

# Aplicação de nitrogênio em tempo real: modelos e aplicações

Christian Bredemeier<sup>1</sup>, André Luis Vian<sup>2</sup>, João Leonardo Fernandes Pires<sup>3</sup>

### Resumo

A indicação de nitrogênio (N) para as culturas do trigo e milho são baseadas em análises de solo, onde não é considerada a variabilidade espacial existente desse nutriente na área. Dessa maneira, o fertilizante nitrogenado é distribuído de maneira uniforme em toda área, ou seja, é aplicada uma dose única de N estimada pela necessidade média da área. Porém, cada sub-área dentro da lavoura pode apresentar diferentes capacidades de suprimento de N e diferentes potenciais produtivos, necessitando doses de N diferenciadas para maximizar o rendimento de grãos de cada sub-área. Neste capítulo serão abordados os aspectos gerais sobre as necessidades nutricionais das culturas do trigo e do milho, juntamente com os parâmetros levados em consideração para se definir a aplicação de nitrogênio à taxa variável em cobertura. Também, serão abordadas algumas aplicações das ferramentas de sensoriamento remoto nestas culturas.

**Palavras-chave:** adubação nitrogenada, taxa variável, sensor de vegetação, agricultura de precisão.

### Nitrogen application in real time: models and applications

### Abstract

Nitrogen recommendation for wheat and maize are mainly based on soil analysis and the spatial variability of this nutrient is not taken into account when topdressing N is applied. In consequence, a single N rate is uniformly applied in the field, based on the average need of the whole area. On the other hand, different sites inside the field can present different N supply capacities as well as different yield potentials and nitrogen fertilizer should be applied site-specifically to maximize yield. In this chapter, we discuss general

---

<sup>1</sup> Professor Adjunto, Departamento de Plantas de Lavoura/UFRGS. Endereço: Av. Bento Gonçalves, 7712, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: bredemeier@ufrgs.br

<sup>2</sup> Mestre em Fitotecnia, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia/UFRGS, Departamento de Plantas de Lavoura/UFRGS. Endereço: Av. Bento Gonçalves, 7712, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: andre Luisvian@hotmail.com.

<sup>3</sup> Pesquisador da Embrapa Trigo. Endereço: Rodovia BR-285, Km 294, Passo Fundo, RS, Brasil. E-mail: joao.pires@embrapa.br

aspects related to nutritional needs in wheat and maize as well as the variables considered for topdressing N management and remote sensing applications in these crops.

**Keywords:** nitrogen fertilization, variable rate, canopy sensor, precision agriculture.

## 7.1 Importância do nitrogênio para as culturas

Os nutrientes com maior demanda pelas plantas de milho são o fósforo, o potássio e o nitrogênio (N), sendo o N o nutriente extraído em maior quantidade pela cultura (Silva *et al.*, 2005). Estudos mostram que, para cada tonelada de grãos produzidos, a cultura do milho acumula, aproximadamente, 28 kg ha<sup>-1</sup> de N na parte aérea e exporta nos grãos em torno de 60% deste valor, ou seja, 17 kg ha<sup>-1</sup> de N (Weligama *et al.*, 2010). O N é nutriente fundamental para as plantas, pois é constituinte de paredes celulares, proteínas, ácidos nucleicos, aminoácidos, enzimas, alcalóides, hormônios e clorofila (Marschner & Marschner, 2012).

As características apresentadas pelas plantas quando ocorre baixa disponibilidade de N no sistema, provocando sua deficiência na planta, são a redução da atividade metabólica, clorose e amarelecimento das folhas mais velhas da planta, resultando em redução na taxa fotossintética. Em consequência, ocorre redução do tamanho das folhas, do teor de proteína nos grãos e do potencial produtivo da cultura (Huang *et al.*, 2007; Bissani *et al.*, 2008; Saiz-Fernández *et al.*, 2015).

O N tem relação direta com o crescimento e o desenvolvimento das plantas, uma vez que este nutriente desempenha funções bioquímicas e fisiológicas importantes no metabolismo vegetal. O efeito desta relação é influenciado pelas formas nas quais o N está disponível no solo (amônio - NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ou nitrato - NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Essa variação na absorção sofre influência das condições meteorológicas e de solo (temperatura, pH do solo, umidade, tipo de solo e atividade microbiana), as quais influenciam a mineralização da matéria orgânica para NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e, posteriormente, a nitrificação para NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Dharmakeerthi *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 2015). Contudo, a eficiência na absorção destas formas minerais é baixa, sendo que a absorção do N aplicado varia entre 50 a 60% do total disponibilizado pela adubação (Zhu *et al.*, 2009; Saiz-Fernández *et al.*, 2015).

Apesar da importância fisiológica do N, em regiões tropicais e subtropicais, devido ao grande número de reações que o N sofre no ambiente e à sua elevada mobilidade no solo e na planta, o N é um dos nutrientes mais difíceis de serem manejados eficientemente na agricultura (Amaral *et al.*, 2015). Devido a isso, a adubação nitrogenada necessita ser manejada da maneira mais eficiente possível, pela utilização de doses condizentes com as reais necessidades da planta, pelo uso de fontes adequadas deste nutriente, pela aplicação nos estádios de desenvolvimento das plantas com maior necessidade ou maior resposta ao fertilizante (definição do potencial produtivo) e no local

correto, podendo ser variada a quantidade de fertilizante nitrogenado ofertado para as plantas de acordo com sua necessidade (adubação em dose variada) (Fixen, 2010).

A definição do potencial produtivo das culturas ocorre durante a fase inicial de desenvolvimento das mesmas. Na cultura do milho, os estádios iniciais (entre os estádios V4 e V10), são os determinantes para a definição do potencial produtivo, pois nestes estádios ocorrem processos fisiológicos importantes na planta, como a diferenciação do pendão e da espiga, juntamente com a diferenciação do número de óvulos na espiga. Por isso, o suprimento adequado de N para a planta nestes estádios é de fundamental importância para o desenvolvimento e para definição do potencial produtivo (Saiz-Fernández *et al.*, 2015).

Nos cereais de inverno, como por exemplo, as culturas do trigo e cevada, vários trabalhos definiram a emissão da sexta folha do colmo principal como o momento crítico para a concretização do potencial de rendimento e para a aplicação de N em cobertura (Bredemeier & Mundstock, 2001; Wamser & Mundstock, 2007). O suprimento de N em cobertura nessas culturas é importante na maioria das regiões produtivas, pois a planta inicia a definição do potencial produtivo, como o número de afilhos a serem emitidos, sendo o N importante para a manutenção da sincronia de desenvolvimento entre colmo principal e afilhos. Ao final do afilhamento, as plantas absorvem cerca de um terço do N que será utilizado durante todo o seu ciclo.

Para garantir a eficiência do N aplicado no momento de maior demanda pelas culturas, busca-se, além de condições meteorológicas adequadas no momento da aplicação na lavoura, a aplicação de doses condizentes com as reais necessidades da cultura, por meio do uso de ferramentas que permitam a identificação da variabilidade nutricional nas plantas, quantificação dos teores de clorofila e biomassa e aplicação em tempo real das demandas de N, sendo este um desafio no manejo deste nutriente (Bredemeier, 1999).

## **7.2 Agricultura de precisão (AP) e aplicação de insumos à taxa variável**

A busca por maiores rendimentos de grãos gera a necessidade de aprimorar e desenvolver práticas de manejo mais eficientes. A implantação do sistema de plantio direto (SPD), a inserção de cultivares geneticamente melhoradas, a maior eficiência no uso de insumos e o aprimoramento das máquinas, permitiram incrementos no potencial produtivo das culturas. Entretanto, a agricultura tradicionalmente realizada possui entendimento que uma área agrícola apresenta comportamento homogêneo, sendo seu manejo realizado em função da necessidade média para a aplicação dos insumos (fertilizantes na semeadura e nas aplicações em cobertura, defensivos agrícolas, água, calcário), fazendo com que a mesma formulação e/ou quantidade do insumo seja utilizada em toda a área, desconsiderando as necessidades

específicas de cada parte da lavoura, ou das zonas de manejo, causando e aumentando a variabilidade de rendimento de grãos na área (Pierce & Nowak, 1999; McBratney *et al.*, 2005).

Diante deste cenário, na tentativa de manejar essa variabilidade e aumentar a eficiência na aplicação de insumos, surgiu a agricultura de precisão (AP), com a finalidade de conhecer e estudar a variabilidade da lavoura e gerenciá-la, ou seja, aumentar a coleta de informações da área, proporcionando maior precisão na tomada de decisão sobre as intervenções realizadas. Com estas ferramentas tecnológicas, foi intensificado o levantamento e coleta de dados das áreas produtivas, permitindo o conhecimento da variabilidade existente do tipo de solo, de fertilidade, de diferentes potenciais produtivos e demais fatores que influenciam a produção, usando métodos adequados e diferenciados para o manejo destes (Larson & Robert, 1991; Salviano *et al.*, 1998; Silva *et al.*, 2003). Um dos principais conceitos da AP pode ser explicado como a aplicação de insumos no local correto, nas quantidades necessárias e nos momentos adequados, em áreas cada vez menores e mais homogêneas, ou seja, em sítios específicos (Sawyer, 1994; Pierce & Sadler, 1997).

Dentre as ferramentas utilizadas, destacam-se as que utilizam o sensoriamento remoto para estimativa do potencial produtivo das culturas e realização de aplicações de fertilizantes nitrogenados à taxa variável. Dessa forma, é possível estimar o estado nutricional das plantas durante o ciclo de desenvolvimento e realizar a aplicação e a variação das quantidades aplicadas de N em tempo real, possibilitando maior eficiência do uso do fertilizante e aumento do potencial produtivo das culturas (Wei *et al.*, 2008; Schmidt *et al.*, 2011).

### **7.3 Sensores de vegetação como ferramentas para manejo da adubação nitrogenada**

As leituras realizadas por meio de sensores de vegetação em tempo real permitem maior agilidade no processo de tomada de decisão em relação a práticas de manejo durante o ciclo da cultura, permitindo a identificação e a correção de deficiências nutricionais causadas pelo N (Raun *et al.*, 2002; Kitchen *et al.*, 2010; Amaral & Molin, 2011; Lofton *et al.*, 2012).

As leituras em tempo real foram adaptadas ao uso agrícola para serem realizadas a campo por meio de sensores de vegetação, os quais são montados em tratores ou em distribuidores a lanço auto-propelidos. Atualmente, encontra-se no mercado uma série de sensores de vegetação, tais como Greenseeker®, N-Sensor® e Crop Circle®. O emprego desses sensores apresenta a mesma finalidade, ou seja, a quantificação de um índice de vegetação específico para cada sensor para estimativa da dose de N em cobertura a ser aplicada em uma determinada cultura (Feng *et al.*, 2008; Schmidt *et al.*, 2009; Erdle *et al.*, 2011).

### 7.3.1 Sensor óptico ativo (*Greenseeker*®)

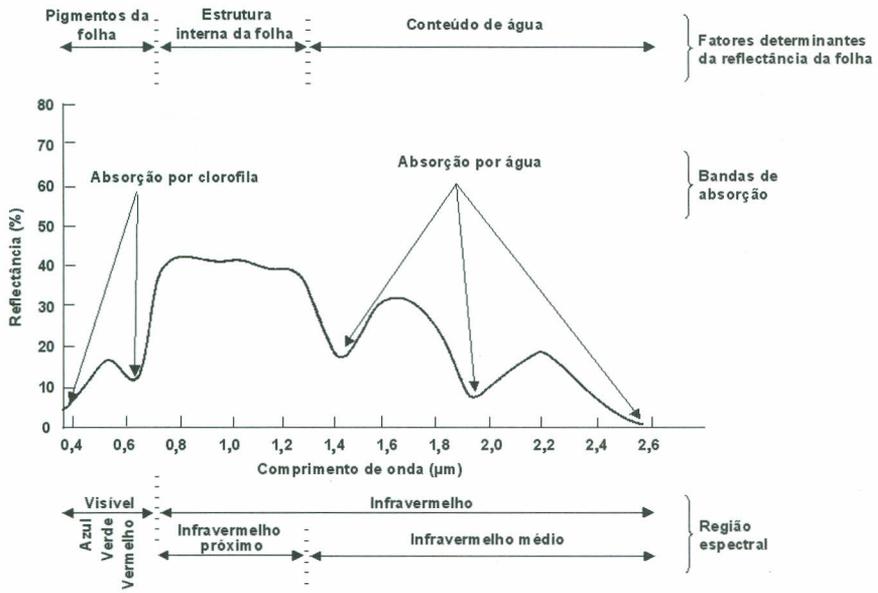
Um dos sensores de vegetação atualmente utilizado é o *Greenseeker*, o qual foi desenvolvido pela Universidade de Oklahoma (EUA) na década de 1990. O seu princípio de funcionamento é por diodos de emissão de radiação na faixa do vermelho (680 nm) e do infravermelho próximo (770 nm). A radiação emitida é refletida pelo dossel da cultura e medida por um fotodiodo localizado no equipamento. Os dados são calculados por um microprocessador interno, fornecendo o valor do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (NTech Industries, 2013).

O NDVI é quantificado pela seguinte relação  $(\rho_{\text{ivp}} - \rho_v) / (\rho_{\text{ivp}} + \rho_v)$ , onde  $\rho_{\text{ivp}}$  e  $\rho_v$  se referem à reflectância do infravermelho próximo e vermelho, respectivamente. Este índice apresenta variação numérica de -1 a +1, sendo os valores positivos referentes ao vigor vegetativo da cultura, enquanto que os valores negativos indicam presença de água ou ausência de vegetação (Rouse *et al.*, 1973; Liu *et al.*, 2006).

O princípio do sensor baseia-se nas bandas de absorção da radiação visível pelas plantas, que estão situadas principalmente próximas a 480 nm e 680 nm, relacionadas à presença de clorofila. O comprimento de onda entre 700 nm e 1300 nm representa o infravermelho próximo, onde ocorre alta reflectância pela vegetação, chegando a 50% da radiação incidente (Figura 1). Esta reflectância sofre influência da estrutura celular interna da folha, tamanho e formato da célula e ocorrência de espaços intercelulares (Shanahan *et al.*, 2008; Amaral & Molin, 2011). Deste modo, as faixas do espectro eletromagnético do visível (480 - 680 nm) e do infravermelho próximo (700 - 1300 nm) foram definidas como indicadoras de deficiências nutricionais e estresses nas plantas, por apresentarem relação com a condição do dossel vegetativo (Carter & Knappa, 2001; Molin, 2001). A correlação existente entre a reflectância na faixa de 680 nm e a concentração de clorofila nas folhas, assim como entre a reflectância na região do infravermelho próximo e a quantidade de biomassa presente no dossel, é determinante na estimativa do estado nutricional de uma planta ou cultura, o qual se relaciona com a concentração de clorofila e a produção de biomassa de uma comunidade vegetal (Carter & Knappa, 2001; Baker, 2008; Solari *et al.*, 2008).

A utilização do sensor óptico ativo *Greenseeker* na estimativa da condição nutricional das culturas é influenciada pelas diferentes interações solo-planta. Em condições de lavouras, existe a variabilidade espacial de variáveis de planta e solo, resultando em diferentes respostas na reflectância, que podem não estar associadas apenas ao estado nutricional da planta, mas também ser decorrentes de outros estresses bióticos e/ou abióticos. Desta maneira, as avaliações frequentes do estado nutricional da cultura podem auxiliar no manejo da adubação nitrogenada durante seu ciclo, pois o teor de clorofila nas folhas de milho se relaciona com a concentração de N nas mesmas e, devido às interações

com os fatores bióticos e abióticos, promovem variação na atividade fotossintética das plantas e no potencial produtivo (Guimarães *et al.*, 1999).



**Figura 1** Curva típica de reflectância da vegetação. Fonte: Rizzi, (2004).

As medições realizadas no dossel vegetativo da cultura durante seu desenvolvimento, como o NDVI (Figura 2), tem potencial para melhorar o rendimento e a qualidade de grãos, por meio da aplicação localizada de fertilizantes nitrogenados à taxa variável. Os principais fatores que determinam uma adequada avaliação da condição nutricional são a área foliar, a biomassa total e os teores de clorofila e N na massa seca da cultura. As variações espaciais e temporais destas variáveis devem ser determinadas, de modo que a quantidade de N aplicada corresponda às reais exigências da cultura tanto quanto possível (Hansen & Schjoerring, 2003).

O NDVI é um índice agrônomo eficiente visando detectar deficiências nutricionais nas plantas. Alguns estudos alertam sobre a necessidade de se determinar a melhor estratégia para indicação de adubações nitrogenadas a partir dessas leituras (Molin *et al.*, 2010; Portz, 2011; Portz *et al.*, 2011). Como maneira de validar a metodologia de estimativa da condição nutricional das plantas, estudos realizados mostraram alta relação entre NDVI e N acumulado na biomassa de cultivares de trigo e cevada (Serrano *et al.*, 2000; Grohs *et al.*, 2009). Também, foram encontradas altas correlações entre NDVI e produtividade de colmos de cana-de-açúcar (Molin *et al.*, 2010; Lofton *et al.*, 2012). Na cultura do milho, foi reportada alta correlação entre os valores de NDVI

e a produção de biomassa da parte aérea e o rendimento de grãos (Freeman *et al.*, 2007; Martin *et al.*, 2012).



**Figura 2** Leituras para a obtenção do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) com o sensor óptico Greenseeker no estágio fenológico V7 da cultura do milho.

## 7.4 Principais resultados de pesquisa: avanços e aplicações

### 7.4.1 Sensor de vegetação para estimativa do potencial produtivo no milho em função da época de dessecação da cultura antecessora

A indicação da dose total de N a ser aplicada na cultura do milho é determinada em função de três fatores principais: o teor de matéria orgânica do solo, a cultura antecessora e a expectativa de rendimento de grãos (Reunião, 2013). Contudo, o uso dos dois primeiros indicadores para estimar a quantidade de N suprida pelo solo e pelos resíduos da cultura antecessora é pouco eficiente, uma vez que inúmeros fatores meteorológicos e de solo estão envolvidos no processo de mineralização do N orgânico (Poletto, 2004). Também, a definição da “expectativa de rendimento de grãos” é complexa, pois o potencial produtivo varia em função das condições meteorológicas de cada ano específico e a probabilidade da “expectativa de rendimento” não se concretizar é elevada. Com a existência de variabilidade espacial e temporal destes indicadores em áreas agrícolas, geralmente opta-se por aplicar maiores doses de N em cobertura para garantir elevados rendimentos de grãos (Poletto, 2004), sem levar em consideração o potencial produtivo da cultura e sua variabilidade espacial na área.

A disponibilidade de N pode ser influenciada, entre outros fatores, pelo manejo da dessecação da cultura antecessora, que, por ter a decomposição da palhada antecipada, pode interferir no desenvolvimento da cultura do milho implantado em sucessão (Cunha *et al.*, 2011; Ricci *et al.*, 2011). Desta maneira, é importante o uso de ferramentas que estimem o potencial produtivo da lavoura

*in situ* de maneira precisa e rápida e em tempo real, visando aperfeiçoar a aplicação de N em cobertura.

Com a proposta de avaliar a relação entre o NDVI e o rendimento de grãos de milho, visando ao desenvolvimento de procedimentos mais precisos para a adubação nitrogenada em cobertura à taxa variável na cultura do milho, foram utilizadas diferentes épocas de dessecação da aveia branca na Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), em Eldorado do Sul (RS). 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), além dos tratamentos com aveia branca dessecada 30 dias antes da semeadura sem aplicação de N na cultura do milho implantado em sucessão e pousio (manejo durante o inverno sem a presença de qualquer tipo de cobertura vegetal).

Como a cultura antecessora foi manejada com diferentes épocas de dessecação antes da semeadura da cultura do milho, foi observado que essa variação promoveu variação na disponibilidade de N no solo, em função das diferentes épocas de dessecação. Esse efeito resultou em variabilidade no desenvolvimento das plantas entre os diferentes tratamentos, permitindo o estudo da relação entre as metodologias utilizadas no presente trabalho.

A variação no desenvolvimento das plantas foi influenciada pelas diferentes épocas de dessecação da aveia branca em pré-semeadura, promovendo diferentes épocas de liberação do N de seus tecidos para o solo, onde o mesmo pode ter sido imobilizado e disponibilizado para a cultura do milho em diferentes períodos de seu desenvolvimento (Lourente *et al.*, 2007; Fontoura & Bayer, 2009; Santos *et al.*, 2013).

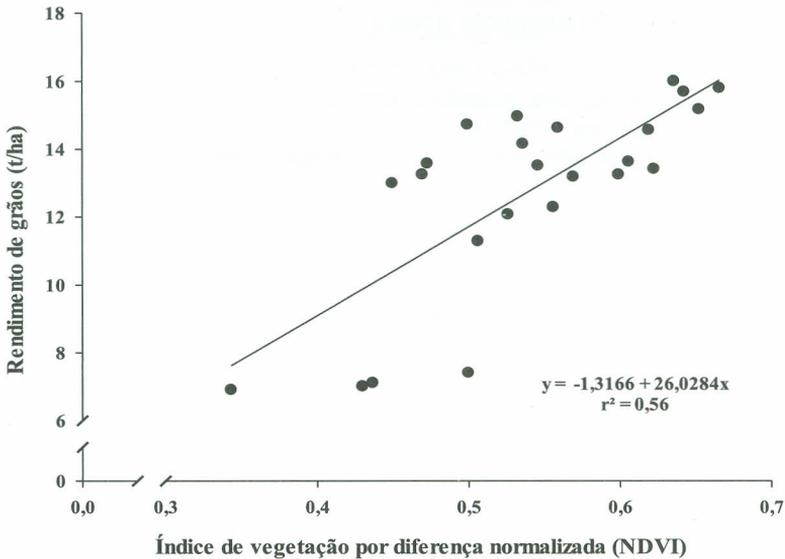
Essa variação no rendimento de grãos da cultura também é atrelada à adubação nitrogenada aplicada, a qual foi parcelada nos estádios V4 e V7, pois durante os estádios iniciais de desenvolvimento da cultura ocorrem importantes processos fisiológicos nas plantas, como a diferenciação do pendão e da espiga 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 do potencial produtivo (Saiz-Fernández *et al.*, 2015).

O coeficientes de determinação da relação entre o NDVI e o rendimento de grãos foi elevado, apresentando ajuste linear entre esta duas variáveis ( $R^2=0,56$ ) (Figura 3).

#### **7.4.2 Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada utilizando sensor de vegetação**

Neste trabalho, os autores basearam-se em 30 ensaios, conduzidos ao longo de seis anos, para o desenvolvimento e validação do algoritmo de indicação de doses de N. No Brasil, já existem alguns estudos com a utilização

deste sensor em culturas de inverno (Povh *et al.*, 2007). Estes trabalhos, porém, ainda não geraram informações suficientes que permitam aplicações a campo de maneira prática. O trabalho propõe um modelo para estimar classes de potencial produtivo a partir de leituras de NDVI relacionadas à biomassa acumulada na parte aérea, visando estabelecer critérios para futuros trabalhos de adubação nitrogenada à taxa variável, por ocasião da emissão da sexta folha do colmo principal em cereais de inverno. A construção do modelo para estimativa de classes de potencial produtivo partiu do ajuste de curvas de regressão para a relação entre o NDVI e a biomassa da parte aérea para diferentes cultivares, em duas restevas (milho e soja), sendo escolhido o modelo que apresentava significância ao teste F a 5% e maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ).



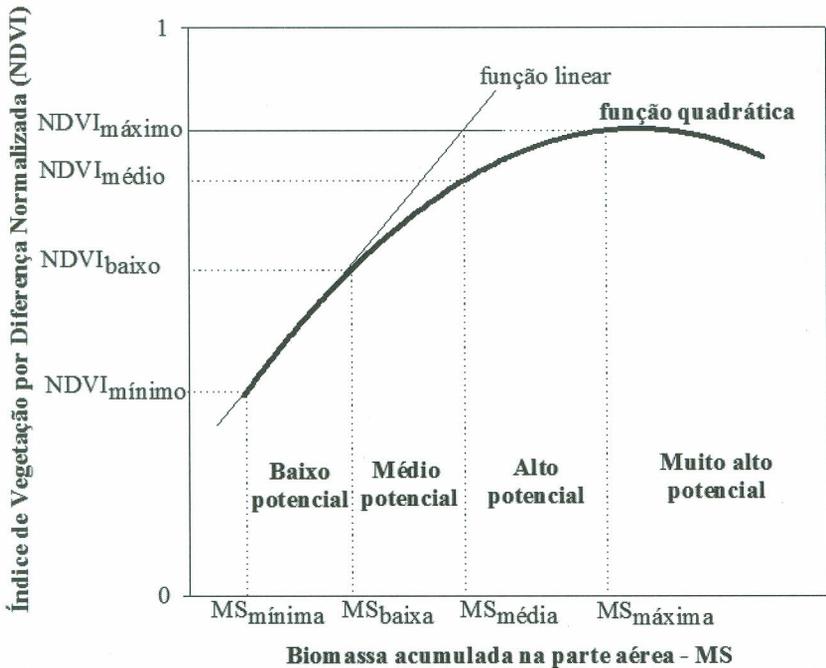
**Figura 3** Relação entre o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) no estádio fenológico V7 e o rendimento de grãos da cultura do milho.

A formação do modelo proposto considera o NDVI como variável dependente da biomassa da parte aérea, pois há a necessidade de conhecer-se a máxima variabilidade do NDVI em função da máxima variabilidade da biomassa. Esta linha de condução também foi aplicada por Phillips *et al.* (2004) em trigo, que avaliaram o número de afilhos por área a partir do uso de fotografia multiespectral aérea.

O método aplicado neste trabalho se diferencia dos tradicionais modelos de sensoriamento remoto, em que as equações de estimativa de crescimento

das culturas são dadas em função da variação do NDVI ao longo do ciclo de desenvolvimento das plantas (Liu, 2006). Outro diferencial é a criação de classes de NDVI a fim de estimar diferentes níveis de potencial produtivo, sendo estas representadas pela biomassa acumulada na parte aérea, ao contrário dos métodos tradicionais, em que se estima a variável de interesse a partir de valores de NDVI. Assim, no método proposto são aplicados indicadores práticos, gerados para avaliação a campo, da condição nutricional da planta e baseados em zonas críticas, onde não há predição de valores absolutos.

Para isso, foram definidos quatro valores críticos de NDVI: mínimo, baixo, médio e máximo. Cada um destes valores foi indicador de um valor crítico de biomassa da parte aérea correspondente. O conjunto de observações entre os valores críticos de NDVI e biomassa corresponderam a uma classe de potencial produtivo (baixo, médio, alto e muito alto). Os valores críticos e as classes de potencial produtivo estão representados esquematicamente na Figura 4 e descritos imediatamente abaixo.



**Figura 4** Modelo teórico desenvolvido para determinação dos valores críticos de NDVI e biomassa acumulada na parte aérea e para estimativa das classes de potencial produtivo.

**NDV<sub>mínimo</sub>**: corresponde ao NDVI referente ao valor mínimo de biomassa obtido, não considerando eventuais valores atípicos. Representa o ponto inicial da classe baixo potencial produtivo.

**NDV<sub>baixo</sub>**: valor máximo de NDVI no qual a função linear perde seu sentido de crescimento, iniciando o sentido quadrático da relação. Representa o valor limite de NDVI entre as classes baixo e médio potencial produtivo.

**NDV<sub>médio</sub>**: valor determinado pela projeção da intersecção entre a reta definida pelo NDV<sub>máximo</sub> e a reta da função linear sobre a função quadrática. Representa o valor limite entre as classes médio e alto potencial produtivo.

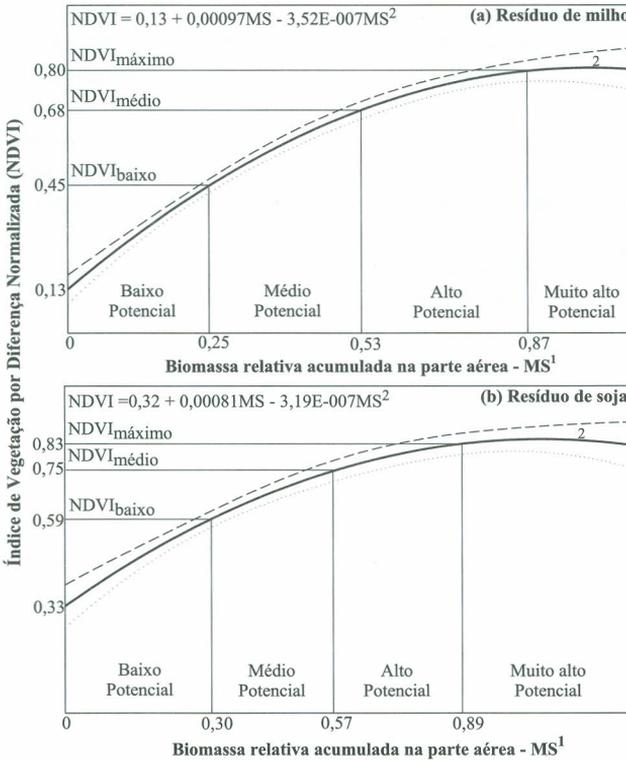
**NDV<sub>máximo</sub>**: primeiro valor de NDVI no qual a regressão inicia seu patamar de valores constantes (inclinação igual a zero). Representa o valor limite entre as classes alto e muito alto potencial produtivo.

Em relação às cultivares, avaliou-se os valores críticos do NDVI (e sua correspondente biomassa da parte aérea) para cada cultivar, em cada classe de potencial produtivo, sendo os valores plotados em gráfico e ajustada uma regressão quadrática (Figura 5). O aumento do NDVI em função do incremento da biomassa ao longo dos valores críticos sobrepõe-se às diferenças entre cultivares, tanto sobre resteva de milho como de soja (Figura 5).

Portanto, a diferença de valores de reflectância entre cultivares para uma mesma classe de potencial produtivo não é relevante o suficiente para modificar a estimativa de seu potencial produtivo, negando-se a pressuposição inicial da necessidade de realizar ajustes para cada grupo de cultivares. Este fato prova a validade da utilização do sensor *GreenSeeker* em diferentes cultivares, mesmo que estas apresentem diferentes características agrônomicas. A mesma conclusão foi obtida por Raun *et al.* (2005), que determinaram que o incremento do potencial produtivo (estimado a partir da leitura do NDVI no momento das aplicações de nitrogênio) era maior que a variabilidade entre os ensaios em uma mesma leitura.

Os modelos “subestimado” e “superestimado” foram determinados por meio das curvas geradas pelo intervalo de confiança a 95% do modelo normal (Figura 5). A finalidade destes dois modelos foi permitir o uso do sensor em lavouras que não apresentem condições de variabilidade semelhantes ao empregado neste experimento. Por exemplo, o modelo superestimado pode ser adequado para lavouras amostradas em estágio de desenvolvimento posterior à emissão da sexta folha, quando apresentam menor variabilidade de biomassa. Já o modelo subestimado pode ser adequado para lavouras amostradas antes do momento ideal, quando a variabilidade da biomassa é máxima. Estes princípios foram considerados por Girma *et al.* (2006), que propuseram o uso do sensor *GreenSeeker* nos momentos de pré e pós-período indicado para aplicação de N em cobertura. Os autores relacionaram as leituras em diferentes

épocas com o rendimento de grãos, a fim de corrigir o uso do sensor em momentos diferentes do indicado.



<sup>1</sup> Refere-se a divisão de cada observação pela máxima biomassa obtida no experimento.

<sup>2</sup> A regressão polinomial e o seu intervalo de confiança correspondem aos seguintes modelos:

--- Superestimado    — Normal    ..... Subestimado

**Figura 5** Modelo para estimativa do potencial produtivo de trigo e cevada pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) por ocasião da emissão da sexta folha, sobre resteva de milho (a) e soja (b).

Nos modelos normal, sub e superestimado, evidencia-se uma região onde ocorre as maiores diferenças entre os valores críticos de NDVI para as restevas de milho e soja. Os valores de NDVI na classe baixo potencial (mínima presença de plantas na área), para o modelo normal, sub e superestimado, são, respectivamente, 0,13, 0,10 e 0,19 sobre resteva de milho e 0,33, 0,27 e 0,39 sobre resteva de soja (Figura 5). Desta forma, existe um confundimento no que se refere à mínima presença de plantas, que poderá ser sobreposta pelo efeito dos elementos da superfície de fundo. A mesma situação foi encontrada por

Flowers *et al.* (2003) em trigo, que obtiveram elevada variabilidade da reflectância do dossel sob condições de baixa presença de plantas em um modelo para predição do número de afilhos. Como alternativa para correção desta limitação, Jorgensen & Jorgensen (2007) sugerem que, quando forem constatados valores baixos de NDVI, seja procedida a confirmação visual de sua causa.

O modelo desenvolvido neste trabalho mostra que, qualquer que seja a causa de baixos valores de NDVI (baixa densidade de plantas ou a presença de resíduos vegetais), o potencial produtivo sempre será baixo. O modelo proposto tem como principal característica a simplicidade de uso, quando por ocasião da utilização do sensor a campo. Para qualquer medida de NDVI obtida na lavoura, esta poderá ser comparada segundo as classes de potencial produtivo do modelo para a resteva em questão e, rapidamente, o operador terá a informação sobre a condição nutricional das plantas em cada área percorrida em uma lavoura.

O uso de classes foi a principal inovação na formulação do modelo proposto para estimativa do potencial produtivo em cereais de inverno na emissão da sexta folha do colmo principal. Ele mostra-se vantajoso, pois é uma metodologia que estabelece zonas de manejo de maneira rápida e expedita, a partir de uma única leitura de NDVI com o sensor *GreenSeeker*. Outra inovação é a possibilidade de isolamento do efeito da espécie (trigo ou cevada) e das cultivares dentro destas, permitindo o uso do sensor ao longo dos anos sem correções para estes fatores. Entre os valores extremos de uma mesma classe de potencial produtivo, ocorrem diferenças entre cultivares, porém, em uma classe superior, estas diferenças são sobrepostas pelo aumento do potencial produtivo.

O possível efeito dos elementos que constituem a superfície de fundo sobre as leituras de NDVI não foi considerado neste trabalho. Desta forma, o modelo gerado deverá, em um primeiro momento, ser aplicado apenas nas restevas de milho e soja, individualmente. Os modelos sub e superestimado são uma proposta para avaliar a capacidade de ajuste do modelo, quando aplicado em situações fora da época recomendada para o modelo normal. Porém, a validação destes modelos, assim como do modelo normal, deverá ser executada em condições de lavoura.

O estudo da relação das zonas de potencial produtivo com doses de N e rendimento de grãos é a próxima etapa deste trabalho. Com o uso de análises de variabilidade espacial, será possível avaliar se zonas de potencial produtivo estimadas pelas classes de NDVI, propostas pelo presente modelo, corresponderão à flutuação espacial da biomassa da parte aérea, doses de N aplicadas e rendimento de grãos.

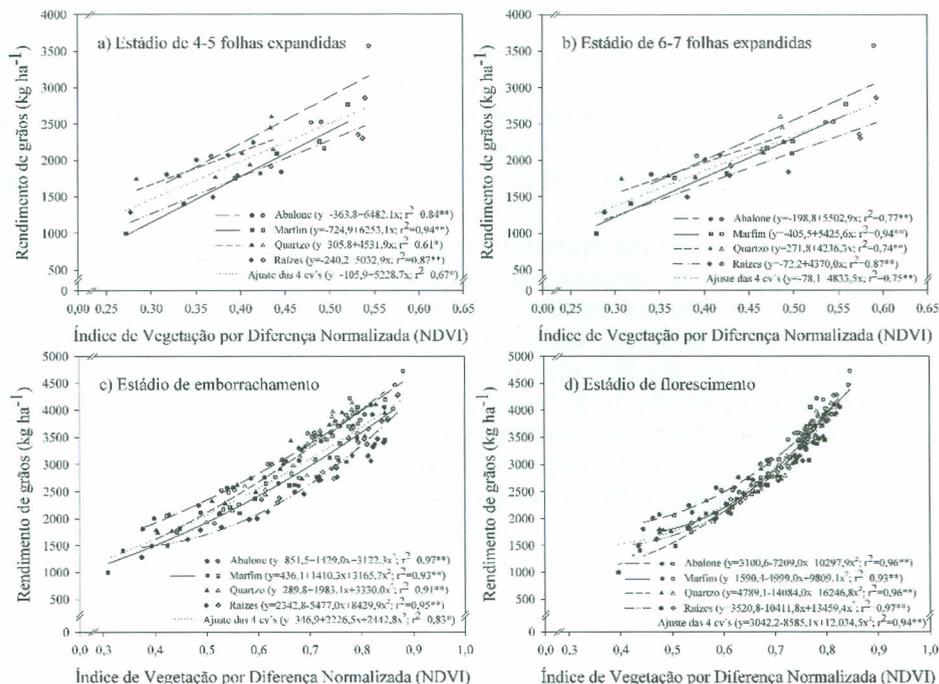
### 7.4.3 Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor de vegetação para adubação nitrogenada a taxa variável

Os indicadores para estimar a quantidade de N suprida pelo solo é pouco eficiente, uma vez que muitos fatores estão envolvidos no processo de mineralização do N orgânico (Drury *et al.*, 2003; Poletto, 2004). Também, a definição da “expectativa de rendimento” é complexa, pois o potencial produtivo varia em função das condições meteorológicas de cada ano específico e a probabilidade da “expectativa de rendimento” não se concretizar é elevada. Com a existência de variabilidade espacial e temporal destes indicadores em áreas agrícolas, geralmente opta-se por aplicar maiores doses de N em cobertura para garantir elevados rendimentos (Poletto, 2004), sem levar em consideração o potencial produtivo e sua variabilidade espacial na área. Em consequência, as reais necessidades da planta não são supridas em muitas situações, levando à aplicação de doses de N acima ou abaixo da exigida. Desta maneira, é importante o uso de ferramentas que estimem o potencial produtivo da lavoura *in situ* de maneira precisa e rápida, em tempo real, visando aperfeiçoar a aplicação de N e permitir a aplicação deste nutriente à taxa variável.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a relação entre o NDVI em diferentes estádios do desenvolvimento e o rendimento de grãos de quatro cultivares de trigo, visando desenvolver procedimentos precisos para a adubação nitrogenada em cobertura. O modelo foi desenvolvido utilizando-se quatro cultivares de trigo (Abalone, Marfim, Quartzo e Fundacep Raízes), quatro níveis de N aplicados na emergência das plantas (0, 20, 40 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de N) e cinco níveis de N aplicados em cobertura (0, 20, 40, 60 e 80 kg ha<sup>-1</sup> de N), na forma de ureia, no estágio de seis folhas completamente expandidas no colmo principal.

Para cada cultivar, modelou-se o rendimento de grãos em função do NDVI pelo ajuste de modelos linear ( $y=a+bx$ ) ou quadrático ( $y=a+bx+cx^2$ ). Os critérios utilizados para escolher o modelo mais adequado foram sua significância pelo teste F ( $P=0,05$ ). Os valores do NDVI foram relacionados com o rendimento de grãos para cada cultivar estudada (Figura 6). As regressões ajustadas foram lineares para os estádios de quatro a cinco e seis a sete folhas expandidas (Figura 6.a e 6.b). Já no emborrachamento e florescimento, as regressões foram quadráticas (Figura 6.c e 6.d). Adicionalmente, ajustou-se um modelo único para as quatro cultivares testadas neste trabalho.

Os coeficientes de determinação na primeira avaliação (Figura 6.a) foram significativos para todas as cultivares e variaram entre  $r^2=0,61$  (cv. Quartzo) e  $r^2=0,94$  (cv. Marfim) (Figura 6.a). Apesar de ser ainda cedo no ciclo da cultura para estimar o potencial produtivo em uma determinada área, o NDVI foi eficiente em quantificar diferenças entre o desenvolvimento das plantas frente às diferentes disponibilidades de N, as quais resultaram em diferentes produtividades ao final do ciclo.



**Figura 6** Relação entre rendimento de grãos e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) avaliado em diferentes estádios de desenvolvimento, para quatro cultivares de trigo após milho (símbolos cheios) e após soja (símbolos vazados). Fonte: EEA/UFRGS, 2013.

À medida que ocorreu o desenvolvimento da cultura, as correlações entre rendimento de grãos e NDVI aumentam, pois, a superfície de fundo (solo e resíduos vegetais) apresentam menor efeito sobre as leituras do NDVI (Dalmolin *et al.*, 2005) e a quantidade de biomassa da parte aérea passa a ser o fator preponderante que determina a magnitude deste índice (Grohs *et al.*, 2007). No florescimento, o coeficiente de determinação para o ajuste das quatro cultivares, foi de 0,94 (Figura 6.d).

Os maiores valores de NDVI se relacionaram a maiores rendimentos de grãos na colheita (Figura 6). Esta relação também foi encontrada por Povh *et al.* (2007), que, trabalhando com adubação à taxa variável em trigo, encontraram valores de NDVI mais elevados em áreas que tinham recebido maior dose de N e apresentaram maior potencial produtivo. Neste caso, o maior potencial produtivo foi proporcionado pela maior disponibilidade de N e maior acúmulo de biomassa e sobrevivência dos afilhos. Grohs *et al.* (2007), trabalhando com o sensor Greenseeker em cevada, encontraram alta correlação entre o NDVI

avaliado no estágio de seis folhas expandidas, o número de colmos por área e a biomassa da parte aérea.

Uma vez quantificados os valores de NDVI no estágio de seis folhas, se pode realizar adubação com N à taxa variável segundo o potencial produtivo estimado de cada local dentro da lavoura (Milani *et al.*, 2006). Assim, quanto melhor for o estado nutricional da cultura no momento de aplicação de N em cobertura, maior é o potencial produtivo e menor será a resposta à aplicação de nitrogênio (Welsh *et al.*, 2003).

Esta forma de se manejar o nitrogênio leva à redução na aplicação deste nutriente em locais onde o potencial produtivo é alto, nos quais as plantas estão bem supridas e não haveria resposta a altas doses de N aplicadas, porém sem comprometer o rendimento de grãos. Segundo Lamothe (1994), quando quantidades elevadas de N forem absorvidas até o final do afilhamento, as plantas pouco responderão à adição de N em cobertura. Já, em locais na lavoura onde os valores de NDVI são intermediários, se utilizaria doses maiores de N, com o objetivo de maximizar o potencial produtivo destes locais.

A determinação do NDVI em estádios de desenvolvimento mais tardios (embrachamento e florescimento) pode não ter mais funcionalidade sobre estratégias de manejo do N para aumento do rendimento de grãos, uma vez que o potencial de rendimento já está praticamente estabelecido (Bredemeier & Mundstock, 2001). Contudo, vislumbra-se outros usos potenciais das leituras tardias de NDVI na cultura do trigo.

A utilização do NDVI para quantificação do potencial produtivo da cultura no florescimento pode também direcionar a aplicação de N em taxa variável para a melhoria da qualidade de grãos. Assim, para locais de menor potencial produtivo, detectado por menores valores de NDVI (Figura 6.d), as quantidades de N a serem aplicadas seriam mais baixas do que para locais de alto potencial produtivo, pois nestes locais a elevada produtividade dilui o teor de N nos grãos (Stone & Savin, 1999), reduzindo seu teor de proteína. Assim, a aplicação tardia de N no florescimento do trigo, baseada em leituras de NDVI, poderia aumentar o teor de proteína nos grãos com potencial para elevar sua qualidade (Fuentes-Mendizábal *et al.*, 2010), agregando valor aos grãos no momento de sua comercialização. Entretanto, para se utilizar algoritmos na estimativa do potencial produtivo a partir de leituras do NDVI é conveniente estabelecer um modelo padrão que possa ser empregado para um grupo de cultivares.

## 7.5 Considerações finais e perspectivas futuras

O monitoramento das condições nutricionais das culturas no início do seu desenvolvimento é necessário para a estimativa do potencial produtivo da cultura e para a realização da adubação nitrogenada em cobertura. Assim, além dos teores de matéria orgânica do solo, cultura antecessora e expectativa de

rendimento de grãos, faz-se necessária a estimativa das condições nutricionais das culturas ao longo do seu desenvolvimento para a aplicação de N em função de sua real necessidade. As leituras do índice de vegetação por diferença normalizada ao longo do ciclo utilizando sensor óptico ativo de reflectância se mostraram eficientes em identificar variações de potencial produtivo nas culturas do milho, trigo e cevada promovidas por variações na disponibilidade de nitrogênio.

Uma das formas de melhorar a eficiência da adubação nitrogenada em cobertura nestas culturas será utilizando essas metodologias, as quais foram capazes de detectar a variabilidade espacial do potencial produtivo das culturas, realizando a aplicação de N a taxa variável *in situ* e em tempo real.

Algumas limitações desta filosofia de aplicação ainda devem ser minimizadas. Considerar as previsões meteorológicas (de curto e longo prazo), a dose de N para máxima eficiência econômica, a sensibilidade da cultivar ao acamamento (e, por conseguinte, a dose máxima de N tolerada), as diferenças na dinâmica do nitrogênio nas diferentes regiões de produção do país, são algumas das melhorias possíveis para tornar a aplicação de N a taxa variável em uma prática eficiente e aceita tanto pela pesquisa quanto pelo setor produtivo.

#### Literatura citada

- AMARAL, L.R.D.; 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, T.A. et al. Nitrogen management strategies for smallholder maize production systems: Yield and profitability variability. **International Journal of Plant Production**, v.9, n.1, p.75-98, 2015.
- BAKER, N.R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, n.1, p.89-113, 2008.
- BISSANI, C.B., GIANELLO, C., CAMARGO, F.A.O., TEDESCO, M.J. Org, 2ed. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 344p.
- BREDEMEIER, C. **Predição da necessidade de nitrogênio em cobertura em trigo e aveia**. 1999. 101f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M. Estádios fenológicos do trigo para adubação nitrogenada em cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.2, p.317-323, 2001.

- CARTER, G.A.; KNAPPA, A.K. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. **American Journal of Botany**, n.4, v.88, p.677–684, 2001.
- CUNHA, E.Q. et al. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. II – Atributos biológicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.2, p.603-611, 2011.
- DALMOLIN, R.S.D. et al. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, v.35, n.2, p.481-489, 2005.
- DHARMAKEERTHI, R.S.; KAY, B.D.; BEAUCHAMP, E.G. Spatial variability of in season N uptake by corn across a variable landscape as affected by management. **Agronomy Journal**, v.98, n.2, p.255–264, 2006.
- DRURY, C.F. et al. The non-limiting and least limiting water ranges for soil nitrogen mineralization. **Soil Science Society of America Journal**, v.67, n.5, p.1388-1404, 2003.
- ERDLE, K.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. **Field Crops Research**, v.124, p.74-84, 2011.
- FENG, W. et al. Monitoring leaf nitrogen status with hyperspectral reflectance in wheat. **European Journal of Agronomy**, v.28, n.3, p.394-404, 2008.
- FIXEN, P.E. The four rights within a global fertilizer best management practices framework. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. p.1-22.
- FLOWERS, M.R. et al. Field validation of a remote sensing technique for early nitrogen application decisions in wheat. **Agronomy Journal**, v.95, p.167–76, 2003.
- FOUNTOURA, S.M.V.; BAYER, C. Adubação Nitrogenada para Alto Rendimento de Milho em Plantio Direto na Região Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.6, p.1721-1732, 2009.
- FREEMAN, K.W. et al. By-plant prediction of corn forage biomass and nitrogen uptake at various growth stages using remote sensing and plant height. **Agronomy Journal**, v.65, n.2, p.530-536, 2007.
- FUERTES-MENDIZÁBAL, T. et al. Improving wheat breadmaking quality by splitting the N fertilizer rate. **European Journal of Agronomy**, v.33, n.1, p.52–61, 2010.
- GIRMA, K. et al. Mid-season prediction of wheat-grain yield potential using plant, soil, and sensor measurements. **Journal of Plant Nutrition**, v.29, p.873–97, 2006.

GROHS, D.S. et al. Estimativa da biomassa e do potencial de rendimento de grãos em cevada através de medições de reflectância. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA, 26., 2007, Passo Fundo, RS. **Anais...** Passo Fundo: EMBRAPA, 2007. p.192-199.

GROHS, D.S. et al. 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.

GUIMARÃES, T.G. et al. Teores de clorofila determinados por medidor portátil e sua relação com formas de nitrogênio em folhas de tomateiro cultivados em dois tipos de solo. **Bragantia**, v.58, n.1, p.209-216, 1999.

HANSEN, P.M.; SCHJOERRING, J.K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. **Remote Sensing of Environment**, v.86, n.4, p.542-553, 2003.

HUANG, Z.X. et al. Photosynthetic characteristics during grain filling stage of summer maize hybrids with high yield potential of 15,000 kg ha<sup>-1</sup>. **Scientia Agricultura Sinica**, v.40, n.9, p.1898-1906, 2007.

JORGENSEN, J.R.; JORGENSEN, R.N. Uniformity of wheat yield and quality using sensor assisted application of nitrogen. **Precision Agriculture**, v.8, p.63-73, 2007.

KITCHEN, N.R. et al. Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. **Agronomy Journal**, v.102, n.1, p.71-84, 2010.

LAMOTHE, A.G. **Manejo del nitrógeno para aumentar productividad en trigo**. Montevideo: INIA, 1994. 26p. (Série Técnica, 54).

LARSON, W.E.; ROBERT, P.C. Farming by soil. In: LAL, R.; PIERCE, F.J. (Ed.). **Soil management for sustainability**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1991. p.103-112.

LIU, Y.; SWINTON, S.M.; MILLER, N.R. In site-specific yield response consistent over time? Does it pay? **American Journal of Agricultural Economics**, v.88, n.2, p.471-483, 2006.

LOFTON, J. et al. Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. **Sensors**, v.12, n.6, p.7529-7547, 2012.

LOURENTE, E.R.P. et al. Culturas antecessoras, doses e fontes de nitrogênio nos componentes de produção do milho. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.29, n.1, p.55-61, 2007.

MARSCHNER, H.; MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3<sup>rd</sup> ed. London, UK: Academic Press; 2012.

MARTIN, K.L.; RAUN, W.; SOLIE, J. By-plant prediction of corn grain yield using optical sensor readings and measured plant height. **Journal of Plant Nutrition**, v.35, n.9, p.1429-1439, 2012.

McBRATNEY, A.; WHELAN, B.; ANCEV, T. Future directions of precision agriculture. **Precision Agriculture**, v.1, n.6, p.7-23, 2005.

MILANI, L. et al. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.28, n.4, p.591-598, 2006.

MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão - O gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2001. 83p.

MOLIN, J.P. et al. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.12, p.1345-1349. 2010.

NTECH INDUSTRIES, UKIAH, CA, USA. **Greenseeker manuals downloads**. Disponível em: <<http://www.ntechindustries.com/greenseeker-manual.html>>. Acesso: 15 de setembro de 2013.

PHILLIPS, S.B.; KEAHEY, D.A.; WARREN, J.G.; MULLINS, G.L. Estimating winter wheat tiller density using spectral reflectance sensors for early-spring, variable-rate nitrogen applications. **Agronomy Journal**, Madison, v.96, p.591-600, 2004.

PIERCE, F.J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, v.67, p.1-85, 1999.

PIERCE, F.J.; SADLER, E.J. (Ed.). **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1997. p.1-18.

POLETTI, N. **Disponibilidade de nitrogênio no solo e sua relação com o manejo da adubação nitrogenada**. 2004. 119f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PORTZ, G. **Obtenção de algoritmo agrônomo para sensor foto ativo de refletância vegetal visando à aplicação da adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar**. 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

PORTZ, G.; MOLIN, J.P.; JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agriculture**, v.13, n.1, p.33-44, 2011.

POVH, F.P. et al. Uso de sensor ótico ativo aplicado ao manejo de nitrogênio em trigo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2007. p.343-50.

RAUN, W.R. et al. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. **Agronomy Journal**, v.94, n.1, p.815–820, 2002.

RAUN, W.R. et al. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Monticello, v.36, p.2759-81, 2005.

REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE MILHO E SORGO. **LVIII Reunião Técnica Anual do Milho e XLI Reunião Técnica Anual de Sorgo: Indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul – Safras 2013/2014 e 2014/2015**. Pelotas (RS). 2013. 124 p.

RICCE, W.S. et al. Épocas de dessecação de pastagem de inverno e produtividade de grãos de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p. 1220-1225. 2011.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004. 214 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004.

ROUSE, J.W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **In. NASA ERTS Symposium**, v.3, p.309-317, 1973.

SAIZ-FERNÁNDEZ, I. et al. High nitrate supply reduces growth in maize, from cell to whole plant, **Journal of Plant Physiology**, v.173, n.1, p.120-129, 2015.

SALVIANO, A.A.C.; VIEIRA, S.R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* L. em áreas severamente erodidas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.1, p.115-122, 1998.

SANTOS, J.S. et al. Identificação da dinâmica espaço-temporal para estimar área cultivada de soja a partir de imagens MODIS no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.1, p.54-63, 2014.

SANTOS, L.P.D. et al. Doses de nitrogênio na cultura do milho para altas produtividades de grãos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.12, n.3, p. 270-279, 2013.

SAWYER, J.F. Concepts of variable rate technology with considerations for fertilizer application. **Journal of Agriculture Science**, v.7, n.1, p.195-201, 1994.

SCHMIDT, J. et al. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor. **Field Crops Research**, v.120, n.1, p.94-101, 2011.

SCHMIDT, J.P.; DELLINGER, A.E.; BEEGLE, D.B. Nitrogen recommendations for corn: an on the-go sensor compared with current recommendation methods. **Agronomy Journal**, v.101, n.4, p.916-924, 2009.

SERRANO, L.; FILELLA, I.; PEÑUELAS, J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. **Crop Science**, v.40, n.1, p.723-731, 2000.

SHANAHAN, J. et al. Responsive in-season nitrogen management for cereals. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 61, n. 1, p.51–62, 2008.

SILVA, E.C. et al. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.3, p.353-362, 2005.

SILVA, V.R. et al. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho - Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.6, p.1013-1020, 2003.

SOLARI, F. et al. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, v.76, p.571-579. 2008.

STONE, P.J.; SAVIN, R. Grain quality and its physiological determinants. In: SATORRE, E.H.; SLAFER, G.A. **Ecology and physiology of yield determination**. Binghamton: Haworth Press, 1999. Cap.5, p.85-120.

WAMSER, A.F.; MUNDSTOCK, C.M. Adubação nitrogenada em estádios fenológicos em cevada, cultivar "MN 698". **Ciência Rural**, v.37, n.4, p.942-948, 2007.

WEI, F. et al. Monitoring leaf nitrogen accumulation in wheat with hyper-spectral remote sensing. **Acta Ecologica Sinica**, v.28, n.1, p.23-32, 2008.

WELIGAMA, C. et al. Application of nitrogen in  $\text{NO}_3^-$  form increases rhizosphere alkalisation in the subsurface soil layers in an acid soil. **Plant and Soil**, v.333, n.1, p.403–416, 2010.

WELSH, J.P. et al. Developing strategies for spatially variable nitrogen application in cereals. II: Wheat. **Biosystems Engineering**, v.84, n.4, p.495-511, 2003.

ZHU, Q. et al. Hydropedological processes and their implications for nitrogen availability to corn. **Geoderma**, v.154, n.1, p.111–122, 2009.

ZHU, Q.; SCHMIDT, J.P.; BRYANT, R.B. Maize (*Zea mays* L.) yield response to nitrogen as influenced by spatio-temporal variations of soil-water-topography dynamics. **Soil & Tillage Research**, v.146, n.1, p.174-183, 2015.