

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS
LABORATÓRIO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA AGRONÔMICA

**Natureza: III. Manuscrito de trabalho científico desenvolvido através de atividade
de iniciação científica**

**COMPARAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO OBTIDOS POR SENSOR DE
REFLECTÂNCIA DE DOSSEL EM MILHO SOB DIFERENTES DOSES DE
NITROGÊNIO**

DOCENTE: PROF. Drº JOSÉ PAULO MOLIN

DISCENTE: LUCAS CORTINOVE

Nº USP: 6826367

EMAIL: l_corti@hotmail.com

**PIRACICABA, SÃO PAULO
JUNHO, 2013**

COMPARAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO OBTIDOS POR SENSORES DE REFLECTÂNCIA DE DOSEL EM MILHO SOB DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO

RESUMO

A recomendação de aplicação de nitrogênio (N) para o milho é em estádios fenológicos precoces (V4) é baseada apenas na extração desse nutriente pelos grãos, sem levar em consideração o seu teor e a variabilidade espacial desse nutriente no solo. Uma alternativa para considerar esses dois fatores é o uso de sensores de reflectância de dossel que, através de índices de vegetação (IV), avaliam a condição nutricional das plantas. O IV mais utilizado para esse fim é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), que indica que o melhor momento para avaliação é em períodos mais tardios do desenvolvimento da planta (V10), longe do momento recomendado para a aplicação de N, além de apresentar problemas de saturação e interferências com o solo. Desta forma, esse trabalho tem o objetivo de testar dez IV's na identificação da nutrição da cultura do milho por N em diferentes estádios fenológicos (V4 até V14). Para isso, foi implantado um experimento em blocos casualizados com quatro repetições com cinco doses de nitrogênio (40 até 200 kg ha⁻¹), mais uma parcela controle sem aplicação de N. As avaliações foram realizadas com dois sensores de dossel (Crop Circle ACS-210 e Crop Circle ACS-470), um clorofilômetro (SPAD-502), além de mensurações de altura e N foliar em dois estádios fenológicos (V8 e V14). Entre os IV's testados, os IV CCCI apresentou melhores resultados, identificando doses de N desde V4, embora os melhores resultados foram em V10. Os IV's MCARI e MTVI2 apresentaram os piores resultados. Os IV's CI e NDVI foram os que apresentaram maior tendência de saturação do sinal. Os IV's NDVI_{âmbar} e OSAVI foram os que apresentaram maior eficiência em V14.

COMPARAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO OBTIDOS POR SENSORES DE REFLECTÂNCIA DE DOSSEL EM MILHO SOB DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO

1. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos insumos agrícolas rotineiramente utilizados, o nitrogênio (N) é um dos que desperta maior atenção por parte de produtores e pesquisadores em todo o mundo. Se o N é utilizado adequadamente, juntamente com os demais nutrientes, pode acelerar o desenvolvimento das culturas em geral (TISDALE et al., 1993). No Brasil, 70 a 90 % dos experimentos de adubação com milho apresentaram resultados positivos devido a aplicação de N (EMBRAPA, 2006). Por outro lado, quando o suprimento de N excede a necessidade da cultura, o excesso é perdido por escoamento superficial e/ou lixiviação, podendo contaminar ecossistemas aquáticos e o lençol freático (WOOD et al., 1993), além de representar perda econômica para os agricultores.

Os valores de N do solo, especialmente nos tropicais, não são obtidos a partir de análise de solo de rotina. Dessa forma, a sua recomendação é baseada apenas na extração e exportação das culturas, sem levar em consideração o seu teor no solo e sua variabilidade espacial. Amaral e Molin (2011) conseguiram identificar variabilidade espacial de N em condições de campo, tendo como base informações de biomassa da cana-de-açúcar medida por um sensor de reflectância do dossel.

A recomendação da aplicação da adubação nitrogenada é usualmente em V4 no milho, porque neste estágio iniciam-se a diferenciação floral e a formação do potencial produtivo da planta (Fancelli e Dourado Neto, 2004). Nesse estágio, a disponibilidade de nitrogênio para a planta determina um aumento na parte aérea em relação às raízes, sendo um momento crucial para a adubação nitrogenada de cobertura. Entretanto, Povh (2011) fazendo avaliações em diferentes estádios vegetativos com um sensor de dossel Crop Circle ACS-210 ($NDVI_{\text{âmbar}}$), concluiu que em V4 as leituras ainda sofrem bastante influência da população e espaçamentos entre fileiras utilizados, o que prejudica a utilização de sensores de dossel nesse estágio. A interferência de população em espaçamentos maiores já não foi significativa em V10 Povh (2011). Em V12 a área foliar está próxima do máximo e é definido o número potencial de grãos na espiga de milho (FANCELLI, 1986). Povh (2011) encontrou melhores correlações das doses de N com $NDVI_{\text{âmbar}}$ em períodos mais tardios (V10 em diante) do que em períodos iniciais. Dessa forma, seria viável utilizar essa ferramenta apenas na segunda aplicação de N em cobertura.

Os sensores utilizados pelo sensoriamento remoto são dispositivos capazes de detectar a radiação eletromagnética em determinada faixa do espectro

eletromagnético e gerar informações que possam ser transformadas num produto passível de interpretação, quer seja na forma de imagem, gráfica ou de tabela (MOREIRA, 2005). Quando o sistema sensor emite radiação e, após ter interagido com o alvo, capta a parte que voltou, o sistema é denominado ativo, pois possui sua própria fonte de radiação. Neste caso, o sensor pode operar durante o dia ou à noite (MOREIRA, 2005). Os sensores ativos de refletância do dossel fornecem dados de refletância de plantas em diferentes comprimentos de ondas, os quais permitem o cálculo de diferentes IV's.

Com o uso de sensores de reflectância de dossel e o cálculo dos IVs, torna-se possível, a partir de diferentes estratégias, a recomendação de aplicação de fertilizantes nitrogenados em taxa variável, seja com aplicações em tempo real, seja com aplicação regida por mapa de recomendação (AMARAL, 2010).

Um dos IV's mais estudados para a estimativa da nutrição por N é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) (RAUN et al., 2002; SOLARI, 2006; POVH et al., 2008). O NDVI é o quociente da divisão da diferença pela soma das reflectâncias do infravermelho próximo e do vermelho. Entretanto, alguns estudos vêm apontando que outros IV's calculados a partir de outros comprimentos de onda podem expressar de maneira mais precisa a nutrição das plantas por N para a cultura do milho, assim como minimizar a interferência do solo e de fatores causadores de estresse que venham a influenciar a quantidade de biomassa acumulada pela cultura.

O uso do NDVI GreenSeeker® nas culturas do milho, trigo, triticale e cevada, mostrou que o NDVI gerado pelo sensor possuiu forte relação com as quatro variáveis analisadas na cultura do trigo, nitrogênio aplicado, nitrogênio foliar, matéria seca e produtividade, apresentando grande potencial para o manejo do nitrogênio nessa cultura (POVH, et al., 2008). Entretanto, na cultura do milho, os autores mostraram que o NDVI não foi capaz de identificar as diferenças entre os tratamentos com doses de N. Nesse contexto, outros índices de vegetação ou combinações de comprimentos de ondas podem apresentar melhor relação com biomassa e quantidade de N.

Índices simples como o NDVI e o índice de clorofila (CI) são influenciados por outros fatores, como a quantidade de biomassa, enquanto que o índice composto MCARI/MTVI2, que leva em conta a refletância de comprimentos de ondas específicos nas bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, melhor se correlaciona com o status nutricional por N (EITEL et al., 2008). Na cultura do milho, Wu et al. (2007) verificaram o mesmo resultado, utilizando o índice composto MCARI/OSAVI.

O IV Meris Terrestrial Chlorophyll Index (MTCI) foi o índice que teve menor interferência pelo estresse hídrico na cultura do milho e apresentou boa capacidade de diferenciar doses de N em áreas com rotação de cultura com milho e soja

(SHIRATSUCHI et al., 2010). Segundo os mesmos autores, os índices CI e NDVI apresentaram grande variação com o estresse hídrico e apresentaram moderada capacidade de diferenciar doses de N.

Utilizando os IV's Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI), o NDVI e o índice de vegetação da diferença normalizada pelo *Red- Edge* (NDRE) foi encontrado respostas estáveis e confiáveis para diferenciar a absorção de nitrogênio pelas plantas de milho antes do estágio fenológico V10. A concentração de N após V10 para os índices NDRE e CCCI, sem interferências de locais, híbridos e diferentes anos (MIAO, et al., 2012). Long et al. (2009), utilizando o NDVI, NDRE e o CCCI verificaram que índices simples, como o NDVI e o NDRE, são afetados pelo estresse hídrico, enquanto isso, verificaram que o CCCI é menos afetado em locais em que o estresse hídrico é limitante à cultura.

Estudos comparando NDVI com outros IV's foram feitos em condições de clima temperado. Estudos com esses IV's em condições tropicais ainda carecem de informações e resultados. Logo, espera-se que outros IVs obtidos por sensor de reflectância permitam avaliação mais precoce com sensores, possibilitando aplicação de N em taxa variável mais cedo, assim como demonstrem maior relação com a resposta da cultura ao N aplicado.

2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho foi comparar diferentes índices de vegetação na identificação da nutrição da cultura do milho por nitrogênio em diferentes estádios fenológicos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi implantado em campo experimental da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba-SP, em um latossolo vermelho amarelo distrófico típico textura média. Foi utilizado um delineamento de blocos casualizados com quatro repetições, com parcelas de 5 m de comprimento e com cinco fileiras de milho. A semeadura do milho, que aconteceu de forma manual, ocorreu no dia 08/01/2013 com o híbrido 30F35H, almejando uma população de 60000 plantas por hectare, com espaçamento entre fileiras de 0,50m. Para garantir a população desejada, foram semeadas duas sementes na posição de uma semente, dobrando a densidade de plantas na semeadura para posterior desbaste mantendo a população em 60000 plantas por hectare. A adubação no momento da semeadura foi de 130 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de super fosfato simples e 40 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de

cloreto de potássio. No dia 30/01/2013 foi aplicado em cobertura mais 90 kg ha⁻¹ de K₂O.

Os tratamentos constaram de cinco doses de N (40, 80, 120, 160 e 200 kg ha⁻¹) e um tratamento controle sem aplicação de N. Na semeadura, as parcelas com doses de N receberam a diferença para a dose da parcela foi feita no dia 29/01/2013 em cobertura, quando o milho estava no estágio fenológico V4, usando o fertilizante nitrato de amônio (30% de N).

As avaliações para obtenção dos IV's foram realizadas com dois sensores de reflectância de dossel, Crop Circle ACS-210 e Crop Circle ACS-470 (*Holland Scientific, Inc.* Lincoln, NE). O sensor Crop Circle ACS-210 trabalha com dois comprimentos de onda, um na região do âmbar (590 nm) e outro na região do infravermelho próximo (880 nm). Com os dados obtidos pelo sensor Crop Circle ACS-210 foram calculados dois índices de vegetação (NDVI_{âmbar} e CI_{âmbar} – Tabela 1). O sensor Crop Circle ACS-470 pode trabalhar com três comprimentos de onda simultaneamente, desde 440 nm até 880 nm, mediante troca de filtros óticos, sendo que esses comprimentos de onda compreendem a região visível do espectro eletromagnético e a região do infravermelho próximo, possibilitando o cálculo de vários índices de vegetação (Tabela 1).

Os sensores são portáteis e foram conduzidos de forma manual, mantendo uma distância média entre dossel e sensor de 0,8 m, com frequência de coleta de dados de 10 Hz. Foram avaliadas a segunda e quarta fileiras de cada parcela, evitando uma possível contaminação indesejável entre as fileiras da bordadura das parcelas. As avaliações foram feitas quando a cultura atingiu diferentes estádios de desenvolvimento (V4, V6, V8, V10, V12 e V14).

Tabela 1- Índices de vegetação calculados a partir da refletância de diferentes comprimentos de onda obtidos pelos sensores de dossel e os autores que os propuseram.

Índice de vegetação	Equação	Referência
NDVI	$(R_{760} - R_{670}) / (R_{760} + R_{670})$	Rouse et al. (1973)
NDVI _{âmbar}	$(R_{880} - R_{590}) / (R_{880} + R_{590})$	Solari et al. (2008)
CI	$(R_{760} / R_{670}) - 1$	Gitelson et al. (2003)
CI _{âmbar}	$(R_{880} / R_{590}) - 1$	Solari et al. (2008)
NDRE	$(R_{760} - R_{730}) / (R_{760} + R_{730})$	Eitel et al. (2010)
MTCI	$(R_{760} - R_{710}) / (R_{720} - R_{670})$	Shiratsuchi et al. (2010)
MCARI	$[(R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550})] / (R_{700} / R_{670})$	Daughtry et al. (2000)

OSAVI	$(1+0.16)(R_{800}-R_{670}) / (R_{800}+R_{670}+0.16)$	Rondeaux et al. (1996)
MTVI2	$\{1.5[1.2(R_{800}-R_{550}) - 2.5(R_{670}-R_{550})]\} / \{\sqrt{[(2R_{800}+1)^2 - (6R_{800}-5\sqrt{R_{670}}) - 0.5]}\}$	Eitel et al. (2008)
CCCI	NDRE/NDVI	Long et al. (2012)

Devido aos filtros óticos disponíveis, algumas adaptações dos comprimentos de onda utilizados foram feitas: entre 760 e 800 nm, se utilizou 760 nm; entre 700 e 730 nm, se utilizou 730 nm.

Além das avaliações com os sensores de reflectância, as parcelas foram avaliadas com um clorofilômetro portátil (SPAD-502, Konica Minolta Sensing, Inc., Sakai, Osaka, Japão). As mensurações com o SPAD foram feitas na última folha totalmente expandida, ou seja, aquela que indica o estágio fenológico da planta, em 15 folhas por parcela, na metade até dois terços das folhas (Argenta et al., 2001) nas mesmas avaliações que os sensores de reflectância.

O SPAD possui diodos que emitem luz a 650 nm (vermelho) e a 940 nm (infravermelho). A luz em 650 nm situa-se próxima dos dois comprimentos primários de onda associados à atividade da clorofila (645 e 663 nm). O comprimento de onda de 940 nm serve como referência interna para compensar as diferenças na espessura ou no conteúdo de água da folha ou devido a outros fatores (WASKOM et al., 1996), assim as leituras com o clorofilômetro tem como objetivo aferições no teor de clorofila e comparação com os IV's.

Também foi mensurado a altura de 15 plantas por parcela a partir de V6. Para avaliar o estado nutricional das plantas em relação ao N, foram realizadas análises foliares em dois estádios fenológicos (V8 e V14). As amostras foram retiradas na última folha completamente expandida desses estádios fenológicos, em plantas diferentes das folhas mensuradas pelo clorofilômetro.

Para o estágio V4 foram realizadas análise de variância utilizando o teste F a 5% de significância. Para as variáveis significativas foi feita a análise de contrastes ortogonais. Para os demais estádios fenológicos, todos os dados obtidos foram submetidos à mesma análise de variância. Se significativa, foi ajustadas regressões (linear ou quadrática). Como critério para a escolha dos modelos de regressão, selecionaram-se os modelos que apresentaram maior significância dos parâmetros de regressão até 5% de significância pelo teste t. Todas as análises foram feitas no software SISVAR (Ferreira, 2011).

Para as variáveis SPAD, altura e N foliar, foram realizadas correlações de Pearson para cada IV's. Foram aceitas correlações significativas até 5% de probabilidade pelo teste t.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No momento das leituras em V4, ainda não havia sido aplicada a dose total de N. Com exceção do tratamento controle, todos os outros tratamentos haviam recebido uma dose de 40 kg ha⁻¹ de N, que foi a dose utilizada na semeadura. Apenas os IV's NDVI_{âmbar}, Cl_{âmbar} e CCCI e o SPAD foram capazes de identificar diferença entre os tratamentos (Tabela 2). Isso pode ter ocorrido porque NDVI_{âmbar} e Cl_{âmbar} são os IV's calculados pelo sensor ACS-210. Logo, a avaliação com esse sensor pode ter sofrido algum tipo de interferência indesejada, já que na avaliação seguinte (V6), essa diferença deixou de existir. Como o CCCI, à exemplo do SPAD, foi capaz de identificar diferença quando da aplicação de N, isso mostra que esse IV deve receber destaque em avaliações precoces. Miao et al. (2012) haviam identificado que o CCCI é sensível às variações de clorofila e N nas plantas antes de V10. Para os outros IV's a alta exposição de solo pode ter interferido negativamente.

Tabela 2 Contrastes ortogonais entre o tratamento controle (sem aplicação de N) e os demais (40 kg ha⁻¹ de N), apresentando valores médios dos IV's e SPAD no estágio V4

Variável	Controle	Parcelas com aplicação de N	Valor p>F
SPAD	42,97	48,548	0,001
NDVI _{âmbar}	0,262	0,2958	0,001
Cl _{âmbar}	0,712	0,8552	0,001
CCCI	0,372	0,4334	<0,001

No estágio V6 apenas os IV's MTCl e CCCI identificaram as doses de N (Anexo 1). Contudo, os valores dos coeficientes de determinação (R²) da regressão entre as doses de N e os IV's obtidos neste estágio foram bem inferiores aos valores obtidos nos demais estágios fenológicos (Figura 1). Esses mesmos IV's foram os que apresentaram as maiores correlações com SPAD (Figura 2). Os outros IV's apresentaram valores baixos de correlação com o clorofilômetro, enquanto que o IV MCARI não apresentou correlação significativa. Essas baixas correlações entre SPAD com os IV's podem ser explicadas pela interferência do solo na reflectância obtida pelos sensores, já que as plantas estão com uma pequena área foliar disponível para avaliação. Na correlação entre os IV's e altura, os IV's MTCl e CCCI foram os únicos que apresentaram valores significativos de correlação (Figura 3). Isso mostra que esses índices estão sendo capazes de identificar a resposta do milho à doses de N, uma vez que a altura foi diferente entre os tratamentos.

Para a maioria dos IV's as avaliações neste estágio fenológico ainda são precoces; sendo necessário esperar a planta desenvolver mais folhas para demandar e extrair uma quantidade maior de N. Esses resultados corroboram o que foi apresentado por Povh (2011), sendo um estágio precoce para realizar avaliações com os IV's em espaçamentos reduzidos. No entanto, os IV's MTCI e CCCI apresentaram correlações com altura e SPAD, além de apresentarem valores de R^2 significativos, indicando que esses dois IV's apresentam potencial para aplicações mais precoces de N.

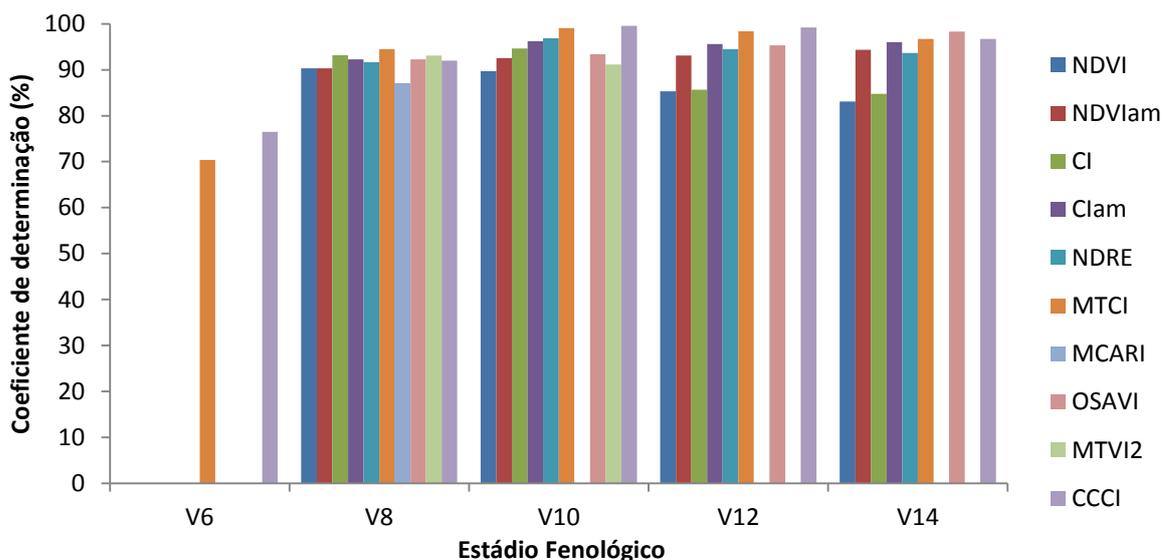


Figura 1 Coeficientes de determinação da análise de regressão entre as doses de N e cada IV ao longo dos estádios fenológicos. No estágio V6 os modelos de regressão são lineares, enquanto que os demais são quadráticos.

No estágio V8, os IV's possuem capacidade semelhante em identificar as doses de N, evidenciado pelos valores próximos de R^2 (Figura 1). Embora os valores de R^2 sejam altos, nos estádios fenológicos V10 e V12 os valores de R^2 aumentam ainda mais. Essa tendência só não se repete para os IV's NDVI, MCARI e MTVI2. O valor de R^2 referente ao NDVI a partir deste estágio fenológico decresce, sendo que uma explicação para isso é o efeito de saturação do sinal do sensor, assim como observado por Povh (2008). A saturação ocorre quando o IV se torna pouco sensível para identificar variações no aumento da biomassa vegetal a partir de um determinado ponto de crescimento da planta (Asrar et al., 1984). Os IVs MCARI e MTVI2 tiveram seus melhores resultados nesse estágio fenológico, talvez também relacionado à saturação das bandas espectrais na região do vermelho, o que mostra sua baixa eficiência em identificar a nutrição do milho por N.

As correlações entre os IV's e SPAD atingem valores máximos neste estágio para os IV's NDVI, NDVI_{âmbar}, CI, NDRE, MCARI e OSAVI (Figura 2). Isso mostra que

quando a utilização desses IVs, esse estágio é o mais indicado para identificar o status nutricional do milho por N. As correlações entre os IV's com a altura apresentam valores inferiores aos de estádios fenológicos mais tardios, contudo todos os IV's já apresentam correlações significativas (Figura 3). As correlações entre o N foliar e cada IV's foi significativa para todos os IV's (Figura 4). Isso mostra que a cultura está respondendo as doses de N em termos de acúmulo de clorofila e de N, assim como propiciando um maior desenvolvimento das plantas (altura), e que os IVs estão sendo capazes de identificar isso.

Os IV's MTCI e CCCI foram os IV's que melhor se correlacionaram com o N foliar. Embora sejam significativas, as correlações com os IV's MCARI e MTVI2 para o SPAD, altura e N foliar, estas foram as menores correlações apresentadas dentre todos os IV's. Além de um possível sinal de saturação, essas correlações baixas para esses dois IV's podem ser explicadas pelo mesmo filtro que apenas esses dois IV's utilizam (550 nm), indicando que o filtro deste comprimento de onda possa ter apresentado um problema.

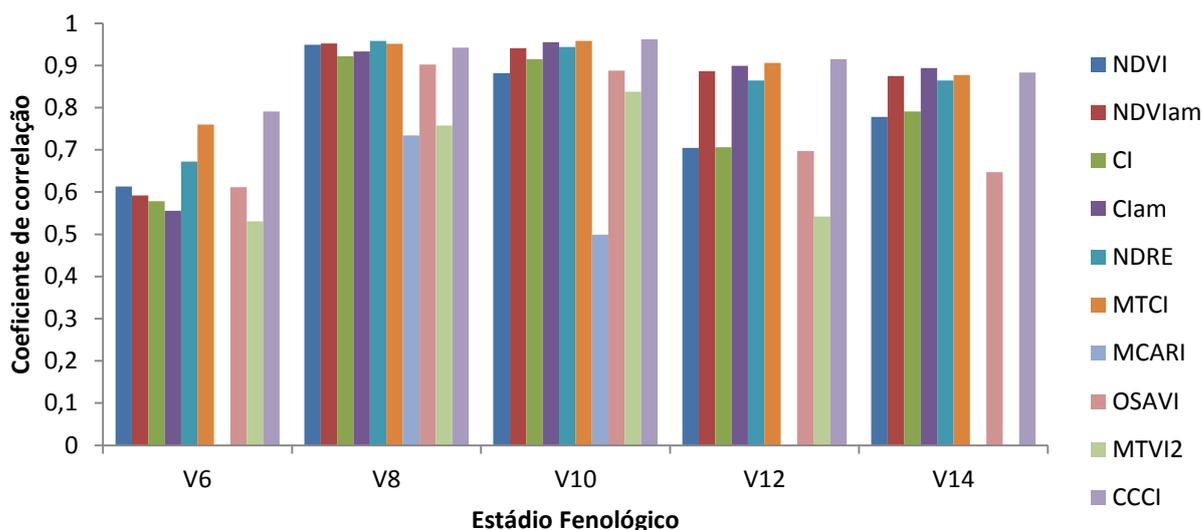


Figura 2 Coeficientes de correlação de Pearson entre SPAD e cada IV ao longo dos estádios fenológicos

Em V10 o maior número de IV's apresentou o valor máximo de R^2 (CI, $CI_{\text{âmbar}}$, NDRE, MTCI e CCCI). Esses IV's apresentam os maiores valores entre todas as avaliações realizadas (Figura 1). Nesse estágio a demanda de N pela planta está alta e a planta apresenta boa biomassa para avaliação. As correlações com o SPAD foram significativas para todos os IV's, contudo os IV's MCARI e MTVI2, mais uma vez apresentaram os piores resultados. Os maiores valores de correlação dos IV's com a altura foram encontrados neste estágio fenológico. Essa alta correlação com altura de plantas indica que os IV's estão sendo bons indicadores de biomassa das plantas.

Em V12 os valores de R^2 já apresentam uma queda para aqueles IV's que apresentaram o valor máximo em V10 (Figura 1). Para os IV's NDVI e CI essa queda foi bem acentuada, indicando que esses IV's estão saturando ao longo dos estádios fenológicos (Povh et al., 2008). As correlações com o SPAD sofreram uma queda em relação aos dois estádios anteriores, mesmo assim os IV's $CI_{\text{âmbar}}$, MTCI e CCCI apresentaram altos valores de correlação (Figura 2). As correlações com altura sofreram uma queda em relação ao estágio anterior (Figura 3). Isso ocorre porque o acúmulo de diferentes camadas de folhas faz com que o sensor capte apenas a reflectância das camadas superiores do dossel, reduzindo a relação com altura (Ciganda et al., 2012).

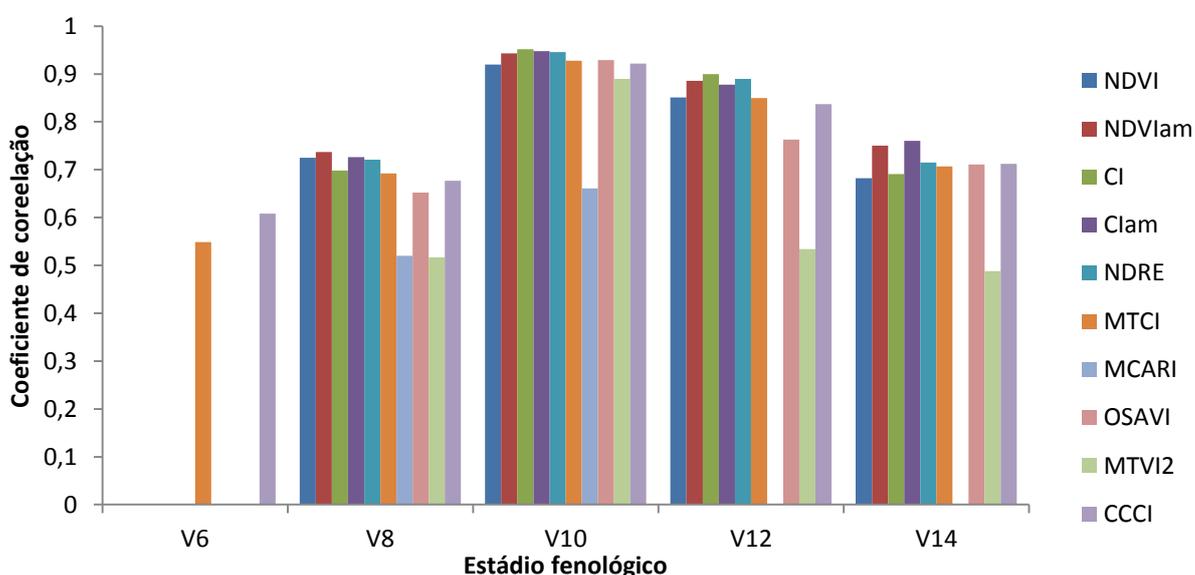


Figura 3 Coeficientes de correlação de Pearson entre altura e cada IV ao longo dos estádios fenológicos

Em V14 os valores de R^2 continuaram a decrescer para os IV's NDVI, CI, NDRE, MTCI e CCCI. No entanto, para os IV's $CI_{\text{âmbar}}$, $NDVI_{\text{âmbar}}$ e OSAVI os valores aumentaram em relação ao estágio anterior. Para os IV's $NDVI_{\text{âmbar}}$ e OSAVI neste estágio foram obtidos os maiores valores de R^2 entre todas as avaliações. Esses últimos dois IV's foram aumentando os valores de R^2 desde a avaliação em V8, indicando que o solo pode ter interferido de forma negativa e quanto maior a cobertura vegetal sobre o solo, maior foi o valor de R^2 encontrado. Entretanto, isso também pode ser indicativo de uma sensibilidade menor às alterações no dossel das plantas, porque os valores de correlação com o SPAD, altura e N foliar foram decrescendo até esse estágio.

As correlações entre os IV's com o SPAD apresentaram valores inferiores aos valores do estágio fenológico anterior (Figura 2), assim como as correlações com

altura (Figura 3). Os valores de correlação de N foliar com os IV's foram muito mais baixos em relação a V8 (Figura 4), além disso, apenas quatro IV's apresentaram valores significativos de correlação. Isso impede os sensores em trabalhar com os IV's em aplicações muito tardias de N, além de operacionalmente essa avaliação em campo poder ocasionar danos irreversíveis na cultura. Contudo, o uso tardio de sensores pode possibilitar uma avaliação mais precisa para a estimativa de produtividade, assim como observado por Shiratsuchi et al. (2011), devido ao menor tempo entre a avaliação com o sensor e a colheita.

Quando se trabalhou com os IV's MCARI e MTVI2, que trabalham com os comprimentos de onda de 550 nm foram apresentados os piores resultados. Esses resultados são contrastantes aos encontrados por Eitel (2008) que trabalhando com trigo e um radiômetro multiespectral apresentaram bons resultados com os mesmos IV's.

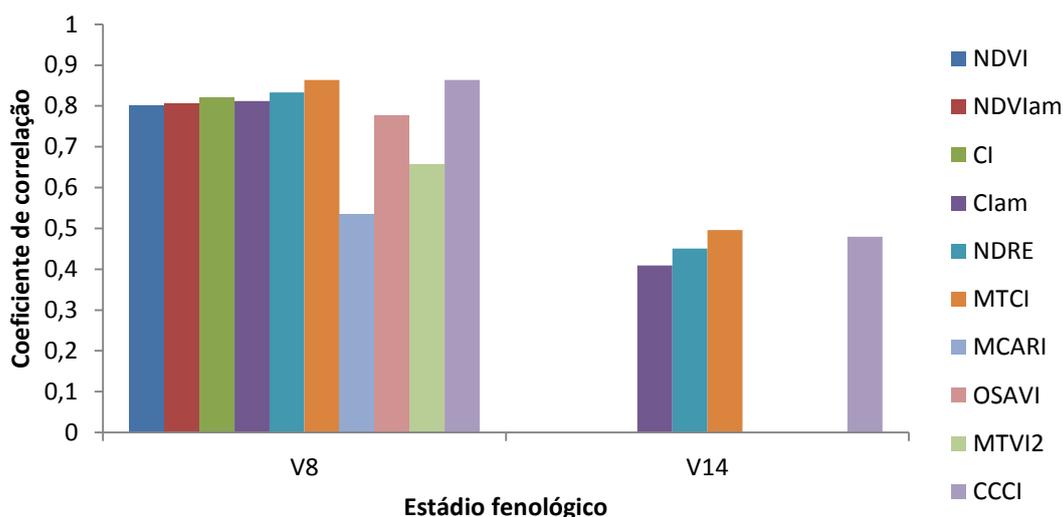


Figura 4 Coeficientes de correlação de Pearson entre N foliar e cada IV em dois estádios fenológicos

Na comparação entre NDVI, NDVI_{âmbar}, CI e CI_{âmbar}, o último IV foi o melhor IV para identificar as doses de N e para avaliar o estado nutricional de plantas, corroborando o que foi observado por Solari (2008) e por Amaral e Molin (2011). Os IV's NDVI e CI, que trabalham com o comprimento de onda de 670 nm (vermelho), apresentam uma maior facilidade de saturação do que quando se utiliza outros comprimentos de onda (Wu 2008).

Os melhores resultados de R² foram encontrados nas avaliações em V10 e V12 corroborando o que foi encontrado por Povh et al. (2011). Ferguson et al. (2011) criaram um algoritmo para aplicação de N em taxa variável no estado de Nebraska,

EUA, em estádios fenológicos mais tardios, V10 até V15. No entanto, a aplicação tardia pode causar danos irreversíveis à cultura (danos mecânicos), além da planta poder apresentar deficiência de N e reduzir o seu potencial produtivo.

Os IV's MTCl e CCCI foram os que melhor identificaram as doses de N e o estado nutricional de plantas de forma consistente ao longo do desenvolvimento da cultura. O mesmo foi observado por Shiratsuichi et al. (2010) para o IV MTCl e por Long et al. (2009) e Miao (2012) para o IV CCCI. Esses dois IV's podem ter apresentado os melhores resultados por trabalharem com três comprimentos de onda simultaneamente (670 nm, 730nm e 760 nm). O primeiro é o comprimento de onda que é bastante absorvido para a fotossíntese (Solari, 2006), o segundo apresenta maior habilidade em identificar fatores de estresse de plantas (Eitel et al., 2010) e o terceiro apresenta baixa absorbância pelos tilacóides e devido ao espelhamento das células do mesófilo, tendo alta relação com biomassa (Solari, 2006).

Esses dois IV's foram os que mais se destacaram em estádios iniciais. Dessa forma, estudos mais aprofundados podem ser conduzidos com esse IVs para possibilitarem intervenções com aplicação de N em taxa variável em estádios iniciais (V4 e V6).

Com exceção dos IV's MCARI e MTVI2, outros IV's apresentaram resultados semelhantes aos encontrados em clima temperado. Contudo, o filtro de 550 nm pode ter influenciado negativamente nesses dois IV's.

5. CONCLUSÕES

Os IV's possuem diferentes habilidades em identificar as doses de N. Os IV's que melhor identificaram as doses de N e o estado nutricional das plantas foram os IV's CCCI e MTCl. Os piores IV's foram o MCARI e MTVI2.

Os IV's apresentam dificuldade em identificar as doses de N em estádios iniciais (V4 e V6), mas os IV's CCCI e MTCl se mostraram potencial para serem usados nesses estádios. Em estádios vegetativos tardios (V10 e V12), os IV's identificaram melhor as doses de N, mas a aplicação de N nestes estádios pode causar danos à cultura e implicar numa deficiência de N.

Os IV's NDVI_{âmbar} e OSAVI apresentaram melhores resultados em estádios mais tardios (V14), embora esse comportamento possa ser um indicativo de menor sensibilidade de alterações no dossel das plantas ou que esses IV's são mais suscetíveis à interferência do solo.

Os IV's NDVI e CI, que trabalham com o comprimento de onda de 670 nm, foram os que apresentaram maior facilidade de saturação.

A comparação entre os IV's no Brasil apresentou resultados semelhantes quando comparado com os resultados obtidos em experimentos conduzidos em clima temperado.

6. AGRADECIMENTO

Ao colega Lucas Rios do Amaral pela colaboração neste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P. Sensor óptico no auxílio à recomendação de adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 12, p. 1633-1642, 2011.

AMARAL, L.R. **Sensor óptico no auxílio à recomendação de nitrogênio para a cultura da cana-de-açúcar**. 81 p. Dissertação (mestrado em Fitotecnia). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2010.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F; BORTOLINI, C. G.; FORSTHOFER, E. L.; STRIEDER, M. L. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, n. 2, p. 158-167, 2001.

ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E. T; HATFIELD, J. L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**. v.76, n. 2, p. 300-306, 1984.

CIGANDA, V. S.; GITELSON, A. A.; SCHEPERS, J. How deep does a remote sensor sense? Expression of chlorophyll content in a maize canopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 126, p. 240-247, 2012.

DAUGHTRY, C. S. T., WALTHALL, C. L., KIM, M. S., DE COLSTOUN, E. B., & MCMURTREY, J. E., Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, p. 229–239, doi:[10.1016/S0034-4257\(00\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9). 2000

EITEL, J.U.H.; LONG, D. S.; GESSLER, P.E.; HUNT, E. R. Combined spectral index to improve ground-based estimates of nitrogen status in dryland wheat. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 6, p. 1694-1702, 2008.

EITEL, J.U.H.; KEEFE, R.F.; LONG, D.S.; DAVIS, A.S.; VIERLING, L.A. Active ground optical remote sensing for improved monitoring of seedling stress in nurseries. **Sensors**, v. 10, p. 2843-2850, 2010. doi:10.3390/s100402843

EMBRAPA. Sistemas de produção 1: cultivo do milho. Sete Lagoas: Embrapa milho e sorgo, 2012 Disponível em:

<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_8ed/feraduba.htm> Acesso em: 04 jul. 2013.

FANCELLI, A.L. **Plantas Alimentícias: guia para aula, estudos e discussão**. Centro Acadêmico “Luiz de Queiroz”. ESALQ/USP, 1986. 131p.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D.; **Produção de milho**. 2ª Ed. Piracicaba: Os autores. p. 360, 2004.

FERGUSON, R.; SHANAHAN, J.; ROBERTS, D.; SCHEPERS, J.; SOLARI, F.; ADAMCHUK, V.; SHIRATSUCHI, L.; KRIENKE, B.; SCHLEMMER, M.; FRANCIS, D. In-Season nitrogen management of irrigated maize using a crop canopy sensor In: European Conference on Precision Agriculture, 8, 2011, Prague, **Anais...**, 11p, 2011.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

GITELSON, A. A.; VIÑA, A.; ARKEBAUER, T. J.; RUNDQUIST, D. C.; KEYDAN, G.; LEAVITT, B.; Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. **Geophysical Research Letter**, v. 30 n. 5, p. 1148, 2003. doi:10.1029/2002GL016450

LONG, D. S., EITEL, J. U. H., and HUGGINS, D. R. Assessing nitrogen status of dryland wheat using the canopy chlorophyll content index. Online. **Crop Management** [Online] doi:10.1094/CM-2009-1211-01-RS.

MIAO, F. L. Y.; CHEN, G. F. S. Y. X; LIU, B. Deriving nitrogen indicators of maize using

the canopy chlorophyll content index In: International Conference on Precision Agriculture, 11, 2012, Indianapolis. **Anais...**, 7p, 2012.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa: Editora: UFV, 320 p, 2005.

MOLIN, J.P. **Agricultura de Precisão – O Gerenciamento da Variabilidade**. O autor, Piracicaba, p.83, 2001.

POVH, F.P.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; SALVI, J.V. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 1075-1083, 2008.

POVH, F.P.; **Gestão da adubação nitrogenada em milho utilizando sensoriamento remoto**. 107 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2011.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B. ; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; MULLEN, R.W.; FREEMAN, K. W.; THOMASON, W.E.; LUKINA, E.V. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. **Agronomy Journal**, v. 94, p. 815-820, 2002.

RONDEAUX, G., STEVEN, M., & BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, p. 95–107. 1996. doi:[10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7).

ROUSE, J. W., JR., HASS, R. H., SCHELL, J. A., & DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium, 3, 1973, Washington, **Anais...** 1973, p.10–14.

SHANAHAN, J. F.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D.; VARVEL, G. E.; WILLHELM, W.W.; TRINGE, J. M.; SCHLEMMER, M.R.; MAJOR, D. J. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. **Agronomy Journal**, V.93, p.583-589, 2001.

SHIRATSUCHI, L. S.; FERGUSON, R. B.; SHANAHAN, J. F.; ADAMCHUK, V. I.; SLATER, G. P. Comparison of spectral indices derived from active crop canopy sensors

for assessing nitrogen and water status. In: International Conference on Precision Agriculture, 10, Denver, **Anais...**, 2010. 11p.

SHIRATSUCHI, L. S.; FERGUSON, R. B.; SHANAHAN, J. F.; ADAMCHUK, V. I.; SLATER, G. P. Water and nitrogen effects on active canopy sensor vegetation indices. **Agronomy journal**, v. 103, n. 6, p. 1815-1826, 2011

SOLARI, F. **Developing a crop based strategy for on-the-go nitrogen management in irrigated cornfields**. 157 p. Tese (PhD) - University of Nebraska, Lincoln, 2006.

SOLARI, F.; SHANAHAN, J.; FERGUSON, R.B.; SCHEPERS, J.S.; GITELSON, A.A. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 3, p. 571-579, 2008

TISDALE, S.L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D.; HAVLIN, J. L. Soil Fertility and Fertilizers. Prentice Hall, Upper Saddle River, 1993.

WOOD, C.W.; REEVES, D.W.; HIMELRICK, D.G. Relationship between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status, and crop yield: a review. In: WHEAT SYMPOSIUM, Christchurch. 1993, **Anais...**, Palmerston North: Agronomy Society of New Zealand, 1993. p. 1-9.

WASKOM, R. M.; WESTFALL, D. G.; SPELLMAN, D. E.; SOLTANPOUR, P. N. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 27, n. 3, p. 545-560, 1996.

WU, C.; NIU, Z.; TANG, Q.; HUANG, W. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: modeling and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 1230-1241, 2008.

ANEXO

Anexo 1 Valor P da análise de variância para as variáveis analisadas em todos os estádios fenológicos

Variável	V4	V6	V8	V10	V12	V14
SPAD	0.0115	>0,0001	>0,0001	>0,0001	>0,0001	>0,0001
Altura	-	0.0032	0.0001	>0,0001	>0,0001	>0,0001
N foliar	-	-	0.0002	-	-	0.0341
NDVI	0.0679	0.1167	>0,0001	>0,0001	0.0006	0.0005
NDVI _{âmbar}	0.0123	0.0875	>0,0001	>0,0001	>0,0001	0.0001
CI	0.1941	0.1547	>0,0001	>0,0001	>0,0001	>0,0001
CI _{âmbar}	0.0052	0.1854	>0,0001	>0,0001	>0,0001	>0,0001
NDRE	0.0761	0.0574	>0,0001	>0,0001	>0,0001	>0,0001
MTCI	0.1096	0.0095	>0,0001	>0,0001	>0,0001	>0,0001
MCARI	0.105	0.4106	0.0017	0.0662	0.8386	0.8344
OSAVI	0.0835	0.0998	>0,0001	>0,0001	0.001	0.016
MTVI2	0.3817	0.209	0.001	0.0001	0.0945	0.6748
CCCI	0.0024	0.0086	>0,0001	>0,0001	>0,0001	>0,0001