

LIMITES CRÍTICOS DE NDVI PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL PRODUTIVO DO MILHO

ANDRÉ LUIS VIAN¹, CHRISTIAN BREDEMEIER¹, PAULO REGIS FERREIRA DA SILVA¹,
ANTÔNIO LUIS SANTI², CECÍLIA PAZ DA SILVA GIORDANO¹
e FRANCIANE LEMES DOS SANTOS¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Faculdade de Agronomia, Porto Alegre-RS, Brasil;
andreluisvian@hotmail.com; bredemeier@ufrgs.br; paulo.silva@ufrgs.br;
cecilia.giordano@gmail.com; franciane_lemes@hotmail.com

²Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Centro de Educação Superior Norte
do Rio Grande do Sul, Frederico Westphalen-RS, Brasil santi_pratica@yahoo.com.br

Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v.17, n.1, p. 91-100, 2018

RESUMO - A estimativa do potencial produtivo da cultura do milho ao longo do ciclo de desenvolvimento é uma das novas práticas agrícolas que vêm sendo utilizadas para qualificar o manejo da cultura. Neste sentido, destaca-se a inserção de sensores de vegetação, com a finalidade de realizar o monitoramento do desenvolvimento e da condição nutricional da cultura ao longo do seu ciclo. O objetivo do presente trabalho foi determinar os limites críticos do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para a determinação de classes de potencial produtivo do milho em diferentes estádios fenológicos, utilizando sensor óptico ativo de vegetação (Greenseeker). O experimento foi conduzido na EEA/UFRGS, durante a safra agrícola 2013/2014. Os tratamentos consistiram de diferentes épocas de dessecação da aveia branca (*Avena sativa* L.) antes da semeadura da cultura do milho. As avaliações com o sensor óptico ativo foram realizadas nos estádios fenológicos V3, V5, V6, V7 e V8. Os resultados mostraram que o NDVI medido pelo sensor Greenseeker foi eficiente na predição da produtividade de milho em diferentes estádios fenológicos. Os limites críticos de NDVI, os quais correspondem a diferentes classes de potencial produtivo, podem ser identificados de maneira rápida e precisa entre os estádios fenológicos V3 a V8 e esta informação pode ser empregada para a adubação nitrogenada em taxa variável de acordo com o potencial produtivo estimado.

Palavras-chave: Greenseeker, índice de vegetação, *Zea mays*, NDVI.

CRITICAL LIMITS OF NDVI FOR YIELD POTENTIAL ESTIMATION IN MAIZE

ABSTRACT - The estimation of grain yield potential of maize along the growth cycle is one of new agricultural practices that have been used to qualify crop management. In this sense, the use of vegetation sensors can be highlighted, in order to carry out the monitoring of plant development and nutritional condition throughout its development. The objective of this study was to indicate NDVI critical limits for determining grain yield potential classes of maize in different growth stages using an active optical vegetation sensor (Greenseeker). The experiment was carried out in the 2013/14 growing season, in Eldorado do Sul, State of Rio Grande do Sul, southern Brazil. Treatments consisted of different dissection timing of oat (*Avena sativa* L.) before corn sowing. Evaluations with the active optical sensor were done at growth stages V3, V5, V6, V7, and V8. Results showed that NDVI measured by the sensor Greenseeker was efficient in identifying maize grain productivity at different growth stages. NDVI critical limits that correspond to different yield potential levels in maize can be quickly and precisely identified between V3 and V8 growth stages and this information can be used for site-specific nitrogen fertilization according to the estimated yield potential.

Keywords: Greenseeker, vegetation index, *Zea mays*, NDVI.

O potencial produtivo da cultura do milho pode ser monitorado desde o início de seu desenvolvimento, sendo os estádios fenológicos da emergência até o florescimento determinantes para a construção do potencial produtivo da planta, uma vez que entre estes estádios ocorrem a formação e a definição dos principais componentes de rendimento de grãos em milho, ou seja, número de plantas m^{-2} e número de grãos por espiga⁻¹.

O manejo da adubação nitrogenada em milho é um dos fatores que promovem a variabilidade no potencial produtivo, com aplicações de nitrogênio (N) realizadas habitualmente em taxa fixa (dose uniforme), ignorando a variabilidade espacial existente nas lavouras. Assim, a aplicação de uma mesma dose de N em toda área promove aplicações desnecessárias deste nutriente, podendo resultar em contaminação do ambiente e redução de sua eficiência agrônômica, por causa da aplicação acima da demanda em zonas que não necessitam de tanto N para o adequado desenvolvimento das plantas (Shanahan et al., 2008).

Atualmente, as doses de N recomendadas para a cultura do milho nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina baseiam-se no teor de matéria orgânica do solo, na expectativa de rendimento de grãos e na cultura antecessora (Reunião..., 2013). Entretanto, em muitas situações, a aplicação de N em cobertura apresenta baixa eficiência, em função do desconhecimento da demanda real das plantas no momento da aplicação (Duete, 2008). Outro fator importante é a dificuldade em estimar-se o potencial produtivo da cultura durante o desenvolvimento, pois, em razão das inúmeras condições adversas que podem ocorrer durante o ciclo, a estimativa do potencial produtivo (expectativa de rendimento) pode não se concretizar.

A determinação do potencial produtivo da cultura do milho ao longo do desenvolvimento no campo

torna-se importante a cada safra agrícola. Com o incremento da tecnologia e levando-se em consideração a variabilidade espacial existente do ponto de vista de solo, competição com plantas daninhas, adubação e culturas antecessoras, entre outros fatores, busca-se cada vez mais o ajuste de ferramentas que auxiliem na tomada de decisões. Neste sentido, o sensoriamento remoto pode ser empregado para auxiliar no monitoramento do desenvolvimento das plantas e de seu estado nutricional em relação ao nitrogênio (Kaneko et al., 2010; Chioderoli et al., 2012). Um dos principais avanços da agricultura de precisão (AP) foi a inserção de sensores de vegetação, os quais permitem o monitoramento da condição nutricional da cultura ao longo do ciclo de desenvolvimento, possibilitando aplicações à taxa variável de nitrogênio de acordo com a real necessidade da planta, em diferentes zonas dentro de um mesmo talhão (Liu, 2006; Grohs et al., 2009).

O sensoriamento remoto, através do emprego de sensores proximais de vegetação, proporciona o monitoramento do teor de clorofila nas folhas e da quantidade de biomassa vegetal da parte aérea (Esquerdo et al., 2011). Os sensores proximais variam em função da quantidade de bandas utilizadas e do índice de vegetação utilizado pelo equipamento, destacando-se os sensores comercialmente disponíveis Crop Circle[®], N-Sensor[®] e Greenseeker[®] (Huerta et al., 2013).

Um dos índices de vegetação mais utilizados é o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI - Normalized difference vegetation index), o qual pode ser empregado para a identificação da variabilidade espacial da produção de biomassa vegetal em uma lavoura. Essa variabilidade pode ser causada por variações na população e no crescimento de plantas, nutrição, incidência de doenças e pragas, entre outros, determinando potenciais produtivos da

cultura do milho espacialmente variáveis na área. Assim, o potencial produtivo deve ser estimado durante o desenvolvimento vegetativo, para que ocorra direcionamento do manejo, buscando a maximização da produtividade (Grohs et al., 2009).

Entretanto, o uso intensivo desta tecnologia em campo ainda é restrito, por causa do custo de aquisição do equipamento e da reduzida disponibilidade de algoritmos adequados para a cultura do milho. Com o advento do manejo sítio-específico e da taxa variável de semeadura, torna-se necessária a utilização de algoritmos que reconheçam a variabilidade do potencial produtivo em uma determinada área agrícola em função do efeito da cultura antecessora, da densidade de plantas e da condição nutricional (Horbe et al., 2013).

O objetivo do presente trabalho foi determinar os limites críticos do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para a determinação de classes de potencial produtivo da cultura do milho em diferentes estádios fenológicos, utilizando sensor óptico ativo de vegetação.

Material e Métodos

O trabalho em campo foi conduzido na safra agrícola 2013/2014 na Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no município de Eldorado do Sul-RS (latitude de 30°04'30"S e longitude de 51°39'18"W). A área experimental situa-se na região fisiográfica da Depressão Central, com altitude média de 46 metros aci-

ma do nível do mar. O clima é subtropical de verão úmido quente, do tipo Cfa, conforme a classificação de Köppen (Bergamaschi et al., 2003). A precipitação pluvial média anual em Eldorado do Sul é de 1.440 mm e a temperatura média mensal varia entre 14 e 25 °C, entre os meses mais frio e mais quente (Bergamaschi et al., 2003). O solo da área experimental é classificado como Argissolo vermelho distrófico típico (Streck et al., 2008).

A área do experimento é conduzida sob sistema plantio direto há 22 anos, com rotação de milho e soja no verão. Para caracterizar os atributos químicos da área experimental, realizou-se amostragem e análise de solo antes da instalação do experimento, sendo os resultados apresentados na Tabela 1.

Os tratamentos consistiram de diferentes épocas de dessecação da aveia branca (*Avena sativa* L.) antes da semeadura da cultura do milho (45, 30, 15 e 0 dias antes da semeadura - DAS), além de dois tratamentos adicionais: aveia dessecada aos 30 DAS sem aplicação de N na aveia branca e pousio. Os tratamentos foram escolhidos com o objetivo de gerar variabilidade na disponibilidade de N à cultura do milho e no desenvolvimento das plantas, em função do aporte de biomassa da cultura antecessora, resultando em diferentes potenciais produtivos. Os valores de biomassa da parte aérea da aveia branca no momento da semeadura do milho são mostrados na Tabela 2.

O experimento foi conduzido no delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições, sendo cada unidade experimental composta de oito linhas de 5 m de comprimento, espaçadas em 0,5

Tabela 1 - Atributos químicos do solo na área experimental, antes da instalação do experimento.

Argila (%)	pH (Água)	Fósforo (P) (mg dm ⁻³)	Potássio (K) (mg dm ⁻³)	CTC pH 7,0 (cmol dm ⁻³)	Matéria orgânica (g kg ⁻¹)
25,2	5,0	34,5	146	0,9	22,0

m, totalizando 20 m². A semeadura do milho foi realizada no sistema de semeadura direta, com auxílio de semeadora manual (saraquá), na densidade de 8 plantas m⁻². O híbrido simples utilizado foi o Status TL TG (Syngenta Seeds), de ciclo precoce. A adubação na semeadura foi de 30, 120 e 120 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, e a adubação de cobertura foi de 200 kg ha⁻¹ de N, parcelada em duas aplicações, nos estádios V4 (60 kg ha⁻¹) e V7 (140 kg ha⁻¹). Utilizou-se como fonte de N a ureia com inibidor da urease.

A reflectância do dossel vegetativo foi avaliada pelo sensor óptico ativo Greenseeker[®], o qual fornece o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). O NDVI é dado pela relação: $NDVI = (IVP - V) / (IVP + V)$, onde V refere-se à reflectância na região do vermelho (680 nm) e IVP refere-se à reflectância no infravermelho próximo (770 nm). As leituras foram realizadas com o equipamento posicionado paralelamente às linhas da cultura, em altura de 1,0 m acima do topo do dossel e com o deslocamento linear do equipamento sobre cada linha, com largura útil captada pelo sensor de 0,8

m, sendo avaliadas as quatro linhas centrais de cada unidade experimental. As leituras foram realizadas nos estádios fenológicos V3, V5, V6, V7 e V8, segundo a escala de Ritchie et al. (1993), a qual leva em consideração o número de folhas completamente expandidas na planta.

O rendimento de grãos foi determinado pela colheita de espigas na área útil, constituída de quatro linhas de 4 m de comprimento. Após a colheita, a massa de grãos foi pesada e corrigida para a umidade de 130 g kg⁻¹, sendo o valor extrapolado para kg ha⁻¹. Durante o desenvolvimento da cultura, foi realizado manejo fitossanitário conforme as indicações técnicas da cultura do milho (Reunião..., 2013). O monitoramento da necessidade de irrigação foi realizado pela instalação de sondas no solo (Hidrofarm[®]) para determinação da umidade volumétrica, sendo a irrigação realizada sempre que a umidade volumétrica do solo atingia o valor de 0,18 m³ m⁻³.

Para definição dos limites críticos de NDVI, foram adaptadas as classes utilizadas nos trabalhos desenvolvidos por Molin (2002) e Santi et al. (2012). Nestes trabalhos, as classes geradas foram utilizadas para dividir zonas de manejo de “alta”, “média” e “baixa” produtividade de grãos, tendo como base a média de produtividade de grãos da área considerada. Desta forma, o desenvolvimento de metodologia para monitoramento do potencial produtivo da cultura do milho ao longo do ciclo seguiu o mesmo procedimento para a construção de classes sugerido por estes autores, ou seja, a relativização das produtividades obtidas no experimento em relação à média do experimento (13,47 Mg ha⁻¹), a qual se assume como tendo o valor de 100%. Assim, são determinadas as seguintes classes de potencial produtivo: “baixa” (<90%), “média” (90 a 110%) e “alta” produtividades (>110% da produtividade média) (Figura 1).

Tabela 2 - Biomassa seca da parte aérea de aveia branca no momento da semeadura do milho, em função de diferentes épocas de dessecação.

Época de dessecação da aveia branca	Biomassa seca da parte aérea da aveia branca (t/ha)
POUSIO	6,80
0 DAS ¹	9,00
15 DAS	10,50
30 DAS	8,50
45 DAS	6,60
Aveia sem N 30 DAS	9,80

¹ DAS - dias antes da semeadura do milho.

Os dados de NDVI e rendimento de grãos foram submetidos à análise de variância pelo Teste F, com auxílio do pacote estatístico SASTM (Statistical Analysis System - SAS versão 8.0). Para os valores de NDVI e de produtividade relativizada, foi gerada análise de variância e, posteriormente, realizada análise de regressão para cada estágio fenológico avaliado. O NDVI avaliado em diferentes estádios fenológicos foi relacionado com o rendimento de grãos relativizado pela análise do coeficiente de correlação de Pearson.

Resultados e Discussão

Os elevados rendimentos de grãos foram obtidos em função da irrigação, da adubação e do manejo empregado (Tabela 3). A produtividade de grãos da cultura é atrelada ao manejo empregado na área experimental, com sistema plantio direto na palha, ao

manejo da irrigação e à adubação nitrogenada aplicada, a qual foi parcelada nos estádios V4 e V7, pois, durante os estádios iniciais de desenvolvimento da cultura, ocorrem importantes processos fisiológicos nas plantas, como a diferenciação do pendão e da espiga e a definição do número de óvulos na espiga. Por isso, nestes estádios o suprimento adequado de N para a planta é de fundamental importância para a definição de seu potencial produtivo (Saiz-Fernández et al., 2015).

Com o objetivo de aprimorar o uso de sensor óptico de vegetação baseado na leitura do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) na cultura do milho, foram determinadas classes (ou limites críticos) deste índice para cinco estádios vegetativos, de V3 (três folhas completamente expandidas) a V8 (oito folhas completamente expandidas), correspondente ao período que compreende a definição de parte

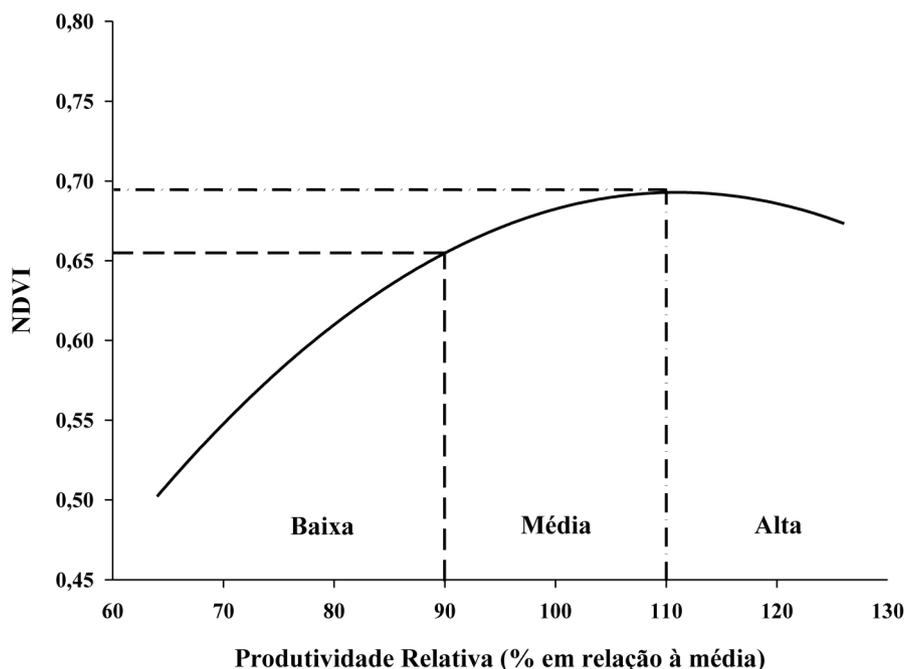


Figura 1 - Metodologia de estimativa de classes de potencial produtivo da cultura do milho em função do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).

do potencial produtivo da cultura. Este período exige adequada suplementação de N para manutenção do metabolismo da planta, promovendo o aumento de área foliar, biomassa na parte aérea e teor de clorofila nas folhas, que darão suporte para elevada produtividade de grãos pela fotossíntese (Huang et al., 2011).

Os limites críticos do NDVI para a definição das classes de potencial produtivo, em cada estágio fenológico avaliado, foram definidos de acordo com metodologia descrita anteriormente, tomando-se como base a relação existente entre os valores de NDVI e o rendimento de grãos relativo (Figura 2).

Em todos os estádios avaliados, houve correlação significativa entre NDVI e produtividade de grãos de milho ($p=0,01$), sendo ajustadas regressões lineares significativas entre estas variáveis (Figura 2). Quando avaliado o coeficiente de correlação do NDVI nos diferentes estádios vegetativos com o rendimento de grãos relativizado, foram observadas correlações de $r=0,63$ para o estágio V3; $r=0,70$ para o estágio V5; $r=0,78$ para os estádios V6 e V7 e $r=0,83$ para o

estádio V8, sendo todos os coeficientes de correlação estatisticamente significativos ($p<0,01$). Observa-se que, com o crescimento das plantas, ocorre melhoria na predição (coeficiente de correlação) entre o NDVI e o rendimento de grãos.

Maiores valores de NDVI avaliados em todos os estádios fenológicos se relacionaram a maiores produtividades de grãos de milho (Figura 2). Em trabalho com adubação em taxa variável em trigo, Povh et al. (2008) também encontraram valores de NDVI mais elevados em áreas que tinham recebido maior dose de N e que apresentaram maior potencial produtivo. Neste caso, o maior potencial produtivo deveu-se a maior disponibilidade de N, maior acúmulo de biomassa e maior sobrevivência de afilhos. Em cevada, Grohs et al. (2009) encontraram alta relação entre o valor de NDVI avaliado no estágio de seis folhas completamente expandidas, o número de colmos por área e a biomassa da parte aérea.

Os valores de NDVI apresentaram moderada (no estágio V3) e alta (nos estádios V5, V6, V7 e V8) correlação com rendimento de grãos de milho, segundo a classificação do valor do coeficiente de correlação de Pearson proposta por Mukaka (2012) (Figura 2), e podem ser empregados como uma ferramenta para definição de “zonas de manejo”, visando a aplicação de fertilizantes em taxa variável e manejos direcionados. Esse método consiste na definição e na demarcação em campo de divisas para setores do talhão onde serão aplicadas doses diferenciadas de algum insumo. Além disso, este conceito subentende que o tratamento seja feito uniformemente dentro de cada zona.

Os limites críticos de valores do NDVI, determinados com base nas relações mostradas na Figura 2 para as classes “baixa”, “média” e “alta” produtividades, estão sumarizados na Tabela 4.

Tabela 3 - Rendimento de grãos de milho em função da época de dessecação da cultura antecessora (aveia branca).

Época de dessecação	Rendimento de grãos (t/ha)
POUSIO	14,87 A ¹
O DAS ²	13,70 A
15 DAE	13,50 A
30 DAS	14,40 A
45 DAS	14,63 A
Aveia sem N	7,79 B

¹ Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p=0,05$).

² DAS - dias antes da semeadura do milho.

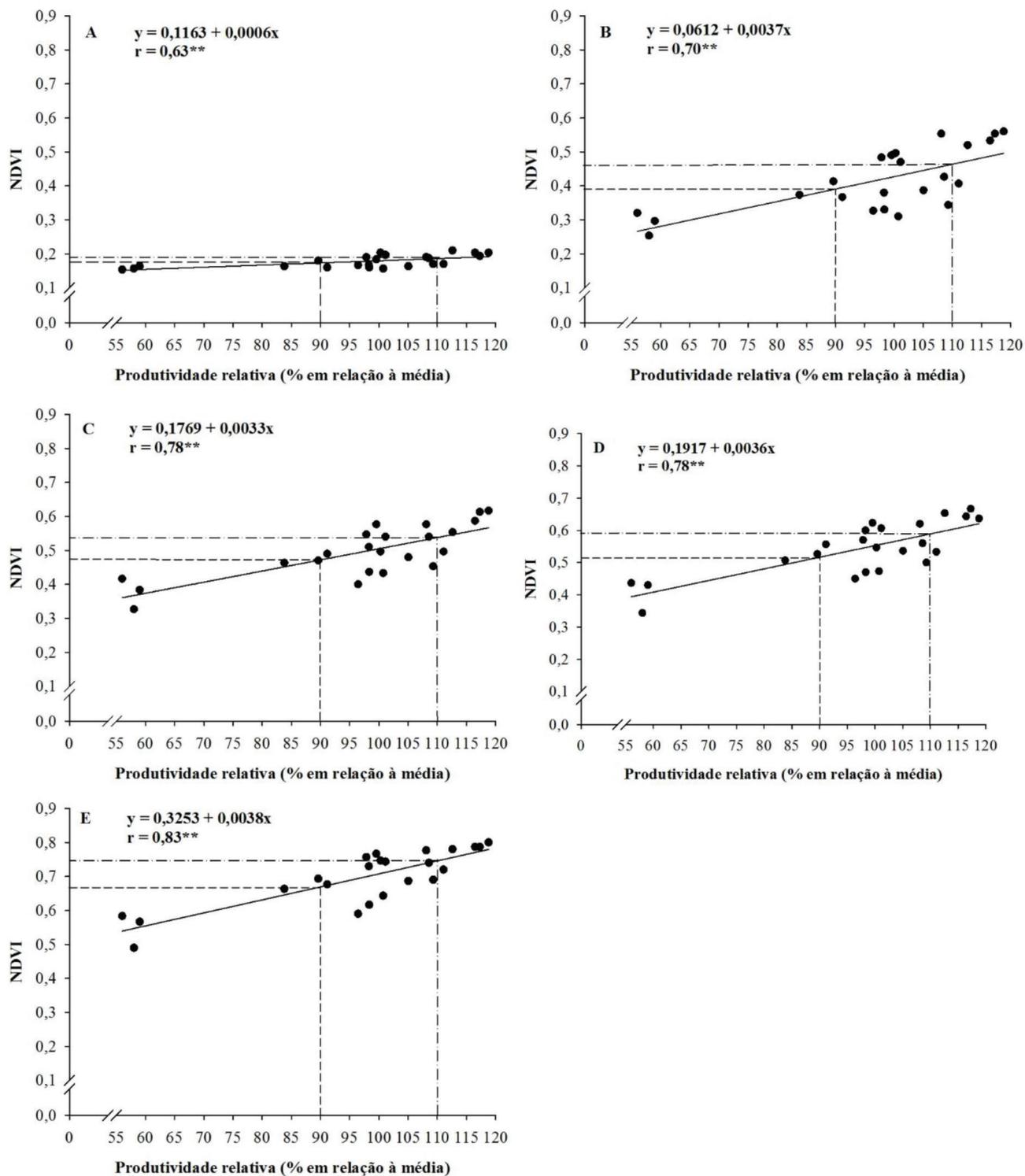


Figura 2 - Limites críticos do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) na cultura do milho para a definição de classes de potencial produtivo nos estádios fenológicos V3 (A), V5 (B), V6 (C), V7 (D) e V8 (E). ** Significativo ao nível de 1% de significância.

Tabela 4 - Limites críticos do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para definição de classes de potencial produtivo da cultura do milho em diferentes estádios fenológicos de desenvolvimento.

Estádio de desenvolvimento ¹	Classes de potencial produtivo		
	Baixa	Média	Alta
V3	<0,17	0,17 – 0,19	>0,19
V5	<0,39	0,39 – 0,46	>0,46
V6	<0,47	0,47 – 0,53	>0,53
V7	<0,51	0,51 – 0,59	>0,59
V8	<0,66	0,66 – 0,75	>0,75

¹Escala de Ritchie et al. (1993).

As recomendações de doses de adubação nitrogenada para o milho são tradicionalmente realizadas ainda na pré-semeadura da cultura (Reunião..., 2013), em que se consideram critérios como o teor de matéria orgânica do solo, a cultura antecessora e o rendimento de grãos esperado, não se levando em consideração outros fatores que influenciam a disponibilidade deste nutriente no solo. Assim, a ocorrência de fatores pós-semeadura faz com que haja um padrão de desenvolvimento que pode levar a diferentes potenciais produtivos da cultura dentro de uma mesma lavoura.

Além disso, a definição da dose de N a ser aplicada em função da produtividade esperada é imprecisa e sujeita a erros, uma vez que o potencial de rendimento de grãos varia ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, em função das condições de manejo dela, da variação de biomassa da cultura antecessora e das condições meteorológicas. Com isso, há grande probabilidade da expectativa de rendimento não se concretizar, pois, no momento do planejamento, esses fatores não são levados em consideração, pela sua alta variação temporal e espacial.

Com a utilização do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e de sensor de vegetação para a estimativa de classes de potencial produtivo da cultura ao longo do ciclo de desenvolvimento, a expectativa de rendimento de grãos pode ser ajusta-

da em cada estágio fenológico, o que confere melhor manejo nutricional quando comparado ao método tradicional de aplicação de taxa fixa (dose uniforme em toda área), a qual considera que o potencial produtivo é uniforme na lavoura. Assim, a relação que o NDVI apresenta com a produtividade de grãos é importante para que as produtividades nas zonas de diferentes potenciais produtivos sejam maximizadas (Li et al., 2010). O uso desta ferramenta permite que se realize a identificação, em tempo real e in situ, do potencial produtivo em diferentes estádios vegetativos da cultura do milho, permitindo que a adubação nitrogenada possa ser ajustada e aplicada de acordo com o potencial produtivo estimado. Uma forma de ajustar as doses dos fertilizantes nitrogenados em tempo real seria aumentar as doses a serem aplicadas nos locais que apresentam um maior potencial produtivo, buscando, dessa forma, a maximização do rendimento de grãos.

Desta maneira, torna-se fundamental o uso de ferramentas que possam estimar o potencial produtivo de uma lavoura in situ de maneira precisa, eficiente e rápida, em tempo real, visando otimizar a aplicação de N em cobertura e permitir a aplicação deste nutriente em taxa variável. Segundo Milani et al. (2006), a estimativa do potencial produtivo das culturas em um determinado estágio fenológico via-

biliza o manejo sítio-específico em lavouras, como adubações em taxa variável. Neste sentido, sensores remotos para avaliação da reflectância e de índices de vegetação, como o NDVI, surgem como importantes ferramentas para detectar a variabilidade espacial do potencial produtivo de maneira mais precisa.

Para auxiliar na quantificação do potencial produtivo, a utilização de sensores de vegetação, como o Greenseeker, que faz avaliações em tempo real e fornece estimativas do potencial produtivo através do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), pode ser importante ferramenta na determinação de doses de fertilizante nitrogenado mais condizentes com a real necessidade de N pelas plantas. Schmidt et al. (2011) encontraram boa eficiência entre as leituras de NDVI com a quantificação da necessidade de fertilizantes nitrogenados em milho.

Conclusões

O Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), avaliado com o sensor óptico ativo de vegetação Greenseeker, foi eficiente para a identificação de classes de potencial produtivo em diferentes estádios fenológicos da cultura do milho (V3 a V8).

Os limites críticos de NDVI, que correspondem a diferentes classes de potencial produtivo do milho, podem ser empregados de maneira rápida e eficiente em um algoritmo de adubação nitrogenada em tempo real, através do potencial produtivo estimado pelo NDVI.

A relação verificada entre os valores de NDVI e a produtividade de grãos deve ser considerada na definição e no uso das classes de limites críticos de NDVI.

Referências

- BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M. R.; CARDOSO, L. S.; SILVA, M. I. G. **Climada Estação Experimental da UFRGS e região de abrangência**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 78 p.
- CHIODEROLI, C. A.; MELLO, L. M. M.; GRIGOLLI, P. J.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, J. O. R.; CESARIN, A. L. Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 37-43, 2012. DOI: [10.1590/S1415-43662012000100005](https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000100005).
- DUETE, R. R. C.; MURAOKA, T.; SILVA, E. C.; TRIVELIN, P. C. O.; AMBROSANO, E. J. Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (¹⁵N) pelo milho em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, 2008. DOI: [10.1590/S0100-06832008000100016](https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100016).
- ESQUERDO, J. C. D. M.; ZULLO, J.; ANTUNES, J. F. G. Use of NDVI/ AVHRR time-series profiles for soybean crop monitoring in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 32, n. 3, p. 3711-3727, 2011. DOI: [10.1080/01431161003764112](https://doi.org/10.1080/01431161003764112).
- GROHS, D. S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M.; POLETTO, N. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor Greenseeker. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.1, p.101-112, 2009. DOI: [10.1590/S0100-69162009000100011](https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000100011).
- HONG, S. D.; SCHPERS, J.; FRANCIS, D. D.; SCHLEMMER, M. R. Comparison of ground-based remote sensors for evolution of corn biomass affected by nitrogen stress. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 38, n. 15/16, p. 2209-2226, 2007. DOI: [10.1080/00103620701549157](https://doi.org/10.1080/00103620701549157).
- HORBE, T. A. N.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O.; ALBA, P. J. Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. **Precision Agriculture**, New York, v. 14, n. 4, p. 450-465, 2013. DOI: [10.1007/s11119-013-9308-7](https://doi.org/10.1007/s11119-013-9308-7).

- HUANG, W.; WANG, Z.; HUANG, L.; LAMB, D. W.; MA, Z.; ZHANG, J.; WANG, J. Estimation of vertical distribution of chlorophyll concentration by bi-directional canopy reflectance spectra in winter wheat. **Precision Agriculture**, New York, v. 12, n. 2, p. 165-178, 2011. DOI: [10.1007/s11119-010-9166-5](https://doi.org/10.1007/s11119-010-9166-5).
- HUERTA, R. F. M.; GONZALVEZ, R. G. G.; MEDINA, L. M. C.; PACHECO, I. T.; OLIVAREZ, J. P.; VELAZQUEZ, R. V. O. A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. **Sensors**, v. 13, n. 8, p. 10823-10843, 2013. DOI: [10.3390/s130810823](https://doi.org/10.3390/s130810823).
- KANEKO, F. H.; ARF, O.; GITTI, D. de C.; ARF, M. V.; CHIODEROLI, C. A.; KAPPES, C. Manejo do solo e do nitrogênio e milho cultivado em espaçamentos reduzidos e tradicional. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 3, p. 677-686, 2010. DOI: [10.1590/S0006-87052010000300020](https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000300020).
- LI, Y.; CHEN, D.; WALKER, C. N.; ANGUS, J. F. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 118, n. 3, p. 221-227, 2010. DOI: [10.1016/j.fcr.2010.05.011](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.05.011).
- LIU, W.T.H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006. 908 p.
- MILANI, L.; SOUZA, E. G.; URIBE-OPAZO, M. A.; FILHO, A. G.; JOHANN, J. A.; PEREIRA, J. O. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 28, n. 4, p. 591-598, 2006. DOI: [10.4025/actasciagron.v28i4.937](https://doi.org/10.4025/actasciagron.v28i4.937).
- MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 83-92, 2002.
- MUKAKA, M. M. Statistics corner: a guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**, v. 24, n. 3, p. 69-71, 2012.
- 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**, Brasília, DF, v. 43, n. 8, p. 1075-1083, 2008. DOI: [10.1590/S0100-204X2008000800018](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000800018).
- REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 58., REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO SORGO, 41., 2013, Pelotas. **Indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul: safras 2013/2014 e 2014/2015**. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 124 p.
- RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1993. 26 p. (Special Report, 48).
- SAIZ-FERNÁNDEZ, I.; DE DIEGO, N.; SAMPEDRO, M. C.; MENA-PETITE, A.; ORTIZ-BARREDO, A.; LACUESTA, M. High nitrate supply reduces growth in maize, from cell to whole plant. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v. 173, n. 1, p. 120-129, 2015. DOI: [10.1016/j.jplph.2014.06.018](https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.06.018).
- SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; MARTIN, T. N.; PIRES, J. L.; DELLA FLORA, L. P.; BASSO, C. J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 9, p. 1346-1357, 2012. DOI: [10.1590/S0100-204X2012000900020](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900020).
- SCHMIDT, J.; BEEGLE, D.; ZHU, Q.; SRIPADA, R. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 120, n. 1, p. 94-101, 2011. DOI: [10.1016/j.fcr.2010.09.005](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.09.005).
- SHANAHAN, J. F.; KITCHEN, N. R.; RAUN, W. R.; SCHEPERS, J. S. Responsive in-season nitrogen management for cereals. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 61, n. 1, p. 51-62, 2008. DOI: [10.1016/j.compag.2007.06.006](https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.06.006).
- STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222 p.