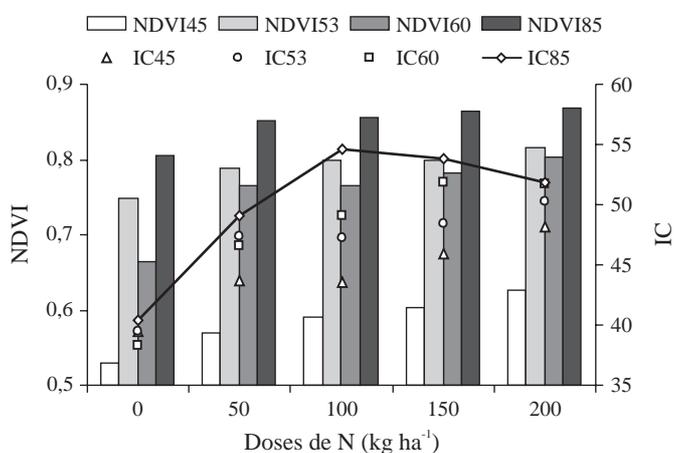
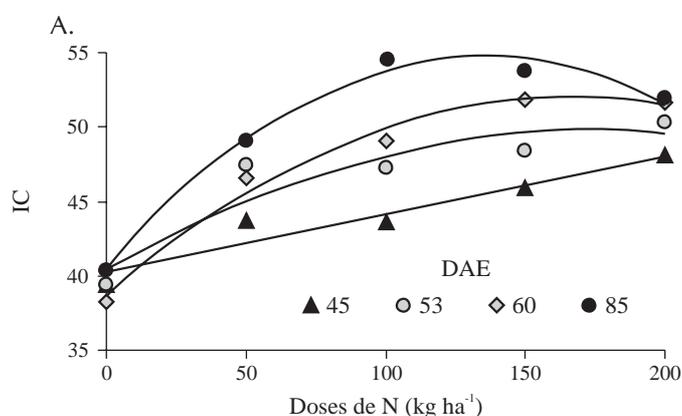


Figura 3. Valores do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI) à esquerda e índice de clorofila (IC) à direita, em relação às doses de N aplicadas aos 45, 53, 60 e 85 dias após a emergência das plantas

Com deficiência de N ocorre diminuição da concentração de clorofila e do conteúdo de proteína solúvel e da taxa de expansão foliar, além de desenvolvimento da planta (Read et al., 2002). Como a reflectância na região do visível do espectro eletromagnético varia em função da concentração de clorofila no tecido foliar, quanto menor o suprimento de N na planta menor também será o nível de clorofila e, conseqüentemente, menor será a absorção da radiação na região do visível, o que causa redução do NDVI; as diferenças foram mais acentuadas entre a ausência de adubação nitrogenada (dose de 0 kg ha⁻¹) e as demais doses, não havendo grande distinção entre elas, ao longo do período de coleta de dados.

Com o uso do clorofilômetro aos 45 DAE (Figura 4A) as leituras apresentaram relação linear com as doses aplicadas e, a partir da segunda leitura, aos 53 DAE, o comporta-



to tornou-se quadrático, aumentando a significância com o decorrer do experimento.

Até os 73 DAE, as relações entre doses de N aplicadas e o IAF foram lineares; a partir dos 80 DAE, as relações foram quadráticas e altamente significativas (Figura 4B).

Relações entre NDVI, V/IVP, índice de clorofila e IAF com teores foliares de N

Aos 92 DAE o NDVI apresentou relação linear positiva com o teor foliar de N (Figura 5A), o que pode indicar que não houve saturação ou “consumo de luxo” de N pelas plantas, mesmo nos tratamentos com doses mais elevadas, uma vez que o N não incorporado às moléculas de clorofila não altera as propriedades de reflectância da cultura (Blackmer & Schepers, 1994). A razão simples V/IVP (Figura 5B) apresentou comportamento inverso ao NDVI. Folhas com baixos teores de nitrogênio, em conseqüência, menores teores de clorofila, têm maior reflectância e transmitância no visível (400-700 nm) e baixas reflectância e transmitância no infravermelho próximo (Noh et al., 2005), causando alterações nos valores de NDVI e V/IVP.

As leituras do índice de clorofila aos 85 DAE também mostraram relação linear altamente significativa com os teores foliares de nitrogênio no algodoeiro (Figura 5C), confirmando resultados obtidos por Malavolta et al. (2004), Neves et al. (2005) e Reis et al. (2006). Observa-se que as leituras com o clorofilômetro indicaram menor dispersão de pontos ao longo da reta de regressão, comparado com o sensor óptico ativo; conseqüentemente, apresentaram maior R²; esta maior acurácia do clorofilômetro em estimar os teores foliares de N se deve à menor interferência de variáveis que pode afetar a reflectância do dossel da cultura.

O comportamento do NDVI em resposta à variação do IAF, foi quadrático em todos os períodos mensurados, conforme se observa na Figura 6 e na Tabela 2.

Relações entre altura de plantas e variáveis medidas pelos sensores

Neste trabalho, baixas doses de N aplicadas ao solo apresentaram relação quadrática e significativa com a altura das plantas (Figura 7A); as demais variáveis analisadas indicaram relações lineares e positivas com a altura das plantas

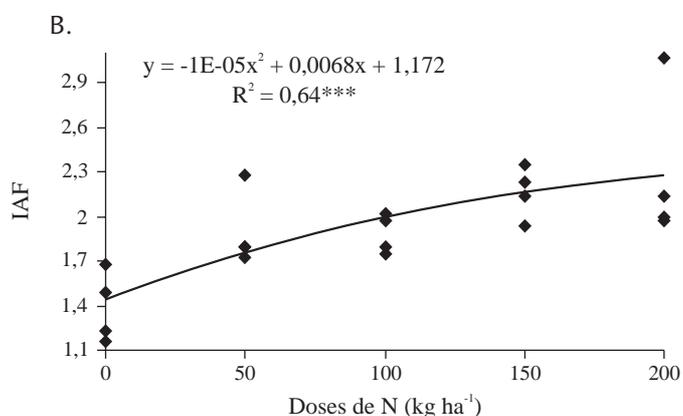


Figura 4. Curvas de regressão ajustadas para: (A) índice de clorofila (IC) em função das doses de N aplicadas aos 45, 53, 60 e 85 dias após a emergência das plantas; (B) índice de área foliar (IAF) em função das doses de N aplicadas aos 95 dias após a emergência das plantas

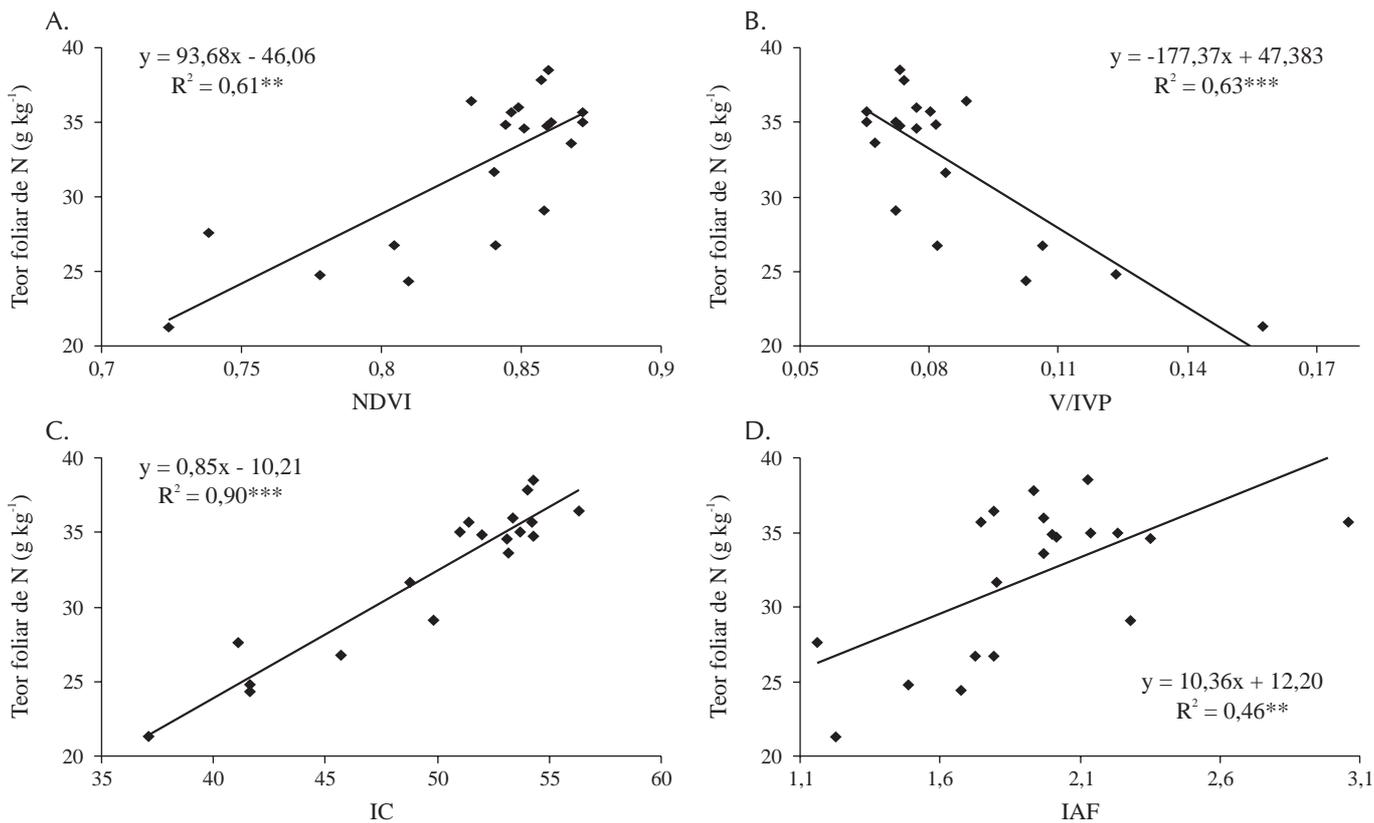


Figura 5. Regressão linear simples entre o teor foliar de N e: (A) índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), (B) razão simples vermelho/infravermelho próximo (V/IVP) aos 92 dias após a emergência (DAE); (C) índice de clorofila (IC) aos 85 DAE e (D) índice de área foliar (IAF), aos 95 DAE

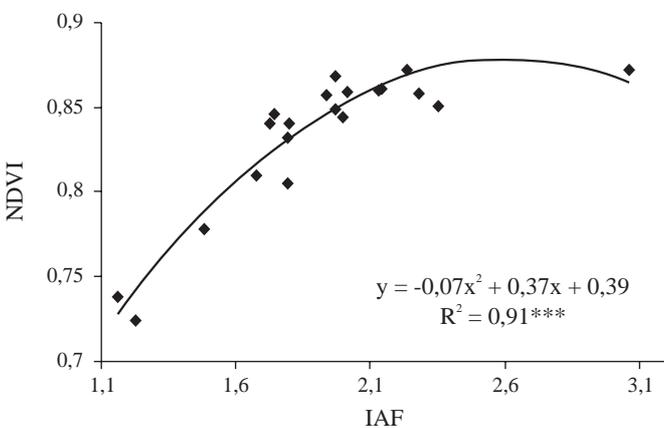


Figura 6. Relação entre índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e índice de área foliar (IAF) aos 95 dias após a emergência

Tabela 2. Relações entre os valores do índice de vegetação diferença normalizada (y) em função dos valores do índice de área foliar (x)

DAE	Equação	R ²
58	$y = -0,8624x^2 + 1,1602x + 0,4491$	0,79***
66	$y = -0,3791x^2 + 0,7054x + 0,5376$	0,70***
73	$y = -0,1926x^2 + 0,473x + 0,6028$	0,89***
80	$y = -0,0409x^2 + 0,1876x + 0,6704$	0,79***
95	$y = -0,0679x^2 + 0,3625x + 0,4084$	0,91***

DAE: dias após a emergência; R²: coeficiente de determinação do modelo; ***: significativo a nível de 0,001 de probabilidade

(Figuras 7B a 7E). Como o N é constituinte de muitos componentes da célula vegetal, como aminoácidos e ácidos nucleicos, a deficiência rapidamente inibe o crescimento vegetal e, caso a deficiência persista, pode ocorrer clorose e queda de folhas; se a deficiência se desenvolve lentamente, os caules se tornam pronunciadamente delgados e comumente lenhosos devido ao acúmulo excessivo de carboidratos que não podem ser utilizados na síntese de aminoácidos e outros compostos nitrogenados (Taiz & Zeiger, 2004).

Embora apresente melhor acurácia, a dificuldade operacional de coleta de dados com o clorofilômetro manual impede seu uso em grande escala; esta é a vantagem da utilização do sensor óptico para estimar condições de deficiência de N em uma lavoura. O uso de medidas de reflectância como indicador do estado nutricional das culturas, referente ao N, ainda está em fase inicial em relação a outros métodos de diagnose nutricional. Os aspectos positivos desta tecnologia quanto a outros métodos de diagnose se referem à pequena necessidade de procedimentos laboratoriais e, conseqüentemente, menores custos; além disso, o tempo entre amostragens e resultados é muito menor do que quando são feitas análises de indicadores do solo, essencial para a correção de deficiência de N (Schröder et al., 2000).

Conforme salientaram Graeff & Claupein (2003), o uso de técnicas de sensoriamento remoto pode eliminar a necessidade de amostragens extensivas na lavoura, desde que a capacidade de detecção de deficiências seja alta. Para Schröder et al. (2000), parcelas ricas em N são um pré-requisito

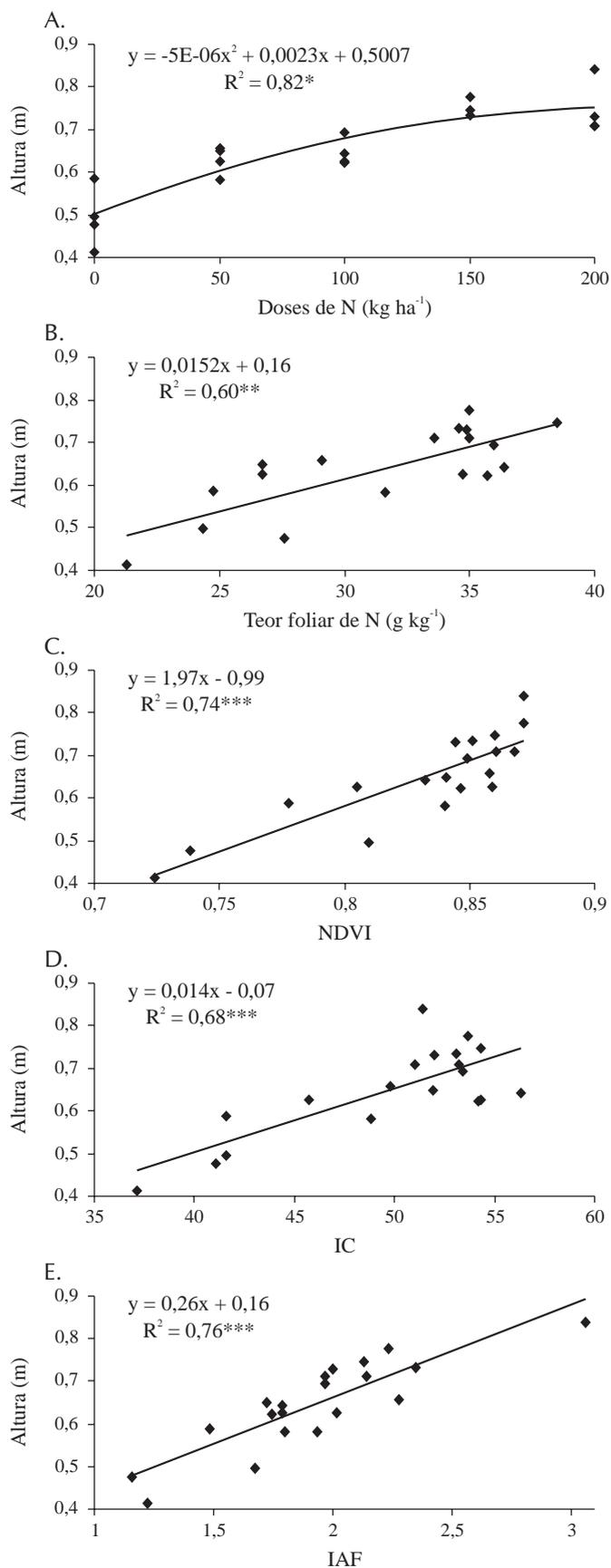


Figura 7. Regressões entre altura de plantas aos 85 dias após a emergência e: (A) doses aplicadas, (B) teores foliares de N, (C) índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), (D) índice de clorofila (IC) e índice de área foliar (IAF)

para serem utilizadas como referência a fim de realizar a diagnose como ferramentas para corrigir efeitos de coloração na cultura que não são causadas por N, como pragas, doenças, densidade populacional, senescência e aparecimento de caules coloridos relativamente iluminados. Davis et al. (1996) e Kachanoski et al. (1996), entretanto, alertaram que parcelas não fertilizadas, como referência, proporcionam uma base mais realística para a produção de mapas de produtividade do que as parcelas bem fertilizadas.

Os valores do NDVI e do índice de clorofila diminuem em culturas sob estresse hídrico. Adicionalmente, culturas, datas de semeadura e efeitos espaciais e sazonais exercem impacto sobre as leituras; além disso, no caso do índice de clorofila cores diferentes podem existir ao longo da lâmina foliar; essas fontes de variação sugerem a necessidade de um rígido protocolo de amostragem, para corrigir erros e normalizar as medidas obtidas.

O sensor utilizado mostrou-se eficiente na detecção do conteúdo de clorofila e da quantidade de N absorvida pelas plantas de algodoeiro, informação que pode ser útil para, combinada com um algoritmo de fertilização, indicar as doses de N a serem aplicadas à cultura, em tempo hábil, dentro do ciclo da cultura.

Schröder et al. (2000) ressaltaram que as leituras do clorofilômetro não são boas preditoras do excesso de N porque, quando a disponibilidade de N é alta, nem todo o N é convertido em clorofila; entretanto, na ocorrência de deficiência esta é imediatamente refletida como baixa concentração de clorofila, a qual é medida acuradamente com o sensor. Rotineiramente, leituras com o clorofilômetro são utilizadas como forma de calibrar os resultados obtidos com os sensores ópticos.

Além das medidas de reflectância e transmitância, atualmente outras variáveis estão sendo estudadas para detectar N em culturas. Limbrunner & Maidl (2007) observaram boas correlações entre N absorvido e medidas de fluorescência da clorofila em trigo, através de regressões exponenciais, indicando que esta ferramenta é eficiente para detectar tanto baixas quanto altas concentrações de N foliar sem que ocorra saturação nas curvas, como ocorre com as medidas de reflectância; outrossim, mesmo nos estádios iniciais as correlações são elevadas, uma vez que somente o material vivo emite fluorescência, então, o solo descoberto não exerce influência sobre as medidas.

Klotz et al. (2003) afirmaram que o crescimento da agricultura de precisão e o monitoramento ambiental requerem novos sistemas e técnicas de aquisição de dados para obter informação detalhada do status da vegetação; esses autores defenderam o desenvolvimento de sensores hiperespectrais de alta precisão para analisar a superfície da lavoura, uma vez que sistemas de sensoriamento remoto multiespectrais, tais como Landstat ETM, SPOT ou IKONOS, obtêm as informações de poucas bandas apenas.

Tarpley et al. (2000) estabeleceram um conjunto de curvas de calibração com relação de bandas de reflectância de 1,5 nm para o algodoeiro e níveis de concentração de N nas folhas, em casa de vegetação. Somente as relações que combinaram vermelho extremo (700 ou 716 nm) com

uma banda de alta reflectância na região do infravermelho muito próximo (755-920 a 1000 nm) proporcionaram boa precisão (correlação) e acurácia; outros índices que incluíram uma reflectância baseada na feição da clorofila, também tiveram boa precisão mas menor acurácia que aqueles obtidos das relações de reflectância vermelho extremo/infravermelho muito próximo.

Read et al. (2002) constataram que a reflectância no azul (415 nm) foi mais estável sob condições de deficiência de N em algodoeiro cultivado em solução nutritiva, quando comparada com a banda do vermelho, principalmente na região do “red edge” (690-730 nm). Para esses autores, o sensoriamento remoto para verificar o estado de N em algodoeiro se torna mais viável usando-se razões que envolvem bandas estreitas na região do violeta ou azul (400 a 500 nm) e a caracterização do vermelho extremo. Sui & Thomasson (2004), entretanto, observaram que, apesar do conteúdo foliar de N no algodoeiro ser significativamente correlacionado com um modelo formado pelas reflectâncias no azul, verde, infravermelho e altura de plantas, as maiores correlações foram obtidas nas bandas do vermelho e infravermelho e as menores no verde e azul; apesar do azul isolado não ter apresentado significância, sua inclusão no modelo permitiu melhorar a habilidade dos outros canais em explicar a variação de N.

Zhao et al. (2005), avaliando o efeito da adubação nitrogenada e a aplicação de regulador de crescimento (PIX) no algodoeiro, notaram que o baixo suprimento de N resultou em baixos níveis de clorofila na folha e esse estresse foi determinado precocemente nas plantas com o aumento da reflectância na faixa do visível, nos comprimentos de onda de 550 a 700 nm. Mudanças nos níveis de N entre os tratamentos foram determinadas de uma simples razão de reflectância nas folhas (517/413); entre as medidas de reflectância examinadas, as maiores correlações com produtividade de fibras foram obtidas com o NDVI; os resultados indicaram que as mudanças na produtividade de fibras do algodoeiro foram fortemente relacionadas com valores de NDVI no estágio do início da floração mas não o foram em outros períodos do ciclo. Os autores sugerem, ainda, que essas medidas podem ser usadas no sensoriamento remoto do “status” de N no algodoeiro. Com o processamento desta informação, pode-se formular estratégias de manejo cultural em locais específicos e, desta forma, mapas de parâmetros da vegetação (como biomassa e teor de clorofila) podem servir como fonte valiosa de informação para utilização em agricultura de precisão. Uma vez que a variabilidade seja mapeada, os procedimentos agrícolas podem ser planejados de acordo com esta informação.

Trabalhos devem ser realizados para avaliação de diferentes índices de reflectância em nível de dossel, tanto em laboratório como em condições de campo, através de espectrorradiômetros, na busca de índices mais eficientes para cada cultura. Sugere-se, também, a inclusão de outras variáveis, tais como horário de coleta para verificar o comportamento dos sensores diante de diferentes intensidades luminosas que alteram o comportamento fisiológico das plantas.

CONCLUSÕES

1. Os valores do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI) e do índice de clorofila apresentaram tendência crescente ao longo do período das leituras e foram afetados significativamente pelas doses de N, aplicadas a partir de 45 dias após a emergência (DAE), indicando a maior utilização de N pelas plantas durante os estádios de maior crescimento vegetativo.
2. Até os 73 DAE, as relações entre doses de N aplicadas e o índice de área foliar (IAF) foram lineares.
3. A partir dos 80 DAE, as relações foram quadráticas e altamente significativas.
4. O comportamento do NDVI em resposta à variação do IAF, foi quadrático em todos os períodos observados.
5. O sensor utilizado mostrou-se como ferramenta potencial para a detecção da deficiência de nitrogênio na cultura do algodoeiro, nas condições apresentadas.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP e Máquinas Agrícolas Jacto, pelo apoio direto à pesquisa.

LITERATURA CITADA

- Albers, D. W. Cotton plant development and plant mapping. Columbia: University of Missouri, 2005. <<http://muextension.missouri.edu/explore/agguides/crops/g04268.htm>> 10 Nov. 2006
- Beltrão, N. E. de M. Escolha de uma cultivar de algodão herbáceo para a agricultura familiar. Campina Grande: EMBRAPA/CNPA. Comunicado Técnico, n.201, 2003.
- Blackmer, T. M.; Schepers, J. S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.25, p.1791-1800, 1994.
- Booij, R.; Uenk, D.; Lokhorst, C.; Sonneveld, C. Monitoring crop nitrogen status in potatoes, using crop light reflection. In: *European Conference on Precision Agriculture*, 3., 2001, Montpellier. *Proceedings ... Montpellier: Agro Montpellier*, 2001. 5p.
- Carvalho, M. C. S.; Ferreira, G. B. Calagem e adubação do algodoeiro no cerrado. Campina Grande: EMBRAPA/CNPA. *Circular Técnica* n.92, 2006. 16p.
- Cisneros, J. J.; Godfrey, L. D. Mid-season pest status of the cotton aphid (Homoptera: Aphididae) in California cotton: Is nitrogen a key factor? *Environmental Entomology*, v.30, p.501-510, 2001.
- Davis, J. G.; Malzer, G. L.; Copelnd, P. J.; Lamb, J. A.; Robert, P. C.; Bruuselma, T. W. Using yield variability to characterize spatial crop response to applied N. In: *International Conference of Precision Agriculture*, 3, 1996, Minneapolis. *Proceedings... Madison: ASA/CSSA/SSSA*, 1996. 7p.
- Edmisten, K. L. The cotton plant. In: Edmisten, K. L.; York, A. C.; Yelverton, F. H.; Spears, J. F.; Bowman, D. T.; Bachelier, J. S.; Koenning, S. R.; Crozier, C. R.; Meijer, A. D.; Brown, A. B.; Culpepper, A.S. *Cotton information*. North Carolina: North Carolina State University, 2008. 18p.

- Ferri, C. P. Utilização da reflectância espectral para estimativa de pigmentos fotossintéticos em dosséis de soja [*Glycine max* (L.) Merrill]. São José dos Campos: INPE/MCT, 2002. 173p. Tese Doutorado
- Fridgen, J. L.; Varco, J. J. Dependency of cotton leaf nitrogen, chlorophyll, and reflectance on nitrogen and potassium availability. *Agronomy Journal*, v.96, p.63-69, 2004.
- Graeff, S.; Claupein, W. Quantifying nitrogen status of corn (*Zea mays* L.) in the field by reflectance measurements. *European Journal of Agronomy*, v.19, p.611-618, 2003.
- Hutmacher, R. B.; Travis, R. L.; Rains, D. W.; Vargas, R. N.; Roberts, B. A.; Weir, B. L.; Wright, S. D.; Munk, D. S.; Marsh, B. H.; Keeley, M. P.; Fritsch, F. B.; Munier, D. J.; Nichols, R. L.; Delgado, R. Response of recent Acala cotton cultivars to variable nitrogen rates in the San Joaquin valley of California. *Agronomy Journal*, v.96, p.48-62, 2004.
- Kachanoski, R. G.; Fairchild, G. L.; Beauchamp, E. G. Yield indices for corn response to applied fertilizer: Application in site-specific crop management. In: International Conference of Precision Agriculture, 3, 1996, Minneapolis. Proceedings... Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1996. 8p.
- Kim, Y.; Evans, R. G. Waddell, J. Evaluation of in-field optical sensor for nitrogen assessment of barley in two irrigation systems. ASAE paper No. PNW05-1004, St. Joseph: ASAE, 2005. 12p.
- Klotz, P.; Bach, H.; Mauser, W. GVIS – Ground-operated visible/near infrared imaging spectrometer. In: European Conference on Precision Agriculture, 3, 2001, Montpellier. Proceedings... Berlin, 2003. 5p.
- Limbrunner, B.; Maidl, F. X. Non-contact measurement of the actual nitrogen status of winter wheat canopies by laser-induced chlorophyll fluorescence. In: European Conference of Precision Agriculture, 6, 2007, Skiathos. Proceedings... Skiathos, 2007. 7p.
- Malavolta, E.; Nogueira, N. G. L.; Heinrichs, R.; Higashi, E. N.; Rodriguez, V.; Guerra, E.; Oliveira, S. C.; Cabral, C. P. Evaluation of nutritional status of the cotton plant with respect to nitrogen. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.35, p.1007-1019, 2004.
- Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 201p.
- Moreira, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação. São José dos Campos: INPE, 2001. 250p.
- Neves O. S. C.; Carvalho, J. G.; Martins, F. A. D.; Pádua, T. R. P.; Pinho, P. J. Uso do SPAD-502 na avaliação dos teores foliares de clorofila, nitrogênio, enxofre, ferro e manganês do algodoeiro herbáceo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.40, p.517-521, 2005.
- Noh, H.; Zhang, Q.; Han, S.; Shin, B.; Reum, D. Dynamic calibration and image segmentation methods for multispectral imaging crop nitrogen deficiency sensors. *Transactions of the ASAE*, v.48, p.393-401, 2005.
- Read, J. J.; Tarpley, L.; Mckinion, J. M.; Reddy, K. R. Narrow-waveband reflectance for remote estimation of nitrogen status in cotton. *Journal of Environmental Quality*, v.31, p.1442-1452, 2002.
- Read, J. J.; Whaley, E. L.; Tarpley, L.; Reddy, R. Evaluation of a hand-held radiometer for field determination of nitrogen status in cotton. *American Society of Agronomy Special Publication*, n.66, p.177-195, 2003.
- Reis, A. R.; Furlani Júnior, E.; Buzetti, S.; Andreotti, M. Diagnóstico da exigência do cafeeiro em nitrogênio pela utilização do medidor portátil de clorofila. *Bragantia*, v.65, p.163-171, 2006.
- SAS Institute. SAS/SAT: User's guide: Version 6. Cary, 1998. 1848p.
- Schröder, J. J.; Neeteson, J. J.; Oenema, O.; Struik, P. C. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. *Field Crops Research*, v.66, p.151-164, 2000.
- Silva, N. M. Nutrição mineral e adubação do algodoeiro no Brasil. In: Cia, E.; Freire, E. C.; Santos, W. J. (eds.). *Cultura do algodoeiro*. Piracicaba: Potafós, 1999. 36p.
- Slosser, J.; Leser, J.; Rummel, D.; Fuchs, T.; Boring, E.; Muegge, M.; Sansone, C. Suggestions for management of cotton aphid in West Texas. *Agricultural Communications, The Texas A&M University System, College Station, Texas*. 1999. <www.tamu.edu/extension/bulletins/aphweb99.html>. 8 Abr. 2006
- Staut, L. A.; Kurihara, C. H. Calagem e adubação. In: *Algodão: Tecnologia de produção*. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2001, 19p.
- Sui, R.; Thomasson, J. A. Plant health sensing system for in situ determination of cotton nitrogen status. St. Joseph: ASAE, 2004. 15p.
- Sui, R.; Wilkerson, J. B.; Hart, W. E.; Howard, D. D. Integration of neural network with spectral reflectance sensor to detect nitrogen deficiency in cotton. St. Joseph: ASAE, 1998. 6p. (ASAE Paper, 983104).
- Taiz, L.; Zeiger, E. *Fisiologia vegetal*. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 720p.
- Tarpley, L.; Reddy, K. R.; Sassenrath-Cole, G. F. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. *Crop Science*, v.40, p.1814-1819, 2000.
- Zhao, D.; Reddy, R. K.; Kakani, V.G.; Read, J. J.; Koti, S. Selection of optimum reflectance ratios for estimating leaf nitrogen and chlorophyll concentrations of field-grown cotton. *Agronomy Journal*, v.97, p.89-98, 2005.