

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**FERTILIZAÇÃO NITROGENADA À DOSE VARIADA
NA CULTURA DO MILHO**

TESE DE DOUTORADO

Jardes Bragagnolo

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

FERTILIZAÇÃO NITROGENADA À DOSE VARIADA NA CULTURA DO MILHO

Jardes Bragagnolo

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Químicos e Ciclagem de
Elementos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para a obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

Orientador: Prof. Telmo Jorge Carneiro Amado

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bragagnolo, Jardes

Fertilização nitrogenada à dose variada na cultura do milho / Jardes Bragagnolo.-2014.

99 p.; 30cm

Orientador: Telmo Jorge Carneiro Amado

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2014

1. Manejo do Solo 2. Fertilidade do Solo 3. Máquinas Agrícolas 4. N-Sensor 5. Sensor óptico I. Amado, Telmo Jorge Carneiro II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
Aprova a Tese de Doutorado:

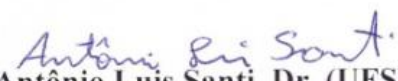
**FERTILIZAÇÃO NITROGENADA À DOSE VARIADA NA CULTURA
DO MILHO**

elaborada por
Jardes Bragagnolo

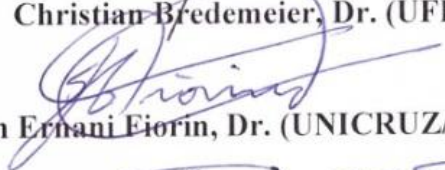
como requisito parcial para a obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo


Comissão Examinadora


Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)


Antônio Luis Santi, Dr. (UFSM/CESNORS)


Christian Bredemeier, Dr. (UFRGS)


Jackson Ernani Fiorin, Dr. (UNICRUZ/CCGL-TEC)


Rodrigo da Silveira Nicoloso, Dr. (EMBRAPA)

Santa Maria, 25 de Fevereiro de 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico a meus pais,
Nestor e Lourdes,
pelo apoio incondicional e por
serem exemplos de amor e perseverança.

Que os dias tenham bastante espaço para
novos interesses, novas experiências e novas amizades...
Que estejam ocupados o bastante para que a vida tenha um sentido
e especialmente que sejam tranquilos o suficiente
para dar tempo de sonhar.

...em busca de um sonho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pelas oportunidades e por me guiar durante todo este tempo.

A Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, ao Departamento de Solos por me concederem esta oportunidade tão valiosa.

A CAPES, pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de doutorado.

Ao Professor Telmo Jorge Carneiro Amado, pela orientação, amizade, paciência e pelos votos de confiança na execução deste trabalho.

À minha família, que mesmo distante, sempre me concedeu apoio, incentivo e condições de trilhar meus caminhos para realizar meus sonhos. Aos meus pais, Nestor Bragagnolo e Lourdes Parise Bragagnolo, pelo amor e educação, por me ensinarem os verdadeiros valores da vida e encorajarem-me nos momentos difíceis. Vocês são os melhores exemplos de luta, perseverança, dignidade e bondade de minha vida.

Ao meu avô, Rynaldo Pedro Bragagnolo, minha eterna gratidão pelos ensinamentos, exemplos de vida, bondade e respeito. Que um dia eu possa ser tão sábio e valoroso quanto ele.

A Paola, companheira desta caminhada, pela atenção, carinho, compreensão e apoio, dando-me incentivo nos momentos difíceis. A sua família por me receber de braços abertos.

A Gustavo Mack Teló e Vitor Cauduro Girardello, que há tanto tempo trilham caminhos comigo. Que a vida permita-nos desfrutar da longa e eterna amizade que nos une.

Aos colegas do Laboratório de Uso, Manejo e Conservação de Solo e da Água, pela ajuda na execução deste trabalho e pelo convívio, companhia nas rodas de mate ou nos churrascos inesperados. Meu eterno agradecimento.

A todos os parceiros do Projeto Aquarius (AGCO, COTRIJAL, STARA, YARA) e a FUNDACEP – CCGL, pelo apoio e por nunca medirem esforços para a realização deste trabalho.

As famílias Marquetti e Mânica por concederem áreas, auxiliarem na condução das culturas, na execução dos experimentos, pelo interesse em pesquisar e evoluir nos conhecimentos científicos e técnicos que regem seus trabalhos.

Aos demais, que, direta ou indiretamente, contribuíram para que eu pudesse alcançar este objetivo... Vocês fazem parte desta minha conquista.

Muito obrigado!

RESUMO GERAL

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

FERTILIZAÇÃO NITROGENADA À DOSE VARIADA NA CULTURA DO MILHO

AUTOR: JARDES BRAGAGNOLO

ORIENTADOR: TELMO JORGE CARNEIRO AMADO

LOCAL E DATA DA DEFESA: SANTA MARIA, 25 DE FEVEREIRO DE 2014.

O milho é o principal cereal produzido no Brasil, sendo altamente responsivo à fertilização nitrogenada, uma vez que os solos tropicais e subtropicais apresentam disponibilidade insuficiente de nitrogênio (N) para atender a demanda da cultura visando à obtenção de elevados rendimentos. Ajustes na dose de N fertilizante podem ser realizados durante o desenvolvimento da cultura através da utilização de sensores de espectrometria ótica. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de fertilização nitrogenada à dose variada, prescrita com uso do N-Sensor[®] ALS, e correlacioná-la com diferentes atributos vegetativos durante o desenvolvimento da cultura do milho em Latossolos do RS. Foram realizados três experimentos, sendo dois na safra 2008/09 e outro na safra 2010/11. Foram avaliadas a capacidade do sensor em determinar o estado nutricional da cultura e o efeito da aplicação de diferentes doses de N à dose uniforme e dose variada sobre os seguintes atributos vegetativos: teor de N no tecido vegetal, N total absorvido pela parte aérea das plantas, matéria seca e teor relativo de clorofila avaliada pelas leituras com clorofilômetro manual e sobre a produtividade de grãos e eficiência de uso do N. Os atributos vegetativos e produtividade de milho foram amplamente influenciadas pela fertilização nitrogenada e pelas condições climáticas intrínsecas de cada experimento. Durante as fertilizações, o sensor foi capaz de avaliar em média 34 % das plantas na área dos experimentos, com o qual se obteve alta relação das leituras do sensor óptico com a quantidade de N absorvido e matéria seca das plantas de milho apesar de uma perda de eficiência (saturação) observada nos estádios mais tardios de desenvolvimento da cultura. Considerando que o milho absorveu a maior parte do N após o estágio de desenvolvimento V8, a utilização do sensor óptico de plantas neste ou mesmo em estádios posteriores de desenvolvimento é uma estratégia viável para a fertilização nitrogenada a dose variada. A fertilização nitrogenada a dose variada com base no sensor óptico promoveu aumento do N absorvido de 11,8 % em relação à fertilização nitrogenada a dose uniforme no terceiro experimento. Em todas as áreas investigadas, a produtividade de grãos aumentou em resposta à fertilização nitrogenada, obtendo produtividades médias superiores a média nacional. O uso da estratégia de fertilização a dose variada de N apesar do leve incremento na produtividade de grãos de milho não foi capaz de promover o aumento estatisticamente significativo. A eficiência de uso de N avaliada por diferentes índices mostrou uma melhora com o uso da dose variada de N baseada no sensor óptico em relação a dose uniforme. A estratégia de dose variada de N mostrou-se eficiente quanto ao uso do N quando avaliada pela redução e aumento da dose de N prescrita pelo sensor óptico conforme o estado nutricional da cultura, sendo uma estratégia eficiente do ponto de vista ambiental, por reduzir os riscos associados à superfertilização nitrogenada.

Palavras-chave: Nitrogênio. N-Sensor. Sensor óptico. Agricultura de precisão. *Zea mays*.

ABSTRACT GENERAL

Doctoral Thesis
Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

VARIABLE-RATE NITROGEN FERTILIZATION IN MAIZE

AUTHOR: JARDES BRAGAGNOLO

ADVISOR: TELMO JORGE CARNEIRO AMADO

LOCATION AND DATE OF PRESENTATION: SANTA MARIA, FEBRUARY 25, 2014.

Maize is the main cereal produced in Brazil, being highly responsive to nitrogen fertilization, since the tropical and subtropical soils presents insufficient availability of nitrogen (N) to attend the culture demand in order to obtain high yields. Adjustments in the rate of N fertilizer can be made during the development of the culture through of the use of optical sensors spectrometry. The aim of this study was to evaluate the efficiency of nitrogen fertilization to the variable rate prescribed by use of the N -Sensor[®] ALS, and correlate it with different plant attributes during development of maize in RS Oxisols. Three experiments were conducted, two in the 2008/09 and another in the 2010/11 season. The ability of the sensor to determine the nutritional status of the culture and the effect of different rates of N, uniform and variable rate, on the following attributes of the plant were evaluated: N content of the plant tissue, the total N uptake by the crop, dry matter and relative chlorophyll content measured by chlorophyll meter readings with manual and on grain yield and N use efficiency. The plant attributes and corn yield were largely influenced by nitrogen fertilization and the intrinsic climatic conditions of each experiment. During fertilization optical sensor was able to assess on average 34 % of the plants in the experimental areas, which obtained high ratio of the readings of the optical sensor with the amount of N uptake and dry matter of corn plants, despite loss efficiency (saturation) observed in the later stages of crop development. Whereas maize absorbed most of the N after the V8 stage of development, the use of the optical sensor grown in the same or in later stages of development is a viable strategy for the nitrogen source at varied doses. Nitrogen fertilization at variable rate based on optical sensor promoted an increase of N uptake by 11.8 % in relation to nitrogen fertilization uniform rate in the third experiment. In all areas investigated, grain yield increased in response to nitrogen fertilization, getting above national average productivities. The use of fertilizer N rate variable strategy despite the slight increase in grain yield of maize was not able to make a statistically significant increase. The efficiency of use of N different indexes evaluated showed improvement with the use of N variable rate based on the optical sensor to the uniform rate. The strategy of N variable rate proved to be efficient as the use of N as measured by a decrease and increase of N rate prescribed by the optical sensor as the nutritional status of the crop, with an effective strategy of the environmental point of view, by reduced risks associated with nitrogen over fertilization.

Keywords: Nitrogen. N-Sensor. Optical sensor. Precision farming. *Zea mays*.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

TABELA 1 -	Descrição experimental das áreas, características químicas e textural do solo (0-0,10 m), e práticas manejo de solo e de cultura.	23
TABELA 2 -	Estratégia de fertilização nitrogenada utilizada nos experimentos.	25
TABELA 3 -	Estatística descritiva dos atributos vegetativos avaliados no estágio fenológico V8 de desenvolvimento do milho.	28
TABELA 4 -	Estatística descritiva dos atributos vegetativos do milho avaliados no estágio fenológico de florescimento.	33

CAPÍTULO 2

TABELA 1 -	Características da fertilização a dose variada de nitrogênio com base no sensor óptico avaliado no estágio fenológico V8 do milho.	48
TABELA 2 -	Parâmetros estatísticos da fertilização a dose variada de nitrogênio com base no sensor óptico avaliado no estágio fenológico V8 do milho.	50
TABELA 3 -	Eficiência de uso do nitrogênio em função da dose de fertilizante nitrogenado e estratégias de fertilização nas três áreas investigadas.	60

CAPÍTULO 3

TABELA 1 -	Análise granulométrica e características químicas do solo na camada de 0-0,10 m da área experimental.	72
TABELA 2 -	Atributos vegetativos avaliados no estágio de florescimento do milho para os tratamentos com fertilização nitrogenada.	76

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- FIGURA 1 - Precipitações diárias e acumulada ocorridas durante o ciclo da cultura do milho, na área 1 (a) e na área 2 (b) na safra agrícola de 2008/2009 e na área 3 (c) na safra agrícola de 2010/2011. 24
- FIGURA 2 - Relações entre os atributos vegetativos de milho avaliados e o índice de vegetação determinado pelo sensor óptico de planta (área 3). 30
- FIGURA 3 - Evolução da absorção de N pelas plantas de milho em diferentes estádios fenológicos (áreas 1 e 3). 36

CAPÍTULO 2

- FIGURA 1 - Índice de vegetação determinado com o sensor óptico no estágio fenológico V8 do milho e dose variada de nitrogênio prescrita para as áreas 1 (a, b), 2 (c, d) e 3 (e, f). 49
- FIGURA 2 - Dose de N prescrita pelo sensor óptico através do índice de vegetação do milho no estágio fenológico V8 para as áreas 2 e 3. 51
- FIGURA 3 - Fertilização nitrogenada a dose variada prescrita pelo sensor óptico e dose referência para (a) área 1 (91 kg ha^{-1}), (b) área 2 (80 kg ha^{-1}) e (c) área 3 (70 kg ha^{-1}). 53
- FIGURA 4 - Relação entre N absorvido pelo milho no florescimento e matéria seca (a) e produtividade de grãos de milho (b) para as três áreas investigadas sob doses de fertilização nitrogenada. 55
- FIGURA 5 - Relação entre as doses de fertilização nitrogenada e produtividade (a) e produtividade relativa (b) de milho para as três áreas investigadas. 57

CAPÍTULO 3

- FIGURA 1 - Precipitações diárias e acumulada ocorridas durante o ciclo da cultura do milho na safra agrícola de 2010/2011. 71
- FIGURA 2 - Croqui da área experimental, com transecto utilizada para avaliação de atributos vegetativos em diferentes estádios de desenvolvimento e raio de interpolação dos dados do sensor óptico para relacionar com os atributos vegetativos..... 73
- FIGURA 3 - Relações entre a quantidade de nitrogênio absorvido (a) e a produção de matéria seca (b) do milho com o índice de vegetação determinado pelo sensor óptico. 79
- FIGURA 4 - Doses de nitrogênio prescritas em função do índice de vegetação determinados pelo sensor óptico no estágio fenológico V8 do milho (a) e distribuição longitudinal das doses variadas de N nas repetições para o tratamento 140DVN (b). 80

FIGURA 5 - Índice de vegetação determinado com sensor óptico no estádio V8 (a, b) e V12 (e, f), dose prescrita pelo sensor no estádio de V8 (c, d) e produtividade do milho (g, h) para os tratamentos com uso de estratégias a DUN e DVN, respectivamente.	83
FIGURA 6 - Histogramas de frequência de distribuição das produtividades para as estratégias de fertilização à DUN (a) e DVN (b). DP= desvio padrão; CV= coeficiente de variação; n= número de observações.	84
FIGURA 7 - Produtividade, eficiência agronômica do fertilizante nitrogenado e renda bruta em diferentes classes de fertilização à DVN e DUN. EAN= eficiência agronômica do N; DUN= dose uniforme de N; DVN= dose variada de N prescrita pelo sensor óptico.	86

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	13
CAPÍTULO I - Sensor óptico na fertilização nitrogenada à dose variada no milho: I - Nutrição de plantas e produção de matéria seca	19
Resumo	19
Abstract	20
Introdução	21
Material e métodos	22
Resultados e discussão	27
Conclusões	36
Literatura citada	37
CAPÍTULO II - Sensor óptico na fertilização nitrogenada à dose variada no milho: II - Índices de eficiência da fertilização e produtividade de grãos de milho	42
Resumo	42
Abstract	43
Introdução	44
Material e métodos	46
Resultados e discussão	48
Conclusões	61
Literatura citada	62
CAPÍTULO III - Eficiência de uso do nitrogênio aplicado à dose variada prescrita por sensor óptico na cultura do milho	67
Resumo	67
Abstract	68
Introdução	69
Material e métodos	71
Resultados e discussão	76
Conclusões	88
Literatura citada	88
CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
LITERATURA CITADA	97

INTRODUÇÃO GERAL

Para as gramíneas em geral, o nitrogênio (N) exerce grande influência sobre produtividade, sendo necessário, para a grande maioria das situações de cultivo, o fornecimento via fertilização suplementar. O consumo mundial de N vem aumentando nas últimas décadas, tendo sido estimado por Subbarao et al. (2006) em 100 milhões de toneladas e previsão para 2020 de aproximadamente 190 milhões de toneladas de N (SINGH et al., 2008). Porém, mundialmente a eficiência de fertilização é próxima de 33 % (RAUN E JOHNSON, 1999).

No Brasil, o principal cereal produzido é o milho, com expectativa de produzir na safra 2013/2014 cerca de 79 milhões de toneladas de grãos, em uma área de 15,5 milhões de hectares (CONAB, 2014). Estima-se que a demanda nacional de milho para a alimentação animal, responsável por 60,0 % do consumo doméstico, irá crescer aproximadamente 37,0 % no período de 2005-2015 (BRASIL, 2007). Para atender esta demanda, sem recorrer à importação ou a expansão desordenada da área cultivada, far-se-á necessário aumentar a produtividade na ordem de 4,0 % ao ano.

Dentre os fatores que contribuem para este incremento, destaca-se a fertilização nitrogenada. Segundo resultados obtidos por Cruz et al. (2005) e Coelho e França (2006) de 70,0 a 90,0 % dos experimentos observaram resposta do milho à fertilização nitrogenada. Por tudo isso, a importância em estudar o efeito da fertilização nitrogenada sobre a cultura do milho.

Como parâmetros para estabelecer a fertilização nitrogenada na cultura do milho, no Sul do Brasil, atualmente são utilizados: o teor de matéria orgânica do solo (MOS), a cultura antecessora e a expectativa de rendimento, resultando na prescrição de uma dose uniforme de N (DUN) por unidade de área (CQFS – RS/SC, 2004).

Para doses elevadas, é indicado o parcelamento da dose de N na área (CQFS – RS/SC, 2004), principalmente em condições de elevada precipitação. O parcelamento da dose deve ser feito em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, levando-se em consideração a nutrição adequada durante todo o cultivo. O milho absorve N durante todo seu ciclo de desenvolvimento, sendo menor quantidade nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura (GADIOLI et al., 2000), porém sendo este o período em que a cultura estabelece o potencial produtivo (FANCELLI E DOURADO-NETO, 1997), de tal forma que os componentes de rendimento estabelecem-se a partir do estádio de quatro folhas totalmente

desenvolvidas (V4), onde há a determinação do número potencial de espigas, no V8, define-se o número de fileiras de grãos, no V12, define-se o número de grãos potenciais por fileira (tamanho da espiga) e, no período reprodutivo, o peso de mil grãos (MAGALHÃES E DURÃES, 2006).

Desta forma, a ocorrência de condições que restrinjam a correta nutrição das plantas de milho deve ser evitada e, sempre que houver a necessidade, levando em consideração o fator econômico, a aplicação de fertilizantes nitrogenados faz-se necessária.

Diversos trabalhos vêm demonstrando a presença de variabilidade da MOS (CASA et al., 2011) na área, assim como de nitrato no solo (FERGUNSON et al., 2002; HURTADO et al., 2009; CASA et al., 2011), variabilidade de produtividade (MARTIN et al., 2007; GREGORT et al., 2008; MAYFIELD e TRENGOVE, 2008; HURTADO et al., 2009) e a variabilidade de produção de matéria seca (MARTIN et al., 2007; PORTZ et al., 2012). Aliadas a essas situações, há a existência da variação na disponibilidade de N envolvendo a ciclagem dos nutrientes promovida pelos microrganismos (AITA e GIACOMINI, 2008) e as perdas de N (LARA CABEZAS et al., 1997; CERETTA et al., 2005; CANTARELLA et al., 2008). Nestas situações, a dose de N estabelecida e aplicada de forma homogênea para toda a área pode levar a limitações ou excessos no suprimento de N, tornando útil e necessária a distribuição à dose variada de N (DVN) para o aumento da eficiência da fertilização nitrogenada e diminuição dos impactos ambientais pelas perdas de N.

Portanto, a adequação da dose de N a ser aplicada deve ser corrigida durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, assim como a adequação da dose conforme a variabilidade observada dentro do mesmo talhão, devendo levar em consideração as necessidades da cultura durante o seu desenvolvimento, podendo ser realizada com base no estado nutricional da cultura avaliado por espectrometria óptica (ARGENTA et al., 2003; RAUN et al., 2005; LINK et al. 2005; RAMBO et al., 2008; POVH et al., 2008; JASPER et al., 2009; PORTZ et al., 2012).

Com uso desta tecnologia, pode-se distinguir o estado nutricional de determinada cultura, uma vez que o verde das plantas que observamos é atribuído a reflectância dos comprimentos de onda entre 500-550 nm e a absorção dos demais comprimentos de onda da região do visível. As observações realizadas no comprimento de onda 680 nm são referentes à absorção pela clorofila e sistema fotossintético da planta, sendo que comprimentos de onda inferiores a este correlacionam-se com a clorofila, enquanto que a reflectância aumenta para comprimentos de onda superiores aos 700 nm pela interferência da estrutura molecular da biomassa da cultura.

Este método vem sendo utilizado pela praticidade e rapidez com que se pode determinar a variabilidade da nutrição das plantas e daí aplicar-se à DVN. No Brasil, diferentes sensores de espectrometria óptica vêm sendo testados, tais como o GreenSeeker[®] (BREDEMEIER et al., 2013, POVH et al., 2008; GROHS et al., 2009), Crop Circle[®] (AMARAL, 2010; POVH, 2011) e N-Sensor[®] (PORTZ et al., 2012, BRAGAGNOLO et al., 2013a, b). Todos eles utilizam, como princípio, a relação entre ondas no espectro do visível e infravermelho próximo e que estão diretamente ligadas a estrutura da planta. O GreenSeeker utiliza o Índice de Vegetação Normalizada obtido através dos comprimentos de onda 660 e 770 nm. O Crop Circle também utiliza o NDVI, mas pelos comprimentos de onda 590 e 880 nm. Já o N-Sensor utiliza a relação direta entre os comprimentos de onda 730 e 760 nm.

Desta forma, Jasper et al. (2009) estabeleceram que a relação entre estes comprimentos de onda era o que melhor refletia a quantidade de N absorvida e o estado nutricional da planta quanto ao N. Portz et al. (2012) demonstraram elevada relação entre as determinações do N-Sensor com a MS acumulada pela cultura da cana de açúcar ($R^2=0,84$), e com o N absorvido pela cultura ($R^2=0,83$). Porém o aumento da MS em estádios mais tardios da cultura provocou o efeito de saturação no IV. Essa situação de saturação já havia sido descrita para os demais sensores que utilizam NDVI (POVH et al., 2008; GROHS et al., 2009; AMARAL, 2010; POVH, 2011).

Estudos demonstram aumentos de produtividade entre 3,0 e 13,0 % e redução na quantidade de N aplicada de 14,0 % ao comparar a DVN baseada no N-Sensor com DUN (SINGH et al., 2006). Outros trabalhos obtiveram incremento de 0,8 % e 5,1 % (MAYFIELD e TRENGOVE, 2009) e 1,7 % e 2,4 % (JØRGENSEN e JØRGENSEN, 2001) na produtividade e teor de proteína dos grãos de trigo utilizando o N-Sensor, porém sem diferença estatística. Resultados semelhantes foram anteriormente reportados por Raun et al. (2005), que não encontraram diferença estatística entre as aplicações a DVN e DUN, para a mesma dose, utilizando outro tipo de sensor de espectrometria óptica (GreenSeeker[®]). Porém, Jørgensen e Jørgensen (2007) apresentaram incremento de 1,7 % na produtividade de trigo utilizando DVN indicada pelo N-Sensor, quando comparada com a DUN.

Desta forma, há pouca informação sobre o uso da técnica de espectrometria óptica no Brasil e mais estudos devem ser realizados com aplicação de fertilizantes nitrogenados a dose variada com uso desta tecnologia. O presente trabalho propõe-se a determinar a eficiência da fertilização nitrogenada à dose variada e em tempo real utilizando-se um sensor de espectrometria óptica como indicador da dose prescrita em cobertura para a cultura do milho.

HIPÓTESES

- As observações realizadas com o sensor de espectrometria óptica correlacionam-se com diferentes atributos vegetativos durante o desenvolvimento da cultura do milho, favorecendo a fertilização nitrogenada à dose variada.

- O sensor de espectrometria óptica é capaz de estimar o estado nutricional das plantas de milho, prescrevendo a dose variada de fertilizante nitrogenado conforme a necessidade da cultura, melhorando o estado nutricional da mesma, elevando a quantidade de N absorvido, a produção de matéria seca e teor relativo de clorofila avaliado pelo clorofilômetro.

- Com a utilização da fertilização nitrogenada à dose variada baseada no sensor de espectrometria óptica, é possível obter-se aumento de produtividade do milho, quando comparada com a fertilização à dose uniforme, baseada no método tradicional.

- É possível aumentar a eficiência da fertilização nitrogenada na cultura do milho, utilizando-se a fertilização à dose variada, determinada com base no estado nutricional da cultura em substituição à dose uniforme, determinada com base no teor de matéria orgânica do solo.

OBJETIVO GERAL

Determinar a eficiência da fertilização nitrogenada à dose variada e em tempo real utilizando-se um sensor de espectrometria ótica como indicador da dose recomendada de N em cobertura para a cultura do milho.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a existência de variabilidade do estado nutricional em relação ao N da cultura do milho através do uso do sensor de espectrometria óptica.

- Correlacionar as determinações do sensor óptico com os atributos vegetativos: matéria seca, teor relativo de clorofila, teor de N no tecido e N absorvido.

- Avaliar o estágio de desenvolvimento mais apropriado para realizar as fertilizações à dose variada utilizando o sensor óptico, para a cultura do milho, em condições de cultivo no Sul do Brasil.

- Avaliar o resultado da fertilização à dose variada e dose uniforme em diferentes doses de N.
- Determinar a eficiência de uso de N quando aplicado à dose variada e segundo método tradicional.
- Estabelecer curva de resposta a N quanto à produtividade em diferentes locais para a cultura do milho.
- Avaliar a variabilidade da produtividade de milho com fertilização à dose variada e com dose uniforme.
- Verificar a eficiência de uso do N com a variação da dose de fertilizante baseada na prescrição do sensor óptico.

ESTRATÉGIA DE ESTUDO

Este trabalho é uma compilação dos resultados obtidos em três experimentos, sendo dois experimentos realizados com a cultura do milho no ano agrícola de 2008/2009 e outro no ano agrícola de 2010/2011, em que se buscou avaliar o sensor de espectrometria óptica (N-Sensor) quanto à determinação do estado nutricional da cultura em diferentes estádios e à correlação com atributos vegetativos, para posterior prescrição da dose variada de N, influência sobre os atributos vegetativos e produtividade e o efeito sobre a eficiência de uso do N sobre a cultura do milho.

O presente trabalho é dividido em três capítulos, sendo que, no primeiro, buscou-se avaliar a relação entre as determinações de IV e os parâmetros vegetativos. Com base neste, buscou-se inferir qual o momento de maior afinidade do sensor com os parâmetros avaliados e sua correlação com a escala de absorção de N pelas plantas e o melhor momento da utilização do sensor para a fertilização nitrogenada a DVN.

No segundo capítulo, buscou-se avaliar qual o efeito da aplicação de fertilizante nitrogenado a partir da prescrição do sensor óptico oriunda da variabilidade do índice de vegetação verificada pelo sensor óptico em uma área agrícola sobre a produtividade de grãos de milho e a eficiência de uso do nitrogênio quanto a doses de N e estratégias de fertilização a dose uniforme e dose variada de N.

No terceiro capítulo, buscou-se avaliar se a estratégia de fertilização nitrogenada a dose variada foi eficiente em incrementar a eficiência de uso do nitrogênio na cultura do milho sob a ótica das diferentes classes de dose da fertilização nitrogenada à dose variada,

buscando interpretar em qual situação a dose variada pode ser mais efetiva e trazer maior retorno econômico e menor impacto ambiental.

CAPÍTULO 1

SENSOR ÓPTICO NA FERTILIZAÇÃO NITROGENADA À DOSE VARIADA NO MILHO: I – NUTRIÇÃO DE PLANTAS E PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA¹

RESUMO

A fertilização à dose variada de nitrogênio (DVN) com base em sensores de espectrometria óptica de culturas é uma inovação tecnológica capaz de incrementar a eficiência de uso do nitrogênio (EUN) e reduzir os impactos ambientais. Porém, ainda são escassos os trabalhos sobre a utilização destes sensores de cultura na agricultura brasileira. Este estudo tem como objetivo avaliar a eficiência do sensor óptico de cultura (N-Sensor[®] ALS) em estimar o estado nutricional do milho e comparar a DVN com a estratégia tradicional de fertilização a dose uniforme de N (DUN). Este trabalho foi composto por três experimentos que foram conduzidos em diferentes locais no Sul do Brasil, na safra agrícola de 2008/09 e na de 2010/11. Os seguintes atributos vegetativos foram avaliados: produção de matéria seca, teor de nitrogênio (N), N absorvido, teor relativo de clorofila avaliado pela leitura do clorofilômetro manual (SPAD), e índice de vegetação obtido com o sensor óptico N-Sensor[®] ALS. As plantas foram avaliadas nos estádios de V4, V6, V8, V10, V12 e no florescimento do milho. Os experimentos seguiram o delineamento inteiramente casualizados, e os três locais diferentes foram analisados separadamente. O índice de vegetação foi diretamente relacionado à produção de matéria seca acima do solo ($R^2 = 0,91$; $p < 0,0001$), N absorvido ($R^2 = 0,87$; $p < 0,0001$) e teor relativo de clorofila pela leitura de SPAD ($R^2 = 0,63$; $p < 0,0001$), e inversamente relacionada com o teor de N da planta ($R^2 = 0,53$, $p < 0,0001$). A eficiência da DVN para a nutrição das plantas foi influenciada pelas condições climáticas específicas de cada local. A eficiência da estratégia à DVN foi similar à estratégia tradicionalmente utilizada pelos produtores nas áreas 1 e 2. Contudo, na área 3, onde as condições climáticas foram favoráveis para o desenvolvimento do milho, o uso de sensores ópticos para determinar a DVN resultou em um incremento de 11,8 % no N absorvido pelas plantas em relação à fertilização uniforme, indicando o potencial desta tecnologia para melhorar a EUN.

Palavras chave: Manejo sítio-específico, espectrometria óptica, agricultura de precisão, fertilidade do solo.

⁽¹⁾Este capítulo foi elaborado de acordo com as normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo. O mesmo foi publicado na Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, n. 5, p.1288-1298, 2013.

ABSTRACT

OPTICAL CROP SENSOR FOR VARIABLE-RATE NITROGEN FERTILIZATION IN CORN: I - PLANT NUTRITION AND DRY MATTER PRODUCTION

Variable-rate nitrogen fertilization (VRF) based on optical spectrometry sensors of crops is a technological innovation capable of improving the nutrient use efficiency (NUE) and mitigate environmental impacts. However, studies addressing fertilization based on crop sensors are still scarce in Brazilian agriculture. This study aims to evaluate the efficiency of an optical crop sensor to assess the nutritional status of corn and compare VRF with the standard strategy of traditional single-rate N fertilization (TSF) used by farmers. With this purpose, three experiments were conducted at different locations in Southern Brazil, in the growing seasons 2008/09 and 2010/11. The following crop properties were evaluated: above-ground dry matter production, nitrogen (N) content, N uptake, relative chlorophyll content (SPAD) reading, and a vegetation index measured by the optical sensor N-Sensor[®] ALS. The plants were evaluated in the stages V4, V6, V8, V10, V12 and at corn flowering. The experiments had a completely randomized design at three different sites that were analyzed separately. The vegetation index was directly related to above-ground dry matter production ($R^2 = 0.91$; $p < 0.0001$), total N uptake ($R^2 = 0.87$; $p < 0.0001$) and SPAD reading ($R^2 = 0.63$; $p < 0.0001$) and inversely related to plant N content ($R^2 = 0.53$; $p < 0.0001$). The efficiency of VRF for plant nutrition was influenced by the specific climatic conditions of each site. Therefore, the efficiency of the VRF strategy was similar to that of the standard farmer fertilizer strategy at sites 1 and 2. However, at site 3 where the climatic conditions were favorable to corn growth the use of optical sensor to prescribe VRF resulted in 12 % of increase in N plant uptake in relation to the standard fertilization, indicating the potential of this technology for improving NUE.

Index terms: Site-specific management, optical spectrometry, precision agriculture, soil fertility.

INTRODUÇÃO

A produtividade do milho é dependente do nível tecnológico e da qualidade do manejo da cultura (Raun et al., 2011). Geralmente, o nitrogênio (N) do solo não é suficiente para satisfazer plenamente a demanda de N do milho requerida para alcançar elevada produtividade e, portanto, é necessário complementar com outras fontes de N (Amado et al., 2002). Atualmente, no Sul do Brasil, a fertilização nitrogenada é estabelecida com base nos seguintes critérios: teor de matéria orgânica do solo (MOS), cultura antecessora e expectativa de produtividade de grãos (CQFS-RS/SC, 2004). No entanto, a variabilidade espacial dos atributos de solo e planta na área não são levados em conta, o que pode prejudicar a nutrição ideal da planta.

O risco de lixiviação do N, em condições climáticas tropical úmido e subtropical, associados à variabilidade espacial de atributos de solo, tais como: teor de MOS (Amado et al., 2009; Casa et al., 2011), profundidade do horizonte superficial (Albuquerque et al., 1996), disponibilidade de água (Delin & Berglund, 2005; Gregoret et al., 2006) e zonas de rendimento (Molin, 2001; Blackmore et al., 2003; Amado et al., 2009; Bramley, 2009) têm efeito sobre o estado nutricional de N nas plantas de milho. Assim a dose uniforme de N (DUN) para toda área pode não ser eficiente. Portanto, a DUN poderia superfertilizar algumas partes do talhão, enquanto que, em outras, subfertilizar (Bredemeier & Schmidhalter, 2005), contribuindo para a baixa eficiência da fertilização nitrogenada e aumentando os impactos ambientais (Raun et al., 2005).

Na agricultura de precisão, a dose variada de N (DVN), estabelecida com base em sensores ópticos de cultura, pode incrementar a eficiência da fertilização nitrogenada (Singh et al., 2006; Li et al., 2010). O crescimento das plantas é influenciado pelas condições climáticas, manejo do solo e cultura e, portanto, atributos vegetativos são geralmente mais eficientes para determinar a DVN que atributos de solo (Povh et al., 2008). Entre os atributos vegetativos que podem ser utilizados para definir a DVN, os seguintes têm maior possibilidade de sucesso: produção de matéria seca (MS), N absorvido no tecido vegetal e leitura do clorofilômetro manual (SPAD) (Raun et al., 2005; Rambo et al., 2008). O uso de sensores de espectrometria óptica, capazes de avaliar indiretamente o estado nutricional da cultura, de forma não destrutiva representa uma inovação tecnológica no manejo da fertilização nitrogenada (Raun et al., 2001, 2002, 2005; Argenta et al., 2003; Berntsen et al., 2006; Jorgensen & Jorgensen, 2007; Portz et al., 2012).

Entre os sensores ópticos atualmente disponíveis, o N-Sensor[®] ALS (Yara International ASA) tem sido largamente utilizado na Europa, especialmente na Alemanha e Inglaterra. Este sensor óptico determina o índice de vegetação (IV) com base na reflectância de luz nos comprimentos de banda específicos (comprimentos de onda de 730 e 760 nm), o que se relaciona com o estado nutricional de N das culturas (Link et al., 2005; Jasper et al., 2009; Portz et al., 2012). Este sensor óptico não é sensível ao tipo de cultivar (Jasper et al., 2009; Portz et al., 2012). Além disso, o sensor óptico é pouco afetado pelo tipo de solo e nível de luminosidade (Heege et al., 2008).

O N-Sensor[®] ALS é capaz de realizar um elevado número de registros por hectare, com cerca de 10 leituras por segundo (10 Hz), e é, portanto, capaz de captar a variabilidade do estado nutricional das culturas com alta resolução espacial (Jasper et al., 2009). O equipamento utilizado neste estudo é um sensor óptico ativo, com uma fonte de luz própria, capaz de operar durante a noite. Este sensor óptico tem sido utilizado na fertilização nitrogenada em trigo (Heege et al., 2008), cevada (Soderstron et al., 2010), triticale (Zillmann et al., 2006), milho (Tremblay et al., 2009), cana de açúcar (Singh et al., 2006, Portz et al., 2012), batata (Zebarth et al., 2003) e algodão (Raper et al., 2011).

No entanto, os estudos sobre os sensores ópticos de culturas, que são acoplados a distribuidores de fertilizante e determinam a DVN, ainda estão em estágio inicial de desenvolvimento no Brasil. Este estudo tem como objetivos: avaliar a eficiência do sensor óptico de cultura em estimar o estado nutricional de N e a produção de matéria seca do milho, e comparar a eficiência da DVN e DUN na nutrição das plantas.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi composto por um conjunto de três experimentos realizados em lavouras comerciais de milho não irrigado, sendo dois na safra agrícola 2008/09 e o terceiro em 2010/11. A região onde foram implantados os experimentos possui clima subtropical úmido Cfa (Köppen, 1948), com frequentes incidências de estiagem no verão e outono. A precipitação média anual é de 1700 mm ano⁻¹ e a temperatura média anual é de 19,5 °C. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 2006), e relevo suavemente ondulado. A descrição experimental dos locais e manejo da cultura é apresentada na tabela 1, bem como as propriedades químicas do solo e textura determinadas no início dos experimentos. Durante o período de desenvolvimento da cultura, condições normais de

precipitação foram registrados na área 1 (safra 2008/2009) e na área 3 (safra 2010/11), mas precipitações abaixo da média na área 2 (safra 2008/09) (Figura 1).

Tabela 1. Descrição experimental das áreas, características químicas e textural do solo (0-0,10 m), e práticas manejo de solo e de cultura

	Área 1	Área 2	Área 3
Local	Tio Hugo – RS	Cruz Alta - RS	Não-Me-Toque – RS
Coordenadas	S 28 35' 09"	S 28 36' 23"	S 28 31' 36"
	W 52 36' 44"	W 53 40' 42"	W 52 47' 45"
Altitude (m)	550	450	550
Tempo de adoção ao SPD ⁽¹⁾ (anos)	12	23	15
Safra agrícola	2008/09	2008/09	2010/11
Argila (g kg ⁻¹) ⁽²⁾	640	500	550
pH (H ₂ O) 1:1	5,8	5,1	5,8
MOS (%) ⁽³⁾	2,8	3,8	3,8
P (mg dm ⁻³) ⁽⁴⁾	16,3	17,2	12,3
K (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁴⁾	0,416	0,414	0,638
Al (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁵⁾	0	0,2	0
Ca (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁵⁾	6,1	5,1	7
Mg (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁵⁾	4,6	2,1	2,2
CTC (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁵⁾	13	12	14
Cultura anterior	Aveia preta	Trigo	Aveia preta
Data de semeadura	04/09/08	04/12/08	10/09/10
Espaçamento (m)	0,45	0,70	0,50
População (plantas ha ⁻¹)	55.000	70.000	67.000
Híbrido	Pioneer 30F53	Pioneer 30F53	Pioneer 30F53
Fertilização P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	70	70	78
Fertilização K ₂ O (kg ha ⁻¹)	84	45	69

⁽¹⁾SPD= sistema plantio direto; ⁽²⁾determinada por densimetria; ⁽³⁾determinado pelo método Walkley-Black;

⁽⁴⁾determinados pela solução Mehlich-1; ⁽⁵⁾determinados por extração com KCl (1 mol L⁻¹).

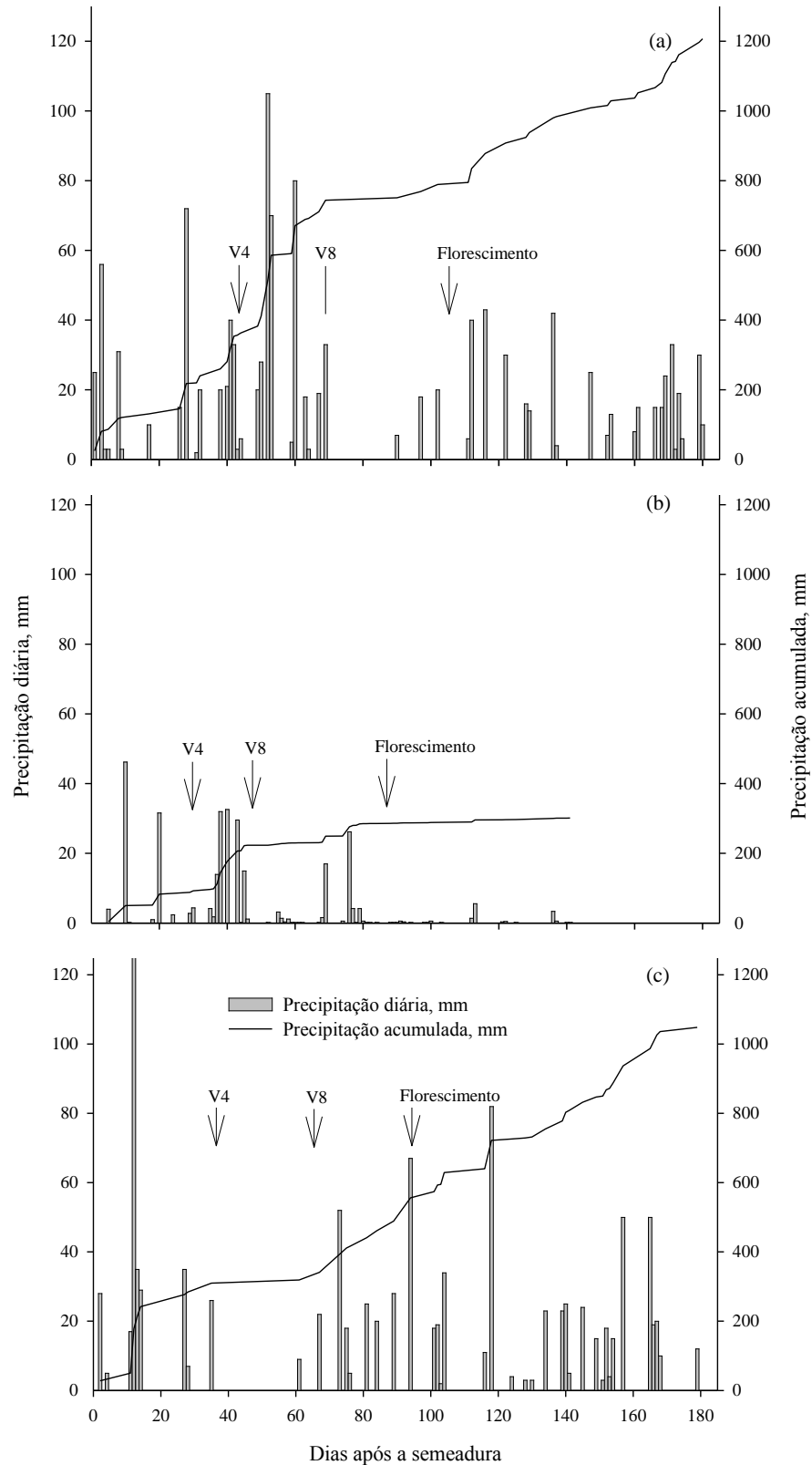


Figura 1. Precipitações diárias e acumulada ocorridas durante o ciclo da cultura do milho, na área 1 (a) e na área 2 (b) na safra agrícola de 2008/2009 e na área 3 (c) na safra agrícola de 2010/2011, RS. Fonte: Cotrijal e Fundacep.

A resposta do milho à fertilização nitrogenada foi investigada utilizando a ureia como fonte de N. A dose de N fertilizante foi dividida em três aplicações. Assim, a primeira dose variou de 20 a 30 kg ha⁻¹ de N aplicada na linha de semeadura; a segunda dose variou de 32 a 40 kg ha⁻¹ aplicada no estágio de quatro folhas totalmente expandidas (V4); e a terceira dose, variou de 21 a 180 kg ha⁻¹ de N aplicada no estágio vegetativo de oito folhas (V8) totalmente expandidas (Tabela 2). Para comparar as estratégias de DVN e DUN, a mesma dose total de N (140 kg ha⁻¹ de N) foi utilizada em ambas. Esta dose de fertilizante nitrogenado foi baseada na recomendação da CQFS-RS/SC (2004), para uma expectativa de produtividade de grãos de milho de 8 a 9 Mg ha⁻¹, em solos com teor de MOS de 2,6 a 5,0 %, e em sucessão ao cultivo de cobertura com aveia preta (*Avena strigosa* Schreb).

Tabela 2. Estratégia de fertilização nitrogenada utilizada nos experimentos

Área 1			Área 2			Área 3					
Tratamentos	Fertilização		Tratamentos	Fertilização		Tratamentos	Fertilização				
	Base	V4		V8	Base		V4	V8	Base	V4	V8
	-----kg ha ⁻¹ -----			-----kg ha ⁻¹ -----			-----kg ha ⁻¹ -----				
27DUN	27	0	0	T	0	0	0	T	0	0	0
80DUN	27	32	21	140DUN	20	40	80	70DUN	30	40	0
120DUN	27	32	61	140DVN	20	40	80	140DUN	30	40	70
140DUN	27	32	81	240DUN	20	40	180	140DVN	30	40	70
150DVN	27	32	91					210DUN	30	40	140
160DUN	27	32	101								

DUN= dose uniforme de N; DVN= dose variada de N seguindo a prescrição do sensor óptico; T= testemunha sem fertilização nitrogenada.

Na área 1, os tratamentos foram dispostos em faixas (15 x 380 m) sem repetições. Para determinação dos atributos vegetativos do milho, foram utilizados nove pontos georreferenciados distanciados 40 m entre si por tratamento. Nas áreas 2 e 3, foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado com três repetições. Além disso, na área 2, os tratamentos foram dispostos em faixas (20 x 260 m) com 12 pontos de avaliação dos atributos vegetativos georreferenciadas, distanciadas a 20 m entre si. Na área 3, as faixas tiveram tamanho de 36 x 300 m. Os atributos vegetativos foram avaliados em sete pontos georreferenciados, espaçados 40 m entre si.

Os atributos vegetativos do milho avaliados foram: produção de matéria seca (MS), teor de N no tecido vegetal, N total absorvido, teor relativo de clorofila avaliada por leitura com clorofilômetro manual (Minolta SPAD-502[®], MINOLTA) e índice de vegetação (IV) determinado com sensor óptico de cultura (N-Sensor[®] ALS). A produção de MS foi avaliada através da coleta de plantas de milho em 2 metros lineares por ponto amostral georreferenciado. A parte aérea das plantas foi coletada, seca, pesada e moída para avaliação do teor de N no tecido através de combustão úmida micro-Kjeldhal seguindo metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). As determinações do teor relativo de clorofila foram realizadas através de leituras com clorofilômetro manual em cinco plantas de milho por ponto amostral de acordo com procedimento descrito por Argenta et al. (2001). Estes atributos vegetativos do milho foram avaliados, nos estádios fenológicos V4, V8, V12 e no florescimento nas áreas 1 e 2 e nos estádios V4, V6, V8, V10, V12 e florescimento na área 3.

A DVN foi determinada pelo sensor de espectrometria N-Sensor[®] e utilizou o algoritmo desenvolvido pela Yara (Yara International ASA), que prescreve a dose de fertilizante com base no IV do milho. Este equipamento possui dois conjuntos de sensores (direito e esquerdo), constituídos de transmissores de xenon com raios multiespectrais (650 a 1100 nm) de alta intensidade, e dois fotodiodos receptores que determinam o IV com base na relação de reflectância das ondas espectrais de comprimentos de 730 e 760 nm.

O sensor óptico foi acoplado na parte superior da cabine do trator, a aproximadamente 3,8 m da superfície do solo. O sensor realiza as determinações em uma faixa de 3,0 m de largura de cada lado do trator, seguindo o deslocamento do trator. O ângulo formado pelo feixe de luz entre o transmissor de xênon e a superfície do solo é compreendido entre 50° e 66°. Para os experimentos, as aplicações à DVN foram divididas em duas etapas: primeiro, as plantas foram escaneadas para determinar-se o IV médio para cada tratamento. No segundo passo, este valor foi utilizado como referência para prescrever a dose média de N a ser aplicada por tratamento (91 kg ha⁻¹ de N na área 1, 80 kg ha⁻¹ de N na área 2 e 70 kg ha⁻¹ de N na área 3). Esta fertilização de N em cobertura, no estágio V8, foi complementar as adubações anteriores de N na semeadura e no estágio V4, para chegar-se a dose total de N para cada tratamento. Depois dessa rotina de calibração, a DVN em tempo real foi realizada. Em todas as fertilizações, utilizou-se o modo de operação “N-application”.

Durante a fertilização nitrogenada, as informações das doses de N a serem aplicadas à DVN foram transmitidas pelo sensor óptico para o controlador (Topper 4500[®], Stara, Brasil) do distribuidor centrífugo de fertilizantes (Twister[®], Stara, Brasil). Todos os dados das operações foram armazenados. Os IV do milho foram avaliados no estágio fenológico V8

para as áreas 1 e 2, e nos estádios V4, V6, V8, V10, V12 na área 3 para determinar a relação com os atributos vegetativos. No entanto, a fertilização à DVN foi aplicada no estádio V8 das plantas de milho em todos os experimentos.

Os dados registrados pelo sensor óptico foram transferidos para um sistema de informação geográfico (Campeiro 7.0, Giotto et al., 2011). Os dados foram filtrados, excluindo-se pontos externos às parcelas (erro de posicionamento), bem como dados improváveis (erro de leituras) definidos por valores extremos. Posteriormente, foram determinadas as leituras médias do sensor óptico num raio de 10 m em torno de cada ponto georeferenciado visando à correlação com os atributos vegetativos.

Os resultados experimentais foram submetidos à análise descritiva e de variância. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), seguida de regressões polinomiais através do pacote estatístico SISVAR 4.0 (Ferreira, 2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Atributos vegetativos no estádio fenológico V8

Os atributos vegetativos do milho avaliados no estádio V8 são apresentados na tabela 3. Diferenças nos atributos vegetativos para o mesmo estádio fenológico foram observadas entre as áreas, mostrando uma forte influência das condições ambientais locais durante o desenvolvimento da cultura (Figura 1). Porém os baixos coeficientes de variação (CV) observados para os atributos vegetativos em cada local demonstram grande uniformidade até este estádio.

Em média, a produção de MS e o N absorvido foram maiores na área 3 e menores na área 1. Assim o N absorvido pelo milho nas áreas 1 e 2 foi 40 e 59 %, respectivamente em relação a área 3 (Tabela 3). Além disso, a menor produção de MS (45 e 83 %) foi verificada nas áreas 1 e 2, respectivamente, em comparação com a área 3. As leituras de SPAD diferiram menos entre os locais, uma vez que as leituras de SPAD nas áreas 1 e 2 foram 87 e 99 % das observadas na área 3, respectivamente.

Tabela 3. Estatística descritiva dos atributos vegetativos avaliados no estágio fenológico V8 de desenvolvimento do milho

	Atributos vegetativos do milho			
	Matéria seca	Clorofilômetro	Nitrogênio	
	kg ha ⁻¹	SPAD	%	kg ha ⁻¹
Área 1				
27DUN	658 ^{ns}	38,6 c	2,3 ^{ns}	15,5 ^{ns}
80DUN	748	43,0 b	2,4	18,4
120DUN	676	44,8 ab	2,6	17,7
140DUN	728	45,3 a	2,4	17,7
150DVN	683	44,5 ab	2,4	16,6
160DUN	721	45,3 a	2,5	17,9
Média	702	43,6	2,4	17,3
DP	31,8	2,3	0,2	3,7
CV	0,05	0,05	0,10	0,21
Área 2				
T	1297 ^{ns}	48,9 ^{ns}	1,6 c	20,9 b
140DUN	1260	51,0	2,0 b	25,0 ab
140DVN	1303	48,0	2,0 b	26,6 ab
240DUN	1320	51,9	2,3 a	29,9 a
Média	1292	49,8	1,9	25,7
DP	387,3	2,5	0,2	8,9
CV	0,29	0,05	0,15	0,35
Área 3				
T	1378 ^{ns}	48,0 b	2,9 ^{ns}	40,3 ^{ns}
70DUN	1554	50,3 ab	2,9 a	45,0
140DUN	1525	51,2 a	2,7 b	41,6
140DVN	1670	49,6 ab	2,7 b	45,2
210DUN	1581	50,7 a	2,6 b	42,2
Média	1557	50,1	2,7	43,1
DP	233,3	2,3	0,2	7,2
CV	0,14	0,04	0,09	0,17

DUN= dose uniforme de N; DVN= dose variada de N prescrita pelo sensor óptico; SPAD= leitura do clorofilômetro manual; Teor de N no tecido vegetal (%) e N absorvido (kg ha⁻¹ de N); T= testemunha (0 kg N ha⁻¹); DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05); ^{ns} = não significativo.

Este resultado pode ser explicado pelas diferenças de precipitações, com alta precipitação no início do desenvolvimento da cultura na área 1 e a precipitação escassa na área 2 em relação à área 3 (Figura 1). Assim, a precipitação na área 1 teve precipitação desuniforme no período entre a semeadura do milho e o estágio V8, com um forte aumento na

precipitação após a segunda fertilização realizada em cobertura (V4). A elevada precipitação registrada neste período pode ter afetado a nutrição do milho em função da lixiviação do N, removendo este nutriente da zona radicular. Por outro lado, a área 2 teve precipitações muito reduzidas no mesmo período, o que também poderia comprometer a absorção de N pelo milho, uma vez que a umidade do solo adequada é essencial para a mineralização da MOS e para o fluxo de massa, que é o principal mecanismo de suprimento do N do solo às plantas (Barber, 1962; Sangoi & Almeida, 1994). A precipitação na área 3 foi bem distribuída e em quantidade satisfatória para atender a demanda do milho.

Os tratamentos com fertilização nitrogenada para cada área mostram diferença estatística apenas para alguns atributos vegetativos no V8. Embora a produção de MS no estágio V8 tenha tido uma grande variação entre os locais, não se observou aumento significativo na MS em relação à testemunha devido à fertilização nitrogenada. A ausência de diferença entre os tratamentos com diferentes doses de N e a testemunha sugere que a MS não foi um indicador confiável para discriminar os tratamentos com fertilização nitrogenada na cultura do milho no estágio V8 (Tabela 3). Além disso, o N absorvido no V8 também foi um indicador fraco, discriminando apenas a maior dose da testemunha na área 2. A leitura de SPAD foi mais sensível, sendo capaz de discriminar os diferentes tratamentos com doses de N nas áreas 1 e 3.

Apenas na área 3, a quantidade média de MS produzida no estágio de V8 foi superior nos tratamentos com fertilização nitrogenada em relação à testemunha. As testemunhas apresentaram elevada diferença entre os locais, assim, nas áreas 3 e 2, a produção de MS da testemunha foi muito superior, alcançando aproximadamente o dobro da verificada na área 1.

As condições climáticas afetaram fortemente a dinâmica de N do solo e o estado nutricional de N do milho. Desta forma, a absorção média de N pelo milho na área 3 foi aproximadamente 26 kg ha⁻¹ maior do que a observada na área 1. Assim, a elevada precipitação registrada na área 1 durante os estádios iniciais de desenvolvimento do milho (721 mm até o estágio V8) (Figura 1), provavelmente, comprometeu o uso eficiente do N da fertilização de base (27 kg ha⁻¹ de N) e a primeira de cobertura (32 kg ha⁻¹ de N), devido à lixiviação de nitrato (Sangoi et al., 2003; Ceretta et al., 2005). Por outro lado, a área 3 acumulou 319 mm de precipitação até o estágio V8, ou seja, 44 % da precipitação na área 1.

As leituras de SPAD de 45,4, 52,1 e 55,3, para os estádios de desenvolvimento de V3-V4, V6-V7 e V10-V11, respectivamente, foram propostos como valores críticos para atingir altas produtividades de milho (12 Mg ha⁻¹) (Argenta et al., 2003, 2004). Adicionalmente, leituras de SPAD para o estágio V8-V9 do milho abaixo de 53 reportadas por Godoy et al.

(2007) sugerem elevada probabilidade de resposta à fertilização nitrogenada. As leituras de SPAD médias para os locais 1, 2 e 3 no V8 foram 43,6, 49,8 e 50,1, respectivamente (Tabela 3). Portanto, todos os tratamentos investigados em nosso estudo estavam abaixo dos valores críticos para as leituras.

Estado nutricional do milho e atributos de planta relacionados com o índice de vegetação determinado com sensor óptico de culturas

A eficiência da DVN, entre outros fatores, depende da capacidade do sensor óptico de culturas em estimar com precisão o estado nutricional da cultura. A relação entre os atributos vegetativos em diferentes estádios de desenvolvimento e as leituras do sensor óptico (IV) é apresentada na figura 2. Esta figura mostra apenas os dados obtidos na área 3, porque, nesta área, o sensor óptico foi utilizado em diversos estádios fenológicos do milho, totalizando 436 observações.

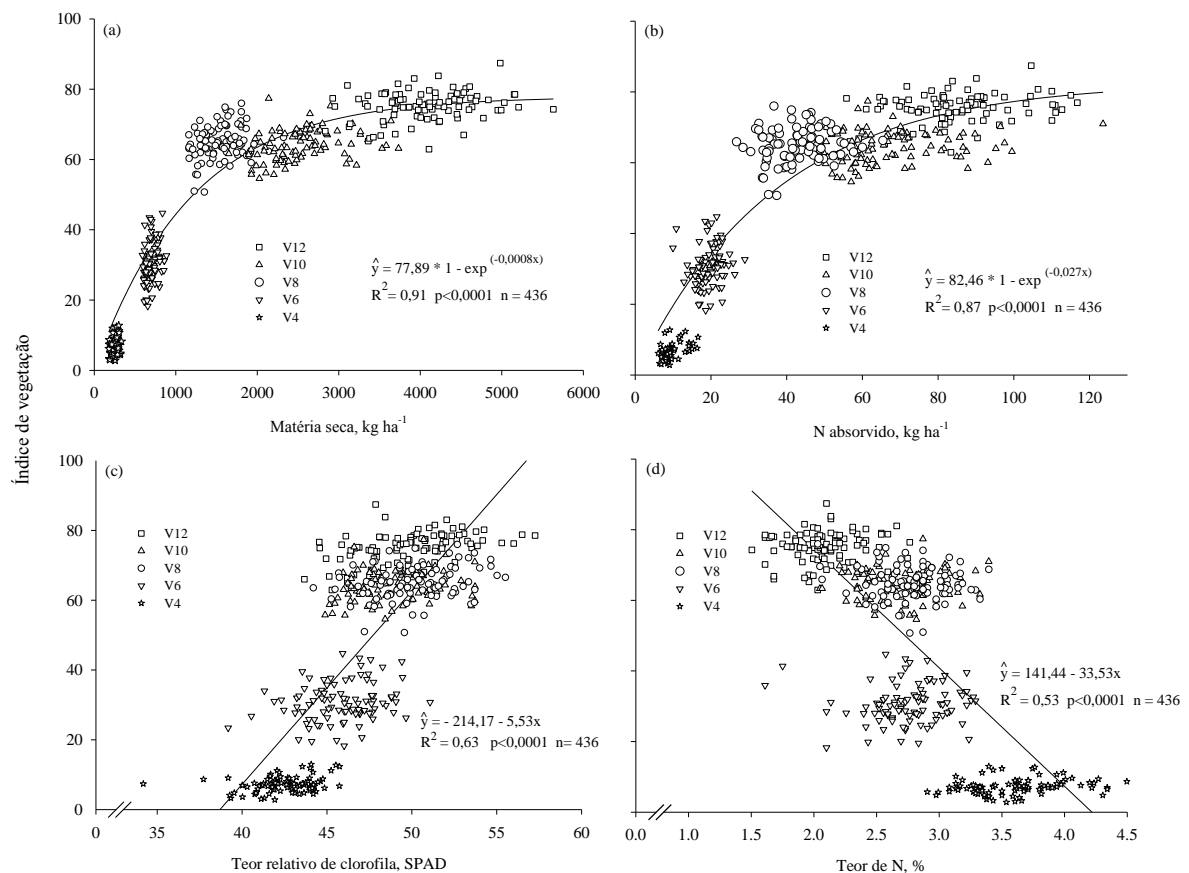


Figura 2. Relações entre os atributos vegetativos de milho avaliados e o índice de vegetação determinado pelo sensor óptico de planta (área 3).

O IV do milho correlacionou-se positivamente com o N absorvido, produção de MS e teor relativo de clorofila determinado pelas leituras de clorofilômetro SPAD (Figura 2) e negativamente com o teor de N no tecido vegetal. Este resultado, possivelmente, está relacionado com o efeito diluição do N (Plénet & Lemaire, 1999; Herrmann & Taube, 2004), onde o aumento no N acumulado pelas plantas é seguido do aumento na produção de MS, mas não na mesma proporção, resultando em um teor reduzido de N na MS (Tabela 3). Assim, há uma menor relação entre o IV e o teor de N no tecido vegetal ($R^2=0,53$; $p<0,0001$), quando comparada a relação de IV e N absorvido ($R^2=0,87$; $p<0,0001$).

Neste estudo (estádios fenológicos V4 a V12), foram obtidos altos coeficientes de determinação para IV e MS ($R^2=0,91$; $p<0,0001$), e para IV e N absorvido ($R^2=0,87$; $p<0,0001$). Em geral, os valores observados neste estudo são similares aos reportados por Portz et al. (2012), que investigaram a relação entre o sensor óptico de culturas com a MS e N absorvido em cana de açúcar ($R^2=0,74$ a $0,96$).

A relação entre o IV do milho e o N absorvido é fortemente influenciada pelo respectivo estágio fenológico da cultura (Mutanga & Skidmore, 2004; Hegee et al., 2008; Portz et al., 2012). Assim, para a determinação confiável do estado nutricional das culturas por meio de sensores ópticos, as plantas devem ter atingido uma determinada quantidade mínima de MS e de N absorvido. Por outro lado, o sensor óptico de cultura preferencialmente não deve ser utilizado em estádios tardios de desenvolvimento, quando pode ocorrer saturação das leituras de IV (Hegee et al., 2008; Portz et al., 2012).

O efeito de saturação foi verificado neste trabalho nos estádios fenológicos do milho mais tardios (V10 e V12). Após estes estádios de desenvolvimento, os aumentos na MS e N absorvido são associados apenas ligeiramente com o incremento nas leituras do IV (Figura 2), sugerindo uma diminuição na eficiência do sensor óptico. Resultados semelhantes foram anteriormente reportados por Mutanga & Skidmore (2004), Povh (2007), Hegee et al. (2008), Grohs et al. (2009) e Portz et al. (2012), que reportaram perda gradual da eficiência dos sensores de espectrometria óptica (efeito de saturação), devido à alta produção de MS e fechamento do dossel. A perda de eficiência do sensor óptico foi observada quando a produção de MS foi superior a 2500 kg ha^{-1} e o N absorvido acima 70 kg ha^{-1} (Figura 2).

N absorvido pelo milho e produção de matéria seca no florescimento influenciados pelas estratégias de fertilização nitrogenada

Os atributos vegetativos no estágio de florescimento do milho são apresentados na tabela 4. As diferenças entre as áreas reportadas no estágio V8 foram ampliadas no florescimento, quando a área 3 teve a maior produção de MS e N absorvido. No florescimento, todos os atributos vegetativos apresentaram diferença entre os tratamentos com diferentes doses de N em todas as áreas.

Tabela 4. Estatística descritiva dos atributos vegetativos do milho avaliados no estágio fenológico de florescimento

	Atributos vegetativos do milho			
	MS	Clorofilômetro	N Absorvido	
	kg ha ⁻¹	SPAD	%	kg ha ⁻¹
Área 1				
27DUN	6113 c	38,0 c	0,9 c	53,2 c
80DUN	9350 ab	41,1 ab	0,9 c	96,3 b
120DUN	9390 ab	45,9 ab	1,2 b	108,8 b
140DUN	8816 bc	47,2 bc	1,1 b	98,8 b
150DVN	10288 ab	49,1 ab	1,2 b	122,9 b
160DUN	12221 a	52,2 a	1,4 a	175,6 a
Média	9363	45,6	1,1	109,2
DP	1820	4,7	0,2	44,4
CV	0,19	0,10	0,19	0,40
Área 2				
T	5188 c	41,3 c	0,6 c	31,1 c
140DUN	5688 bc	55,1 b	1,1 b	62,5 b
140DVN	6085 ab	55,7 ab	1,1 ab	66,9 b
240DUN	6268 a	57,0 a	1,2 a	75,2 a
Média	5823	52,9	1,0	57,3
DP	877	6,2	0,2	18,4
CV	0,15	0,12	0,26	0,32
Área 3				
T	10111 ab	51,2 d	1,2 d	117,0 c
70DUN	8760 c	54,5 c	1,3 c	109,9 c
140DUN	10417 a	57,1 b	1,6 b	163,3 b
140DVN	10180 ab	57,5 ab	1,7 ab	182,6 a
210DUN	9563 ab	59,4 a	1,8 a	177,2 ab
Média	9777	56,4	1,5	153,1
DP	2027	3,8	0,3	47,8
CV	0,20	0,06	0,22	0,31

DUN= dose uniforme de N; DVN= dose variada de N prescrita pelo sensor óptico; SPAD= leitura do clorofilômetro manual; Teor de N no tecido vegetal (%) e N absorvido (kg ha⁻¹ de N); T= testemunha (0 kg N ha⁻¹); DP= desvio padrão; CV= coeficiente de variação; Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05); ns = não significativo.

A faixa crítica do teor de N no tecido vegetal no estágio de florescimento do milho é de 1,0-1,3 % de acordo com Stanford (1973), Grove et al. (1980), Coelho et al. (1992) e Amado et al. (2002). A maioria dos tratamentos com fertilização nitrogenada, independente da área, alcançou esta faixa de nutrição, com exceção do tratamento com a menor dose de

fertilizante (80DUN) na área 1, no estágio de florescimento do milho. Por outro lado, o tratamento testemunha ficou geralmente abaixo da faixa adequada para a nutrição, exceto para a área 3.

Em média, o estado nutricional do milho na área 3 estava melhor do que nos outros locais, como o expresso pelo maior teor de N no tecido vegetal das plantas, N absorvido e os altos valores de leitura de clorofilômetro SPAD. Nesta área, mesmo no tratamento testemunha (sem fertilização nitrogenada), o N absorvido pelo milho alcançou 117 kg ha^{-1} , indicando um alto suprimento de N pelo solo. A utilização de um sistema de plantio direto de longo prazo (15 anos) e o teor de MOS (3,8 %) (Tabela 2), associados às condições climáticas favoráveis para a atividade biológica do solo e o desenvolvimento das plantas de milho, podem explicar a elevada quantidade de N do solo absorvida pela cultura.

A deficiência de N observada no tratamento testemunha na área 2 e no tratamento 80DVN na área 1, que eram de menor magnitude no estágio V8 (Tabela 3), tornaram-se mais pronunciadas no estágio de florescimento, quando a demanda de N aumentou. Como consequência da deficiência de N, a menor produção de MS, menores leituras de SPAD, teor de N no tecido vegetal e N absorvido foram observadas nesses tratamentos em relação ao tratamento com maior dose de fertilizante nitrogenado (Tabela 4).

O efeito da fertilização nitrogenada sobre a nutrição de milho pode ser avaliada em tratamentos com a mesma dose de fertilizante nitrogenado como o tratamento 140 DUN. Houve um forte efeito das condições climáticas de cada local sobre a resposta da nutrição de plantas à fertilização nitrogenada. Além disso, o N absorvido no florescimento nas áreas 2 e 1 foi de 38 e 61 %, respectivamente, do que na área 3. Além disso, a produção de matéria seca foi de 55 e 85 %, respectivamente, e planta teor de N no tecido vegetal nos mesmos locais foi de 69 % do que na área 3.

Na área 1, o tratamento 140DUN resultou em um aumento na absorção de N de $45,6 \text{ kg ha}^{-1}$ em relação ao tratamento testemunha (Tabela 4). Este aumento na absorção de N proporcionou o aumento de 2703 kg ha^{-1} de MS. Este resultado foi associado ao estado nutricional do milho pobre em N até o estágio V8 devido à chuva intensa nesta área. Como consequência, a absorção de N em estádios de desenvolvimento posteriores ajudou a recuperar o atraso na produção de MS. Na área 2, a DUN resultou em um aumento significativo no N absorvido e no teor de N no tecido vegetal, com um ligeiro aumento na produção de MS em relação ao tratamento testemunha. Este resultado foi associado às chuvas escassas durante o período de desenvolvimento nesta área, que afetou a produção de MS. Na área 3, a DUN resultou em um aumento de $46,3 \text{ kg ha}^{-1}$ no N absorvido com um efeito

positivo no teor de N no tecido vegetal e apenas um ligeiro aumento na produção de MS (306 kg ha⁻¹) em relação ao tratamento testemunha.

Na média dos tratamentos, a quantidade de N absorvido nas áreas 2 e 1 foram 39 e 71 %, respectivamente, da quantidade verificada na área 3. Além disso, a produção de MS, na área 2 foi aproximadamente 60 % da verificada na área 1 e na área 3. Já para as leituras de SPAD médias obteve-se 81 e 94 %, respectivamente, para as áreas 1 e 2 em relação à área 3 (Tabela 4).

As leituras SPAD nos tratamentos 140DUN, 140DVN, 210DUN (área 3) e 240DUN (área 2) no estágio de florescimento foram semelhantes ou superiores ao valor crítico de 57,1 proposto por Argenta et al. (2004). Na área 1, nenhum tratamento alcançou este valor crítico.

O incremento na quantidade de N absorvido pela cultura é um dos objetivos da DVN, pois a redistribuição espacial do fertilizante nitrogenado determina doses de N mais elevadas nas zonas em que o estado nutricional de N das plantas é pobre, portanto, existe maior probabilidade de resposta à fertilização (Singh et al., 2006). Este fato foi observado na área 3 onde a quantidade de N absorvido pelo milho com DVN foi 11,8 % superior a DUN (Tabela 4). Além disso, o maior N absorvido (182,6 kg ha⁻¹), entre todos os tratamentos, foi observado na área 3 com DVN.

A evolução da absorção de N nos diferentes estádios fenológicos do milho foi investigado nas áreas 1 e 3, por meio de amostragem intensiva de plantas (Figura 3). A absorção de N do milho na área 3 foi mais rápida que na área 1, provavelmente devido às condições climáticas, como discutido anteriormente. A absorção de N relativa até o estágio V8, em média, entre os tratamentos, representou apenas 16 e 28 % do N absorvido total no florescimento nas áreas 1 e 3, respectivamente (Figura 3). Portanto, a maior parte do N foi absorvida depois do estágio V8. Este resultado justifica o uso de fertilizações nitrogenadas após o estágio V8 de desenvolvimento.

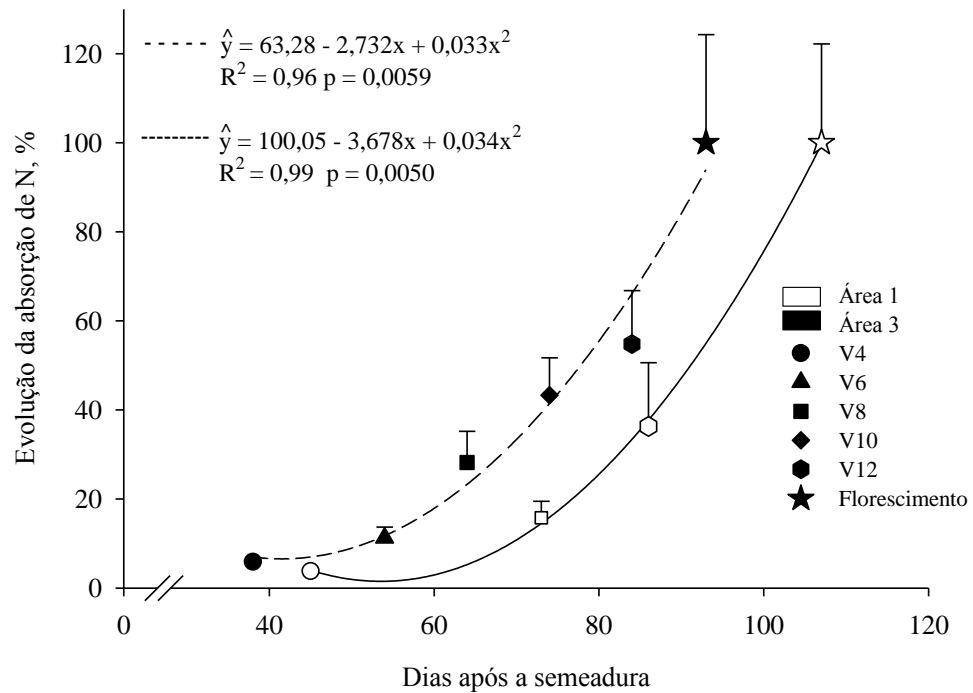


Figura 3. Evolução da absorção de N pelas plantas de milho em diferentes estádios fenológicos (áreas 1 e 3).

CONCLUSÕES

1. As condições hídricas específicas nos locais de estudo tiveram um forte efeito sobre a eficiência da fertilização nitrogenada e estado nutricional nitrogenado das plantas de milho.
2. O sensor óptico de culturas foi eficiente em estimar a produção de matéria seca e N absorvido pelo milho, apesar de uma perda de eficiência (saturação) observada nos estádios mais tardios de desenvolvimento da cultura.
3. A fertilização nitrogenada à dose variada com base no sensor óptico de cultura promoveu aumento do N absorvido em relação à fertilização nitrogenada à dose uniforme na área 3, onde a precipitação foi favorável ao desenvolvimento das plantas, indicando o potencial desta tecnologia em promover aumento da eficiência do uso de N. Nos outros locais, onde as precipitações foram irregulares, não houve diferença na eficiência das estratégias de fertilização nitrogenada.
4. Considerando que a maior parte do N absorvido pelo milho foi após o estágio de desenvolvimento V8, a utilização do sensor óptico para prescrição da fertilização, a dose variada neste estágio de desenvolvimento mostrou-se adequada.

LITERATURA CITADA

- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J. & FIORIN, J.E. Variabilidade de solo e planta em podzólico vermelho-amarelo. R. Bras. Ci. Solo, 20:151- 157, 1996.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUCK, J. & AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob Sistema de Plantio Direto. R. Bras. Ci. Solo, 26:241-248, 2002.
- AMADO, T.J.C.; PES, L.Z.; LEMAINSKI, C.L. & SCHENATO, R.B. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. R. Bras. Ci. Solo, 33:831-843, 2009.
- ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F. & BORTOLINI, C.G. Clorofila na folha como indicador do nível de nitrogênio em cereais. Ci. Rural, 31:715-722, 2001.
- ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; FOSTHOFER, E.L.; STRIEDER, M.L.; SUHRE, E. & TEICHMANN, L.L. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. R. Bras. Ci. Solo, 27:109-119, 2003.
- ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F. & SANGOI, L. Leaf relative chlorophyll content as an indicator parameter to predict nitrogen fertilization in maize. Ci. Rural, 34:1379-1387, 2004.
- BARBER, S.A. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. Soil Sci., 93:39-49, 1962.
- BERNTSEN, J.; THOMSEN, A.; SCHELDE, K.; HANSEN, O.M.; KNUDSEN, K.; BROGE, N.; HOUGAARD, H. & HØRFARTER, R. Algorithms for sensor-based redistribution of nitrogen fertilizer in winter wheat. Prec. Agric., 7:65-83, 2006.
- BLACKMORE, S.; GODWIN, R.J. & FOUNTAS, S. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years. Biosci. Eng., 84:455-466, 2003.
- BRAMLEY, R.G.V. Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application. Crop Past. Sci., 60:197-217, 2009.
- BREDEMEIER, C. & SCHMIDHALTER, U. Laser-induced chlorophyll fluorescence sensing to determine biomass and nitrogen uptake of winter wheat under controlled environment and field conditions. In: STAFFORD, J.V., ed. PRECISION AGRICULTURE 2005. Proceedings... Wageningen, Academic Publishers, 2005. p. 273-280.
- CASA, R.; CAVALIERI, A. & LOCASCIO, B. Nitrogen fertilization management in precision agriculture: A preliminary application example on maize. Italian J. Agron., 6:23-27, 2011.

- CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; VIEIRA, F.C.B.; HERBES, M.G.; MOREIRA, I.C.L. & BERWANGER, A.L. Dejeito líquido de suínos: I. Perdas de nitrogênio e fósforo na solução escoada na superfície do solo, sob plantio direto. *Ci. Rural*, 35:1296-1304, 2005.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS-RS/SC. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 3. ed. Passo Fundo, SBCS- Núcleo Região Sul/UFRGS, 2004. 400 p.
- COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E.; BAHIA, A.F.C. & GUEDES, G.A.A. Doses e métodos de aplicação de fertilizantes nitrogenados na cultura do milho sob irrigação. *R. Bras. Ci. Solo*, 10:61-67, 1992.
- DELIN, S. & BERGLUND, K. Management zones classified with respect to drought and waterlogging. *Prec. Agric.*, 6:321-340, 2005.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação do solo, 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., São Carlos, 2000. Anais... São Carlos, UFSCar, 2000. p. 255-258.
- GIOTTO, E. Sistema CR - Campeiro 7.0. Disponível em: <<http://www.crcampeiro.net/>>. Acessado em 14 Out. 2011.
- GODOY, L.J.G.; SOUTO, L.S.; FERNANDES, D.M. & VILLAS BÔAS, R.L. Uso de clorofilômetro no manejo da adubação nitrogenada para milho em sucessão a pastagem de *Brachiaria decumbes*. *Ci. Rural*, 37:38-44, 2007.
- GREGORET, M.C.; DARDANELLI, J.; BONGIOVANNI, R. & DIAZ-ZORITA, M. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un Haplustol. *Ci. Suelo*, 24:147-159, 2006.
- GROVE, L.T.; RITCHEY, K.D. & NADERMAN JUNIOR, G.C. Nitrogen fertilization of maize on Oxisol of the cerrado of Brazil. *Agron. J.*, 27:261-265, 1980.
- 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. *Eng. Agríc.*, 29:101-112, 2009.
- HEEGE, H.J.; REUSCH, S. & THIESSEN, E. Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. *Prec. Agric.*, 9:115-131, 2008.
- HERRMANN, A. & TAUBE, F. The range of the critical nitrogen dilution curve for maize (*Zea mays* L.) can be extended until silage maturity. *Agron. J.*, 96:1131-1138, 2004.

- JASPER, J.; REUSCH, S. & LINK, A. Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination—impact of seed rate, variety and growth stage. In: van HENTEN, E.J.; GOENSE, D. & LOKHORST, C., eds. PRECISION AGRICULTURE 2009. EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 7., Wageningen, 2009. Proceedings... Wageningen, Academic Publishers, 2009. p.23-30.
- JØRGENSEN, J.R. & JØRGENSEN, R.N. Uniformity of wheat yield and quality using sensor assisted application of nitrogen. *Prec. Agric.*, 8:63-73, 2007.
- KOPPEN, W.P. *Climatologia, com un estudio de los climas de la tierra*. México, Fondo de Cultura Económica, 1948. 478p.
- LI, Y.; CHEN, D.; WALKER, C.N. & ANGUS, J.F. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. *Field Crops Res.*, 118:221-227, 2010.
- LINK, A.; JASPER, J. & REUSCH, S. Suitability of different crop parameters for the determination of site-specific nitrogen fertilizer demand. In: STAFFORD, J.V., ed. PRECISION AGRICULTURE; EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., Wageningen, 2005. Proceedings... Wageningen, Academic Publishers, 2005. p.297-302.
- MOLIN, J.P. *Agricultura de precisão: O gerenciamento da variabilidade*. Piracicaba, O Autor, 2001. 83p.
- MUTANGA, O. & SKIDMORE, A.K. Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation. *Inter. J. Remote Sens.*, 25:3999-4014, 2004.
- PLÉNET, D. & LEMAIRE, G. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. *Plant Soil*, 216:65-82, 1999.
- PORTZ, G.; MOLIN, J.P. & JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. *Prec. Agric.*, 13:33-44, 2012.
- POVH, F.P. *Utilização de sensor ótico ativo em culturas de cereais*. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007. 85p. (Dissertação de Mestrado)
- POVH, F.P.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R. & SALVI, J.S. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. *Pesq. Agropec. Bras.*, 43:1075-1083, 2008.
- RAMBO, L.; SILVA, P.R.F.; STRIEDER, M.L.; DELATORRE, C.A.; BAYER, C. & ARGENTA, G. Adequação de doses de nitrogênio em milho com base em indicadores de solo e planta. *Pesq. Agropec. Bras.*, 43:401-409, 2008.
- RAPER, T.B.; VARCO, J.J.; HUBBARD, K.J. & BOOKER, B.C. Utilization of crop sensors to detect cotton growth and N stress. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY PROGRAM. ANNUAL MEETING: AGRONOMY FEEDS THE WORLD, 2011. Corpus Christ, Texas. Annual... Corpus Christ, American Society of Agronomy, 2011. p.8-433.

- RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; LUKILA, E.; THOMASON, W. & SHEPERS, J.S. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agon. J.*, 93:131-138, 2001.
- RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; THOMASON, W. & LUKILA, E. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agron. J.*, 98:815-820, 2002.
- RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; MARTIN, K.L.; FREEMAN, K.W.; MULLEN, R.W.; ZHANG, H.; SHEPERS, J.S. & JOHNSON, G.V. Optical sensor-based algorithmic for crop nitrogen fertilization. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 36:2759-2781, 2005.
- RAUN, W.R.; SOLIE, J.B. & STONE, M.L. Independence of yield potential and crop nitrogen response. *Prec. Agric.*, 12:508-518, 2011.
- SANGOI, L. & ALMEIDA, M.L. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio para a cultura do milho num solo com alto teor de matéria orgânica. *Pesq. Agropec. Bras.*, 29:13-24, 1994.
- SANGOI, L.; ERNANI, P.R.; LECH, V.A. & RAMPAZZO, C. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da uréia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. *Ci. Rural*, 33:65-70, 2003.
- SINGH, I.; SRIVASTAVA, I.A.; CHANDNA, P. & GUPTA, R. Crop sensors for efficient nitrogen management in sugarcane: Potential and constraints. *Sugar Technol.*, 8:299-302, 2006.
- SODERSTROM, M.; BORJESSON, T.; PETTERSSON, C.G.; NISSEN, K. & HAGNER, O. Prediction of protein content in malting barley using proximal and remote sensing. *Prec. Agric.*, 11:587-599, 2010.
- STANFORD, G. Rationale for optimum nitrogen fertilization in corn production. *J. Environ. Qual.*, 2:159-166, 1973.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. *Análises de solo, plantas e outros materiais*. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.
- TREMBLAY, N.; WANG, Z.; MA, B.L.; BELEC, C. & VIGNEAULT, P. A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. *Prec. Agric.*, 10:145-161, 2009.
- ZEBARTH, B.J.; REES, H.; TREMBLAY, N.; FOURNIER, P. & LEBLON, B. Mapping spatial variation in potato nitrogen status using the N Sensor. *Acta Hortic.*, 627:267-273, 2003.

ZILLMANN, E.; GRAEFF, S.; LINK, J.; BATCHELOR, W.D. & CLAUPEIN, W.
Assessment of cereal nitrogen requirements derived by optical on-the-go sensors on
heterogeneous soils. *Agron. J.*, 98:682-690, 2006.

CAPÍTULO 2

SENSOR ÓPTICO NA FERTILIZAÇÃO NITROGENADA À DOSE VARIADA NO MILHO: II - ÍNDICES DE EFICIÊNCIA DA FERTILIZAÇÃO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE MILHO¹

RESUMO

Geralmente, em agroecossistemas tropicais e subtropicais, a eficiência da fertilização nitrogenada para culturas agrícolas anuais é baixa, o que promove variabilidade temporal na produtividade das culturas, perdas econômicas e impacto ambiental. A fertilização à dose variada de nitrogênio (DVN) com base em sensores de culturas por espectrometria óptica pode aumentar a eficiência de uso do nitrogênio (EUN). Este estudo teve como objetivo avaliar a produtividade do milho e a eficiência da DVN prescrita por um sensor óptico, em comparação com a fertilização à dose uniforme de nitrogênio (DUN). Com este propósito, três experimentos cultivados com milho sob sistema plantio direto foram conduzidos durante as safras agrícolas 2008/09 e 2010/11 sobre um Latossolo do Sul do Brasil. Os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizados, com cada área sendo analisada isoladamente. Os seguintes atributos foram avaliados: produção de matéria seca, acúmulo de N na biomassa no pleno florescimento do milho, produtividade de grãos de milho e índice de vegetação (IV) medido pelo sensor óptico N-Sensor[®] ALS. Independentemente da área local investigada, a fertilização nitrogenada incrementou a quantidade de N absorvido pelas plantas, resultando em incremento da produção de matéria seca e da produtividade de milho. Os menores incrementos na produtividade de milho foram observados na área 2, que apresentou déficit hídrico em estágio fenológico crítico. A DVN aumentou a eficiência de recuperação aparente de N (ERN) e a eficiência agrônômica do N (EAN) pelo milho. Nas áreas 1 e 3, que não foram interferidas pela restrição hídrica, verificaram-se aumentos de 28,0 e 41,3 % na EAN e ERN, respectivamente, promovido pela DVN, em relação à DUN. Apesar desses resultados, não foi verificado aumento de produtividade do milho pelo uso da DVN, em comparação com a DUN.

Palavras chave: Nitrogênio, N-Sensor, espectrometria óptica, agricultura de precisão.

⁽¹⁾Este capítulo foi elaborado de acordo com as normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo. O mesmo foi publicado na Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, n. 5, p.1299-1309, 2013.

ABSTRACT

OPTICAL CROP SENSOR FOR VARIABLE-RATE NITROGEN FERTILIZATION IN CORN: II - INDICES OF FERTILIZER EFFICIENCY AND CORN YIELD

Generally, in tropical and subtropical agroecosystems, the efficiency of nitrogen (N) fertilization is low, inducing a temporal variability of crop yield, economic losses, and environmental impacts. Variable-rate N fertilization (VRF) based on optical spectrometry crop sensors, could increase the N use efficiency (NUE). The objective of this study was to evaluate the corn grain yield and N fertilization efficiency under VRF determined by an optical sensor in comparison to the traditional single-application N fertilization (TSF). With this purpose, three experiments with no-tillage corn were carried out in the 2008/09 and 2010/11 growing seasons on a Hapludox in South Brazil, in a completely randomized design, at three different sites that were analyzed separately. The following crop properties were evaluated: aboveground dry matter production and quantity of N uptake at corn flowering, grain yield, and vegetation index determined by an N-Sensor[®] ALS optical sensor. Across the sites, the corn N fertilizer had a positive effect on corn N uptake, resulting in increased corn dry matter and grain yield. However, N fertilization induced lower increases of corn grain yield at site 2, where there was a severe drought during the growing period. The VRF defined by the optical crop sensor increased the apparent N recovery (NRE) and agronomic efficiency of N (NAE) compared to the traditional fertilizer strategy. In the average of sites 1 and 3, which were not affected by drought, VRF promoted an increase of 28.0 and 41.3 % in NAE and NRE, respectively. Despite these results, no increases in corn grain yield were observed by the use of VRF compared to TSF.

Index terms: Nitrogen, N-Sensor, optical spectrometry, precision farming.

INTRODUÇÃO

A produtividade de grãos de milho média do Brasil é próxima a $4,2 \text{ Mg ha}^{-1}$, muito aquém dos 10 a 15 Mg ha^{-1} registrado nas lavouras sem uso de irrigação pelos produtores que utilizam elevada tecnologia nos principais agroecossistemas brasileiros (Glat, 2010). De acordo com projeções, a demanda nacional de milho para a alimentação animal irá aumentar 37 % no período de 2005-2015 (Brasil, 2007). Para atender a essa demanda, a produtividade de grãos de milho deve aumentar em 3,4 % ao ano no mesmo período.

A produtividade do milho é altamente dependente da qualidade do manejo da cultura, especialmente da fertilização nitrogenada. No entanto, mundialmente, a eficiência da fertilização nitrogenada é baixa (33 %) (Raun & Johnson, 1999). Esta situação é agravada em agroecossistemas tropicais e subtropicais, onde as perdas de N podem variar entre 18 a 78 % da quantidade de N aportada pela fertilização mineral (Lara Cabezas et al., 1997a; Fontoura & Bayer 2010; Rojas et al., 2012).

As principais causas para a baixa eficiência da fertilização nitrogenada no milho são: elevadas perdas por volatilização de N-NH_3 (Lara Cabezas et al., 1997b; Cantarella et al., 2008), lixiviação de N-NO_3^- (Sangoi et al., 2003; Ceretta et al., 2005), a falta de sincronia entre a demanda das culturas e a disponibilidade de N (Amado et al., 2002; Aita & Giacomini, 2008), a variabilidade interanual na resposta da cultura à fertilização nitrogenada (Fiorin et al., 2007; Ciampitti & Garcia, 2008), e variabilidade espacial da matéria orgânica do solo (MOS) e potencial de mineralização (Solie et al., 1999; Shahandeh et al., 2005; Gregoret et al., 2006; Casa et al., 2011; Portz et al., 2012). Todos esses fatores podem influenciar na fertilização nitrogenada, tornando o aumento na eficiência do uso de fertilizantes um desafio complexo.

A recomendação da fertilização nitrogenada para milho no Sul do Brasil é baseada nos seguintes parâmetros: o teor de matéria orgânica do solo (MOS), a cultura antecessora e a expectativa de rendimento, resultando na prescrição de uma dose uniforme de N (DUN) para a área de cultivo (Amado et al., 2002; CQFS-RS/SC, 2004). Porém, as condições climáticas podem afetar a disponibilidade de N no solo e o N disponibilizado pela cultura antecessora (Amado et al., 2002; Bragagnolo et al., 2013) e a eficiência de uso do N (EUN) pelo milho (Melchiori et al., 2005), resultando em temporais variabilidades na demanda de N pela cultura. Conseqüentemente, as culturas demandam ajustes da estratégia de fertilização nitrogenada durante o seu desenvolvimento (Melchiori et al., 2005; Singh et al., 2006).

O uso da dose variada de N (DVN) é baseado na variabilidade espacial do estado nutricional das culturas na área. Normalmente, há uma diminuição na dose de fertilizante nitrogenado nos locais onde as plantas já estão bem nutridas e, por outro lado, as doses de N são aumentadas onde as plantas estão subnutridas. Assim, a eficiência de fertilizantes nitrogenados pode ser aumentada (Raun et al., 2005; Singh et al., 2006; Li et al., 2010), promovendo aumento do retorno econômico e reduzindo o impacto ambiental (Gregoret et al., 2006). Quando as doses de N excederem a demanda das plantas, elas podem aumentar os teores de N-NO_3^- e, portanto, aumentar o risco de perdas de N por desnitrificação (Fernandes & Libardi, 2007; Escobar et al., 2010) ou lixiviação (Sangoi et al., 2003; Ceretta et al., 2005; Fernandes & Libardi, 2007).

Desta forma, o uso de sensores de cultura em tempo real, pelo qual o estado nutricional da planta pode ser estimado indiretamente, representa uma inovação na fertilização nitrogenada (Argenta et al., 2003; Raun et al., 2005; Berntsen et al., 2006; Portz et al., 2012). Entre os sensores ópticos disponíveis comercialmente, o N-Sensor[®] ALS (Yara International ASA) tem sido utilizado com sucesso em diferentes culturas (Jasper et al., 2009; Portz et al., 2012; Bragagnolo et al., 2013).

Estudos anteriores que abordam a eficiência deste sensor óptico mostraram aumentos de produtividade de cereais variando de 3 a 13 % em relação à DUN, maior uniformidade da lavoura, redução do acamamento, aumento do rendimento operacional da colhedora e incremento do teor de proteína nos grãos e EUN (Singh et al., 2006). O aumento da EUN poderia promover a redução da dose de fertilizante nitrogenado em 14 % sem prejudicar a produção de grãos, sendo este um fator relevante do ponto de vista econômico e ambiental (Singh et al., 2006). Além de fertilização, este sensor óptico tem sido utilizado com outros objetivos, tais como promover o fornecimento de informações complementares aos mapas de produtividade das culturas e prescrições da dose variada de agroquímicos utilizados na proteção de plantas (Singh et al., 2006).

Pesquisas com fertilização nitrogenada em tempo real baseadas em sensores ópticos de culturas ainda são incipientes no Brasil. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da DVN prescrita por um sensor óptico, em comparação com a fertilização nitrogenada tradicional a dose uniforme de N (DUN) sobre produtividade de grãos de milho e EUN no Sul do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

Os tratamentos, delineamento experimental, localização dos experimentos, e características climáticas e de solo foram previamente descritos no capítulo 1.

Produtividade de grãos de milho

A determinação da produtividade do milho foi realizada através da coleta manual de espigas em dois metros lineares de duas fileiras próximas aos pontos de amostragem georreferenciados, onde as propriedades vegetativas de plantas foram avaliadas (Capítulo 1). Amostras de produtividades de grãos foram coletados em nove pontos georreferenciados por tratamento (distanciados de 40 metros entre si por parcela) na área 1, enquanto que na área 2, as amostras foram coletadas em 12 pontos georreferenciados por parcela (distância de 20 m entre si), e na área 3, as amostras foram coletadas em sete pontos georreferenciados por parcela (distância de 40 m entre si). Os resultados foram ajustados para um teor de umidade de grãos de 13 %.

Índices de eficiência do uso do nitrogênio

A eficiência de uso do N foi calculada por diferentes índices de eficiência sugeridos por Dobermann (2005):

$$PPF = P_N / D_N \quad (1)$$

Onde: PPF = produtividade parcial do fator (kg de grão por kg de N aplicado); P_N = produtividade do tratamento com N fertilizante (kg ha⁻¹ de grão); D_N = dose de N fertilizante (kg ha⁻¹ de N).

$$EAN = P_N - P_T / D_N \quad (2)$$

Onde: EAN = eficiência agrônômica do N (kg de grão por kg de N aplicado); P_N = produtividade do tratamento com N fertilizante (kg ha⁻¹ de grão); P_T = produtividade da testemunha (sem fertilização) (kg ha⁻¹ de grão); D_N = dose de N fertilizante (kg ha⁻¹ de N).

Para o site 1, onde o tratamento testemunha havia recebido fertilização inicial de N (27 kg ha⁻¹ de N), este valor foi descontado da dose de fertilizante nitrogenado total (D_N) na equação.

$$ERN = N_N - N_T / D_N \quad (3)$$

Onde: ERN = eficiência de recuperação aparente do N aplicado (kg de N absorvido por kg de N aplicado); N_N = quantidade de N absorvido no tratamento com N fertilizante (kg ha⁻¹); N_T = quantidade de N absorvido na testemunha (sem fertilização nitrogenada) (kg ha⁻¹); D_N = dose de N fertilizante (kg ha⁻¹ de N).

Para o site 1, onde o tratamento testemunha havia recebido fertilização inicial de N (27 kg ha⁻¹ de N), este valor foi descontado da dose de fertilizante nitrogenado total (D_N) na equação.

$$EPN = P_N - P_T / N_N - N_T \quad (4)$$

Onde: EPN = eficiência fisiológica de produção do N absorvido (kg de grão por kg de N absorvido); P_N = produtividade do tratamento com N fertilizante (kg ha⁻¹ de grão); P_T = produtividade da testemunha (sem fertilização nitrogenada) (kg ha⁻¹ de grão); N_N = quantidade de N absorvido no tratamento com N fertilizante (kg ha⁻¹); N_T = quantidade de N absorvido na testemunha (sem fertilização nitrogenada) (kg ha⁻¹).

A máxima eficiência técnica (MET) da fertilização nitrogenada foi avaliada através do ajuste de funções matemáticas entre as doses de N aplicadas e da produtividade de grãos em cada área. A máxima eficiência econômica (MEE) foi avaliada com base em 90 % do MET (Amado & Mielniczuk, 2000).

Os resultados foram submetidos à análise de variância e análise estatística descritiva. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey (p<0,05), seguido por análise de regressão polinomial usando o software de análise estatística SISVAR 4.0 (Ferreira, 2000). O coeficiente de variação (CV) do índice de vegetação do sensor óptico (IV) foi classificado como baixo (<12 %), médio (12 a 62 %), ou alto (>62 %), como proposto por Warrick & Nielsen (1980).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Índice de vegetação e dose variada de fertilizante nitrogenado estimado pelo sensor óptico de culturas em tempo real

O elevado número de leituras de IV fornecidas pelo sensor óptico reforça o potencial deste equipamento para a prescrição da DVN, promovendo a informação do estado nutricional das culturas em tempo real com alta resolução espacial, sem a necessidade de amostragem de plantas e análises laboratoriais (Tabela 1). As medições de IV abrangeram cerca de 40, 30, e 33 % da área total cultivada com milho dos experimentos nos locais 1, 2, e 3, respectivamente.

Tabela 1. Características da fertilização à dose variada de nitrogênio com base no sensor óptico avaliadas no estágio fenológico V8 do milho

Características experimentais	Local		
	Área 1	Área 2	Área 3
Largura de faixas (m)	15,0	20,0	18,0
Comprimento da faixa (m)	380,0	260,0	300,0
Velocidade (km h ⁻¹)	5,0	5,0	5,0
Nº médio de observações ha ⁻¹	254	310	297
Área amostrada (%)	40,0	30,0	33,0

A ocorrência de variabilidade espacial na área cultivada dos atributos de planta é um pré-requisito para o sucesso das técnicas de agricultura de precisão (Saraiva et al., 2006; Povh & Gimenez, 2011). Assim, quando a variabilidade espacial dos atributos de planta é elevada, a probabilidade de sucesso com a estratégia de DVN é maior. A variabilidade espacial do IV do milho no estágio fenológico V8 para as três áreas é apresentado na figura 1. Os valores de IV na área 1 foram cerca de 50 % inferiores do que nos outros locais (Tabela 2). Anteriormente, Tremblay et al. (2009) e Soderstrom et al. (2010) também relataram diferentes valores de IV para o mesmo estágio fenológico do milho, de acordo com o local e época de cultivo.

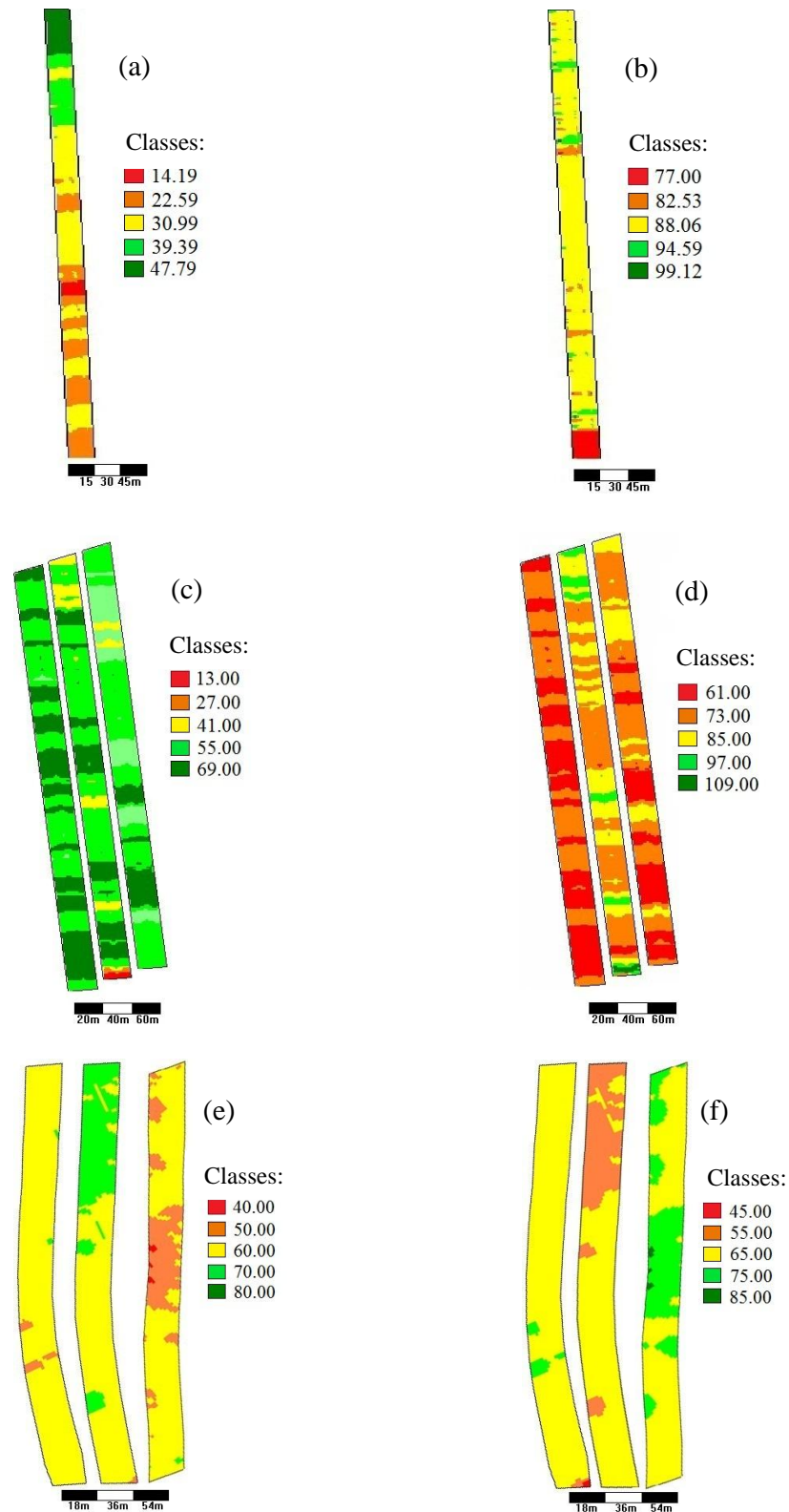


Figura 1. Índice de vegetação determinado com o sensor óptico no estágio fenológico V8 do milho para as áreas 1 (a), 2 (c) e 3 (e) e dose variada de nitrogênio prescrita para as áreas 1 (b), 2 (d) e 3 (f).

Tabela 2. Parâmetros estatísticos da fertilização à dose variada de nitrogênio com base no sensor óptico avaliados no estágio fenológico V8 do milho

Parâmetros estatísticos	Local					
	Área 1		Área 2		Área 3	
	IV	DVN kg ha ⁻¹	IV	DVN kg ha ⁻¹	IV	DVN kg ha ⁻¹
Referência	35,5	91,0	69,2	80,0	64,7	70,0
Mínimo	27,9	77,0	45,0	61,9	42,4	24,9
Máximo	52,9	104,8	88,5	104,9	78,9	88,6
Média	35,5	89,9	69,2	79,4	64,7	70,7
Variância	58,9	21,9	70,3	85,9	24,5	23,6
DP	7,6	4,6	8,3	9,2	4,9	4,8
CV (%)	21,4	5,1	12,0	11,6	7,6	6,8

IV= índice de vegetação; DVN= dose variada de N prescrita pelo sensor óptico; DP= desvio padrão; CV= coeficiente de variação.

Em nosso estudo, o CV dos valores de IV variaram entre 7 e 21 % (Tabela 2), enquanto Tremblay et al. (2009) relataram CV para VI de 1 a 28 %. De acordo com a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980), o CV do IV nas áreas 1 e 2 foi classificado como médio, enquanto na área 3, o CV foi baixo. Assim, de acordo com o sensor óptico de culturas, as duas primeiras áreas apresentaram maior variabilidade espacial de IV pelo milho, expressa em termos de desvio padrão (DP) e valores de CV em relação à área 3 (Tabela 2). Estes resultados podem ser associados com as condições climáticas na área 3, que foram mais favoráveis para o desenvolvimento do milho, mineralização do N do solo e N acumulado pelas plantas, do que nas outras duas áreas (Capítulo 1).

Os menores IV foram encontrados na área 1 (Tabela 2), em que o volume de precipitação foi maior até o estágio V8 (63,3 % da precipitação total durante o ciclo da cultura do milho), seguido de dias com baixa luminosidade e temperatura baixa, o que provavelmente prejudicou a absorção de N pelo milho. Precipitações frequentes e intensas aumentam a lixiviação de N-NO₃⁻ (Sangoi et al., 2003; Ceretta et al., 2005) e, como consequência, reduzem a disponibilidade de N no solo para as plantas. As áreas 2 e 3 apresentaram valores médios mais elevados de IV (Tabela 2). Estes resultados são coerentes com o maior teor de MOS nas áreas 2 e 3 (3,8 %) em comparação com a área 1 (2,8 %) (Capítulo 1)

A amplitude das doses da fertilização nitrogenada prescrita pelo sensor óptico foi menor na área 1, onde a maior dose foi de 1,4 vezes maior do que o menor dose (Tabela 2). A maior amplitude entre as doses da fertilização nitrogenada nas áreas 2 e 3 indicou uma maior

redistribuição do fertilizante nitrogenado ao longo destas parcelas. A relação entre a maior dose para a menor dose nas áreas 2 e 3 foi de 1,7 e 3,6, respectivamente. Estes resultados podem ser explicados pela menor amplitude de IV (25,0) observada na área 1, em comparação com as áreas 2 (43,5) e 3 (36,5). Assim, 61 % das determinações de IV na área 1 variaram entre 22,6 e 30,6, sugerindo baixa variabilidade espacial de plantas (Figura 1). No entanto, na área 1, as plantas de milho produziram a menor quantidade de MS e N absorvido no estágio V8 entre as três áreas experimentais (Capítulo 1). Este resultado sugere que o estado nutricional das plantas de milho quanto ao N na área 1 foi homogeneamente pobre.

Com base no estado nutricional das culturas avaliadas pelo IV, o sensor óptico estima as doses prescritas de fertilizante nitrogenado. Para cada área, a média do IV foi usada como referência para fertilização nitrogenada. Somente os dados das áreas 2 e 3 são apresentados na Figura 2, devido a problemas de armazenamento de dados na área 1. Houve um ajuste linear entre IV e as doses de N prescritas pelo sensor, por conseguinte, para cada unidade de aumento na IV houve aproximadamente um 1 kg ha⁻¹ de diminuição na dose de N prescrita (Figura 2).

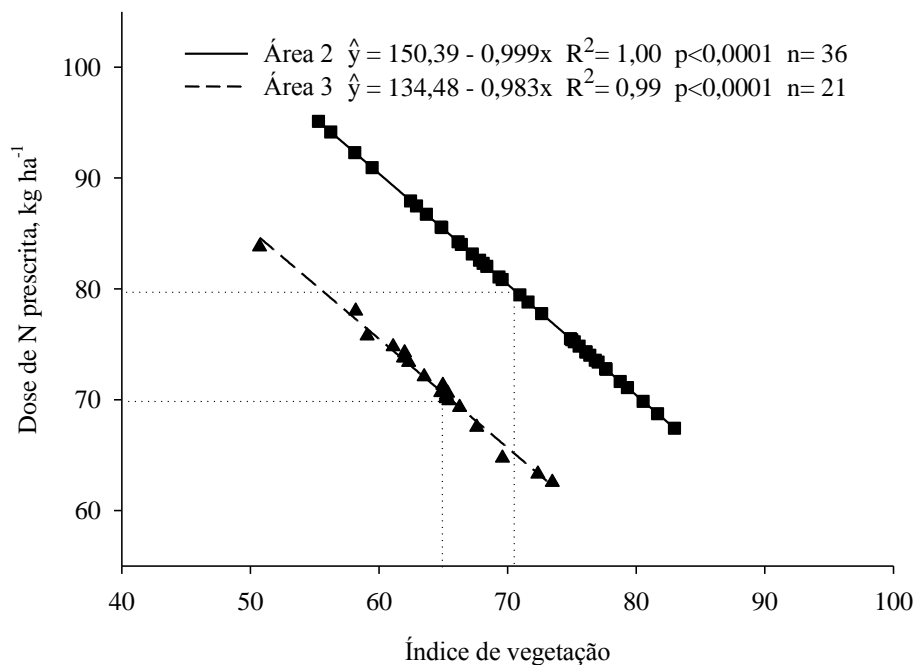


Figura 2. Dose de N prescrita pelo sensor óptico através do índice de vegetação do milho no estágio fenológico V8 para as áreas 2 e 3.

Doses de N prescritas pelo sensor óptico em tempo real

As doses de N prescritas pelo sensor óptico ao longo das parcelas com comprimentos que variam 260-380 m estão apresentados na figura 3. Neste estudo, a VRF foi utilizada apenas na segunda fertilização de cobertura (estádio fenológico V8). Para a área 1 (sem repetições), 70 % das doses de N prescrita pelo sensor óptico coincidiram com a dose de referência de N (91 kg ha^{-1}), enquanto 15,2 e 14,5 % das doses de N prescritas foram inferiores e superiores, respectivamente. Houve uma longa série contínua (entre 170 e 250 m), onde as doses de N aplicadas foram iguais à dose de referência (Figura 3a). Este fato foi devido a uma falta de recepção do sinal de satélite pelo GPS, quando o sensor óptico prescreveu automaticamente a dose de referência de forma uniforme (YARA, 2008).

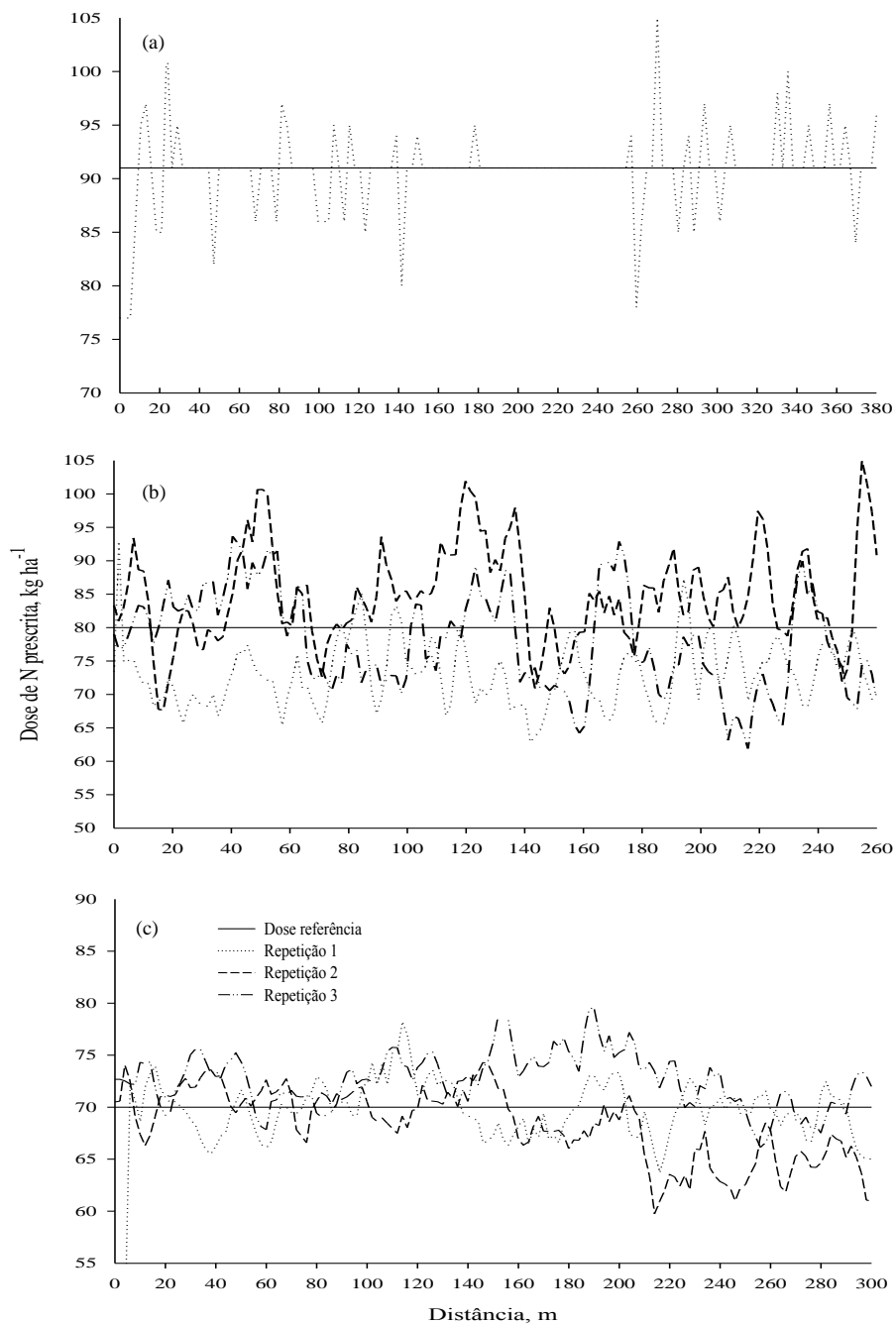


Figura 3. Fertilização nitrogenada à dose variada prescrita pelo sensor óptico e dose referência para (a) área 1 (91 kg ha^{-1}), (b) área 2 (80 kg ha^{-1}) e (c) área 3 (70 kg ha^{-1}).

Na área 2, as doses de N prescritas foram iguais a dose de referência em apenas 7,7 % das doses prescritas, enquanto 55,5 e 36,8 % do restante das doses prescritas estavam abaixo e acima da dose de referência, respectivamente. Sob estresse hídrico severo (Capítulo 1), a variabilidade espacial da DVN foi maior na área 2, provavelmente devido a diferenças no armazenamento de água no solo, uma vez que a absorção de N pelo milho é fortemente afetada pela disponibilidade de água para a planta (Amado et al., 2002). A prescrição das

doses de N na área 3 coincidiram em 9,7 %, com a taxa de referência de N, enquanto 36,9 e 53,4 % das doses prescritas tiveram taxas de fertilização N abaixo e acima da taxa de referência N, respectivamente.

Relações da fertilização nitrogenada com a nutrição de plantas e produtividade de grãos de milho

A análise dos dados nas três áreas experimentais mostrou correlação positiva entre a quantidade de N absorvido pelas plantas de milho no florescimento e a produção de MS ($R^2=0,76$, $p<0,0001$) e produtividade de grãos ($R^2=0,68$, $p<0,0001$) (Figura 4).

A absorção de N no florescimento do milho variou de 31,1 a 182,6 kg ha⁻¹ nos diferentes tratamentos e locais investigados, enquanto a produção de MS de milho variou de 5500 a 12200 kg ha⁻¹ e a produtividade variou de 5403 a 15564 kg ha⁻¹. A área 2 teve a menor absorção de N e produtividade de milho, devido às condições climáticas desfavoráveis (Capítulo 1). A área 3, que tinha as condições climáticas mais favoráveis, apresentou a quantidade de N absorvido e maior produtividade de milho das três áreas investigadas (Figura 4).

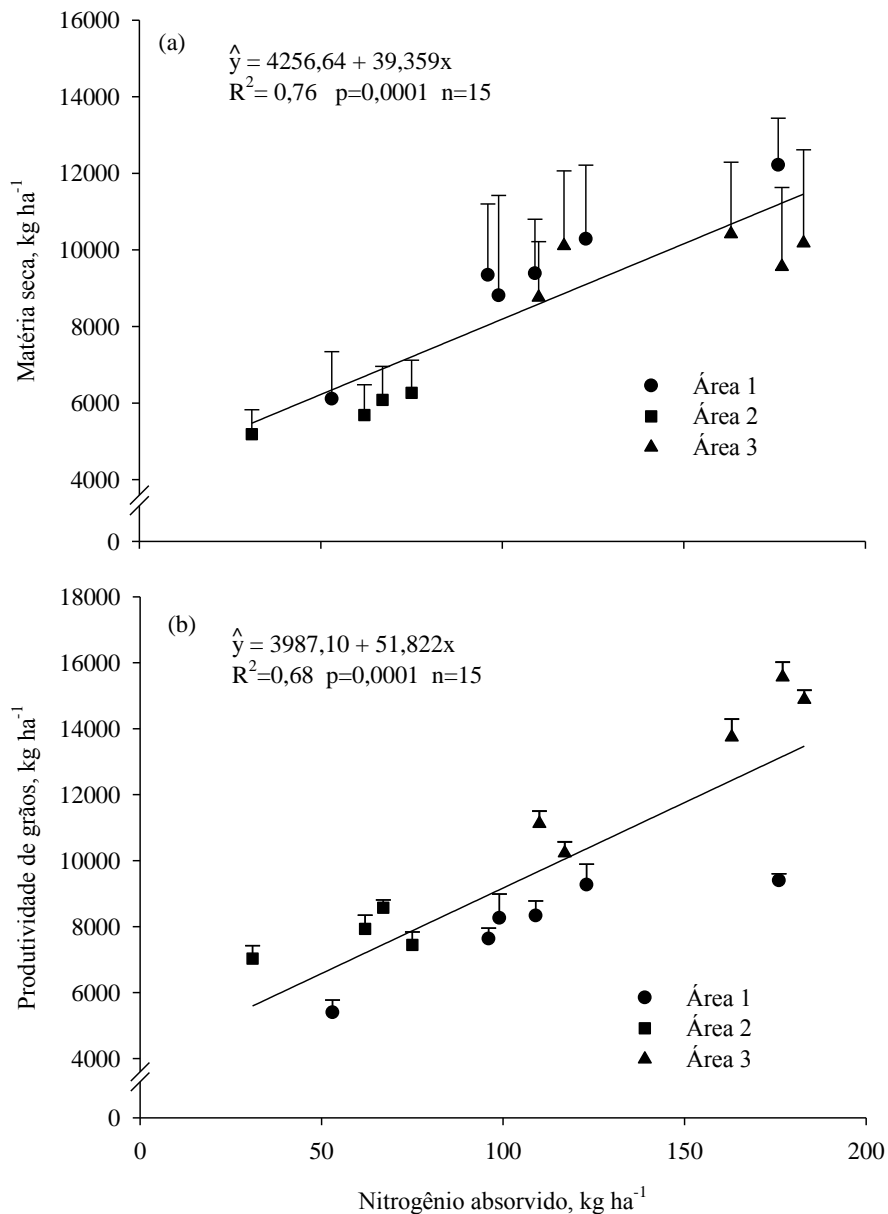


Figura 4. Relação entre N absorvido pelo milho no florescimento e matéria seca (a) e produtividade de grãos de milho (b) para as três áreas investigadas sob doses de fertilização nitrogenada.

As produtividades do milho nas áreas experimentais foram semelhantes às produtividades obtidas por agricultores que utilizam tecnologia avançada. A produtividade média de grãos para as áreas 1 e 2 (8053 e 7745 kg ha⁻¹, respectivamente) foi de 96 e 89 % maiores, respectivamente, do que a produtividade média de grãos no Sul do Brasil (4100 kg ha⁻¹) na safra 2008/09 (CONAB, 2009). Estes resultados foram obtidos a despeito de um grande volume de precipitação durante os estágios iniciais de desenvolvimento do milho (área 1) e uma restrição hídrica severa durante os estágios críticos de desenvolvimento de milho

(área 2). A produtividade média de grãos na área 3 (13110 kg ha^{-1}) foi cerca de três vezes maior do que a produtividade média (4114 kg ha^{-1}) na temporada de 2010/11 no Sul do Brasil (CONAB, 2011). Nesta área, a elevada produtividade pode ser atribuída à boa fertilidade do solo, precipitação adequada, luminosidade, e noites frescas durante o desenvolvimento do milho. Da mesma forma, outros agricultores, na mesma época e região, obtiveram produtividades médias superiores a 10000 kg ha^{-1} (Mânica, 2011).

A fertilização nitrogenada teve um efeito positivo sobre a produtividade do milho, apesar de variações entre os locais (Figura 5). As produtividades foram menores nos tratamentos testemunha (com fertilização limitada N ou sem fertilização de cobertura), onde as produtividades de grãos foram de 57, 65, e 82 % da maior produtividade registrada nas áreas 1, 3 e 2, respectivamente. As maiores produtividades obtidas nos experimentos foram 15564 kg ha^{-1} para 210 kg ha^{-1} de N na área 3, 9403 kg ha^{-1} para 160 kg ha^{-1} de N na área 1 e 8571 kg ha^{-1} para 140 kg ha^{-1} de N na área 2.

A resposta em produtividade de grãos de milho à fertilização nitrogenada teve padrões similares nas áreas 1 e 3, onde houve incremento linear da produtividade de grãos em resposta às doses N (Figura 5a). Assim, os tratamentos 150DVN e 140DVN (Capítulo 1) apresentaram incrementos de 3870 e 4656 kg ha^{-1} de produtividade de grãos em relação ao tratamento testemunha, nas áreas 1 e 3 respectivamente, ou $31,5$ e $33,3 \text{ kg kg}^{-1}$ de grãos de milho por N aplicado, respectivamente (Tabela 3). No entanto, a produtividade na área 1, apesar de ter uma dose de N elevada (140 kg ha^{-1} de N na DUN), foi de apenas 81 % da produtividade no tratamento testemunha na área 3.

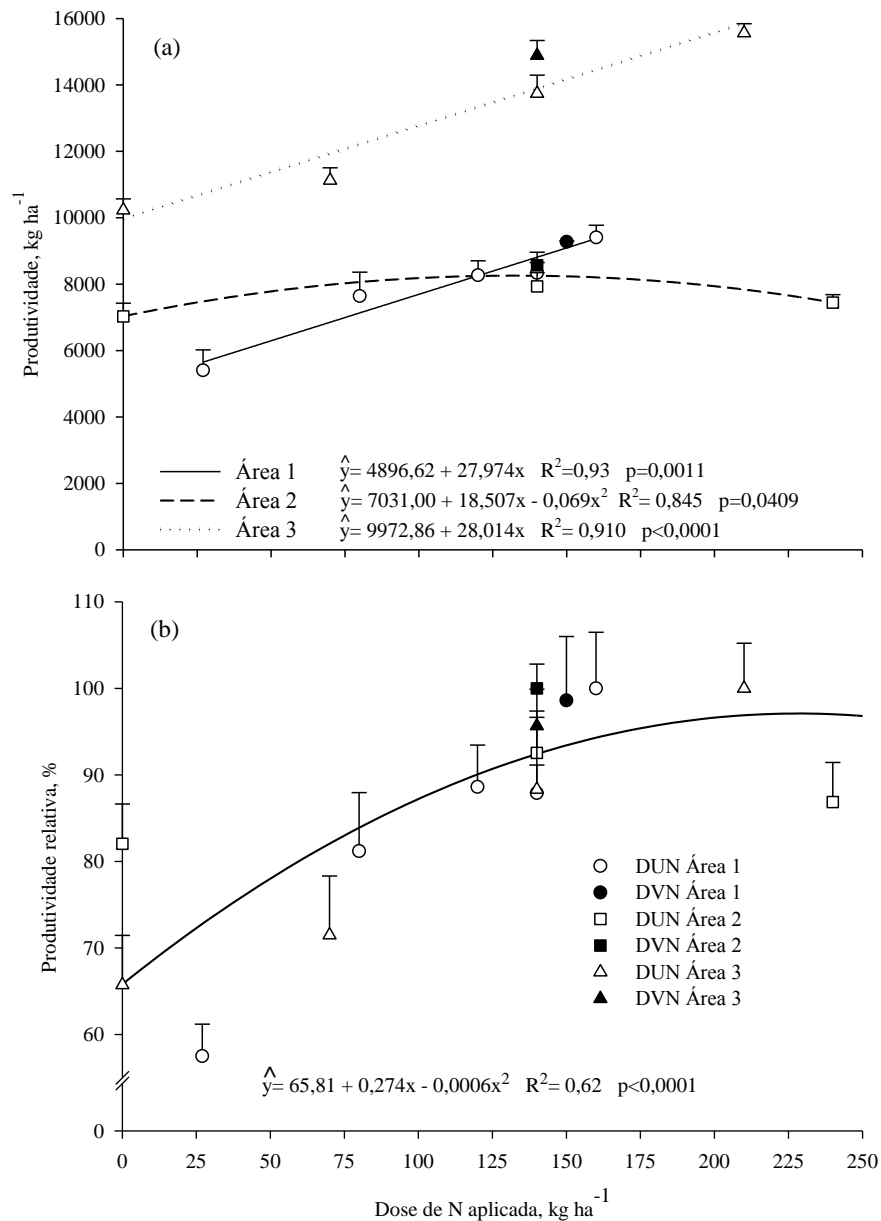


Figura 5. Relação entre as doses de fertilização nitrogenada e produtividade (a) e produtividade relativa (b) de milho para as três áreas investigadas.

O potencial de produtividade de grãos de milho é definido nos estádios iniciais de desenvolvimento (Cantarella et al., 1993; Fancelli & Dourado Neto, 1996). Assim, mesmo que a demanda de N pelo milho nas fases iniciais de crescimento seja reduzida (Gadioli et al., 2000), a disponibilidade de N elevada do solo nesse período ainda é necessária para obter altas produtividades de milho (Binder et al., 2000). A absorção de N pelo milho no estágio fenológico V8 na área 1 foi de apenas 40 % em relação a da área 3 (Capítulo 1). Este resultado pode ter limitado a produtividade de grãos de milho na área 1. Nesta área, o estado nutricional de plantas de milho foi recuperado mais tarde e chegou a 71 % do valor de

absorção de N no florescimento em relação à área 3. No entanto, a produtividade de grãos de milho na área 1 foi de apenas 61 % do que o verificado na área 3.

Para a área 2, o tratamento 140DVN teve um aumento de produtividade de grãos de milho de 1540 kg ha⁻¹ em relação ao tratamento testemunha, ou 11 kg de milho por 1 kg de N aplicado (Tabela 3). Este resultado deve ser analisado, tendo em conta que os estádios fenológicos de maior demanda hídrica são os períodos de antese milho e fase de grão leitoso. Durante estes estádios de desenvolvimento, a evapotranspiração (ETP) é elevada e pode variar de 5,3 a 6,6 mm dia⁻¹ (Matzenauer et al., 1995; Kang et al., 2003). No entanto, o suprimento de água após a antese nas áreas 1 e 2 estava perto de 4,7 mm e 0,3 mm dia⁻¹, respectivamente, indicando uma restrição hídrica severa na área 2. Já a área 3 teve uma quantidade adequada de água (6,3 mm dia⁻¹) no mesmo período.

A MET média das três áreas investigadas foi de 228 kg ha⁻¹ de N, enquanto a MEE foi de 125 kg ha⁻¹ de N (Figura 5b). Portanto, a dose de fertilizante nitrogenado selecionada para avaliar a DVN (140 kg ha⁻¹ de N) estava próxima a MEE. Por outro lado, nas áreas investigadas, a produtividade de grãos de milho foi ligeiramente superior nos tratamentos a DVN baseados no sensor óptico do que quando a fertilização a DUN com base na equação ajustada à DUN (Figura 5b). Este resultado sugere que DVN é uma estratégia eficaz para a obtenção de produtividades mais elevadas, com a mesma dose de fertilizante à DUN, embora estatisticamente não tenha havido diferença. Singh et al. (2006) relataram que a utilização de sensores ópticos permite a manutenção da produtividade de grãos, reduzindo a dose de fertilizante nitrogenado. Além disso, no nosso estudo, os tratamentos à DVN resultaram em produtividades de grãos semelhantes aos dos tratamentos que obtiveram as maiores produtividades em cada área (Figura 5a).

Com base nas equações ajustadas para produção de grãos em função da dose de fertilizante nitrogenado, a produtividade de milho de 9093 kg ha⁻¹ na área 1 foi estimada para uma dose de 150 kg ha⁻¹ de N a DUN (Figura 5a). Este cálculo permitiu a comparação da DUN com a DVN com a mesma dose de N, mostrando que a produtividade da DVN foi incrementada em 2 % (180 kg ha⁻¹). Os problemas técnicos relacionados com a perda de sinal de GPS acima mencionado, provavelmente, contribuíram para o menor aumento na produtividade do que o esperado. No entanto, na área 2, a mesma comparação demonstrou que DVN incrementou a produtividade de milho em 8,05 % (639 kg ha⁻¹) em relação à DUN. Este resultado foi obtido apesar das condições climáticas adversas registradas nesta área. O incremento na produtividade promovido pela DVN foi coerente com a maior redistribuição das doses de fertilizante nitrogenado nesta área (Figura 3). Na área 3, foram observados com a

DVN incrementos na produtividade de milho de 8,32 % (1144 kg ha⁻¹), em relação à DUN. Em média, nas três áreas investigadas, a DVN baseada no sensor óptico incrementou a produtividade em 6,12 % (654 kg ha⁻¹) em relação à DUN, no entanto, esta diferença não foi estatisticamente significativa (Tabela 3).

Anteriormente, comparações da DVN com DUN apresentaram aumentos de produtividade de grãos de trigo, de 0,8 a 1,7 % e aumento no conteúdo de proteína de 2,4 a 5,1 % (Jørgensen & Jørgensen, 2001, 2007; Mayfield & Trengove, 2009). Raun et al. (2005) também observaram ligeiros aumentos no rendimento de grãos de milho usando outro sensor óptico (GreenSeeker[®]) em relação à DUN, mas sem diferença estatística.

Índices de eficiência do uso de N sob diferentes estratégias de fertilizantes

A eficiência de uso do N pelo milho (EUN) pode ser avaliada por vários índices, como por exemplo, a produtividade parcial do fator (PPF), eficiência agrônômica do N (EAN), eficiência de recuperação aparente do N (ERN) e eficiência fisiológica de produção do N (EPN) (Dobermann, 2005). Estes índices são apresentados na tabela 3. A PPF média para as áreas 1 e 3 foi maior do que 70 kg kg⁻¹. Este valor foi sugerido por Dobermann (2005) como valor crítico para os sistemas agrícolas com boa eficiência de manejo do N. As DVN mostraram um aumento na PPF de 5,0, 7,0, e 8,2 % nas áreas 1, 2 e 3, respectivamente, em relação ao método tradicional à DUN.

Tabela 3. Eficiência de uso do nitrogênio em função da dose de fertilizante nitrogenado e estratégias de fertilização nas três áreas investigadas

Local / Tratamento	Atributos de planta		Índices de eficiência de uso do N			
	Produtividade	N Absorvido ⁽¹⁾	PPF	EAN	ERN	EPN
	-----kg ha ⁻¹ -----		-----kg kg ⁻¹ -----			
Área 1						
27DUN	5403 d	53 c	200	-	-	-
80DUN	7639 c	96 c	95	42	0,82	51
120DUN	8336 bc	109 b	69	31	0,60	52
140DUN	8265 bc	99 b	59	25	0,41	62
150DVN	9273 ab	123 b	62	31	0,57	55
160DUN	9403 a	176 a	58	30	0,92	32
Média	8053	109	71	32	0,66	50
Área 2						
T	7031c	31 c	-	-	-	-
140DUN	7932 ab	62 b	57	6	0,22	13
140DVN	8571 a	67 b	61	11	0,25	43
240DUN	7445 bc	75 a	31	2	0,21	20
Média	7745	57	60	6	0,23	25
Área 3						
T	10231 c	117 c	-	-	-	-
70DUN	11125 c	110 c	159	*	*	*
140DUN	13743 b	163 b	98	25	0,32	71
140DVN	14887 ab	183 a	106	33	0,46	76
210DUN	15564 a	177 ab	74	25	0,42	88
Média	13110	153	117	24	0,27	59

⁽¹⁾N absorvido no florescimento; DUN= dose uniforme de N; DVN= dose variada de N prescrita pelo sensor óptico; T= testemunha; PPF = produtividade parcial do fator; EAN= eficiência agrônômica do N; ERN= eficiência de recuperação aparente do N aplicado; EPN= eficiência fisiológica de produção do N absorvido; *= Dado inconsistente.

Os tratamentos com DVN obtiveram EAN 24,0 e 32,0 % maiores do que os tratamentos com DUN nas áreas 1 e 3, respectivamente. A área 2 apresentou um incremento de 8,3 % com uso da DVN. Um estudo anterior, com fertilização nitrogenada em milho com 140 kg⁻¹ de N obteve valores de EAN variando de 16 a 26 kg kg⁻¹ (Melchiori et al., 2005). Segundo Dobermann (2005), os valores EAN geralmente variam de 10 a 30 kg kg⁻¹, e valores acima de 30 kg kg⁻¹ representam sistemas agrícolas bem manejados. Assim, a DVN promoveu

valores de EAN de 31 e 33 kg kg⁻¹ nas áreas 1 e 3, respectivamente, indicando características de um manejo eficiente da fertilização nitrogenada.

Os valores geralmente esperados de ERN estão entre 0,3 e 0,5 kg kg⁻¹, e em sistemas com fertilização nitrogenada bem manejadas entre 0,5 e 0,8 kg kg⁻¹ (Dobermann, 2005). A ERN média na área 1 foi de 0,66 kg kg⁻¹, indicando uma boa eficiência da fertilização nitrogenada, enquanto que na área 3, obteve-se um valor intermediário (0,44 kg kg⁻¹) e, na área 2, um valor baixo (0,23 kg kg⁻¹). A elevada ERN na área 1, provavelmente, foi associada a baixa produção de MS da parte aérea e da absorção de N até o estágio fenológico V8 do milho (Capítulo 1), o que aumenta a probabilidade de resposta ao N em cobertura. Na área 1, a DVN aumentou a ERN em 39,0 % em relação à DUN. Na área 3, a DVN aumentou a ERN em 43,7 % em relação à DUN.

Para o índice de EPN, são geralmente relatados valores entre 30 e 60 kg kg⁻¹, no entanto, em sistemas de fertilização nitrogenada bem manejados, os valores devem ser maiores do que 60 kg kg⁻¹ (Dobermann, 2005). Os tratamentos 140DUN na área 1 e os tratamentos 140DUN, 140DVN, e 210DUN na área 3 foram classificados como sistemas bem manejados de acordo com os valores propostos por Doberman (2005).

O uso do sensor óptico para a prescrição da fertilização nitrogenada em tempo real foi uma técnica promissora no que diz respeito à produtividade de grãos de milho e EUN, especialmente quando as condições climáticas foram favoráveis ao desenvolvimento das plantas. Pesquisas futuras devem avaliar áreas maiores do que as investigadas neste estudo, garantindo maior variabilidade espacial. A combinação de sensor óptico em tempo real com novas fontes de fertilizante nitrogenado, que permitam a redução de perdas de N, também deve ser investigada como estratégias complementares para melhorar a EUN.

CONCLUSÕES

1. Em todas as áreas investigadas, o N absorvido pelo milho, a produção de matéria seca e a produtividade de grãos aumentaram em resposta à fertilização nitrogenada. No entanto, os menores aumentos de produtividade de grãos de milho associado à fertilização nitrogenada foram observados na área 2, devido à forte estiagem verificada durante o período de cultivo do milho.

2. A eficiência de uso de N avaliada por diferentes índices mostrou uma melhora com o uso da dose variada de N baseada no sensor óptico de culturas em relação à fertilização à dose uniforme tradicionalmente utilizada pelos agricultores.

3. A fertilização à dose variada de N melhorou o estado nutricional de plantas de milho (N absorvido) na área 3, mas o aumento na produtividade de grãos de milho em relação à fertilização a dose uniforme de N não foi estatisticamente significativo.

LITERATURA CITADA

- AITA, C. & GIACOMINI, S.J. Nitrato no solo com a aplicação de dejetos líquidos de suínos no milho em plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 32:195-205, 2008.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J. Leguminosas e adubação mineral como fontes de nitrogênio para o milho em sistemas de preparo do solo. R. Bras. Ci. Solo, 24:179-189, 2000.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUCK, J. & AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob Sistema de Plantio Direto. R. Bras. Ci. Solo, 26:241-248, 2002.
- ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; FOSTHOFER, E.L.; STRIEDER, M.L.; SUHRE, E. & TEICHMANN, L.L. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. R. Bras. Ci. Solo, 27:109-119, 2003.
- BERNTSEN, J.; THOMSEN, A.; SCHELDE, K.; HANSEN, O.M.; KNUDSEN, K.; BROGE, N.; HOUGAARD, H. & HØRFARTER, R. Algorithms for sensor-based redistribution of nitrogen fertilizer in winter wheat. Prec. Agric., 7:65-83, 2006.
- BINDER, D.L.; SANDER, D.H. & WALTERS, D.T. Maize response to time of Nitrogen application as affected by level of Nitrogen deficiency. Agron. J., 92:1228-1236, 2000.
- BRAGAGNOLO, J; AMADO, T.J.C.; NICOLOSO, R.S.; JASPER, J.; KUNZ, J. & TEIXEIRA, T.G. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: I. Plant nutrition and dry matter production. R. Bras. Ci. Solo, 37:1288-1298, 2013.
- CANTARELLA, H. Calagem e adubação de milho. In: BÜL, L.T. & CANTARELLA, H., eds. Cultura do milho: Fatores que afetam a produtividade. Piracicaba, Potafos, 1993. p.147-198.
- CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; CONTIN, T.L.M.; DIAS, F.L.F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R.B. & QUAGGIO, J.A. Ammonia volatilization from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. Sci. Agric., 65:397-401, 2008.

- CASA, R.; CAVALIERI, A. & LOCASCIO, B. Nitrogen fertilization management in precision agriculture: a preliminary application example on maize. *Ital. J. Agron.*, 6:23-27, 2011.
- CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; VIEIRA, F.C.B.; HERBES, M.G.; MOREIRA, I.C.L. & BERWANGER, A.L. Dejeito líquido de suínos: I. Perdas de nitrogênio e fósforo na solução escoada na superfície do solo, sob plantio direto. *Ci. Rural*, 35:1296-1304, 2005.
- CIAMPITTI, I.A. & GARCÍA, F.O. Balance y eficiencia de uso de los nutrientes en sistemas agrícolas. *R. Horiz. A.*, 18:22-28, 2008.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFSRS/SC. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 3.ed. Passo Fundo, SBCS - Núcleo Região Sul/UFRGS, 2004. 400p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2008/2009. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 10 jun. 2009.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2010/2011. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 15 ago. 2011.
- DOBERMANN, A. Nitrogen use efficiency – State of the art. In.: IFA INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, Frankfurt, 2005. p.28-30.
- ESCOBAR, L.F.; AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; CHAVEZ, L.F.; ZANATTA, J.A. & FIORIN, J.E. Postharvest nitrous oxide emissions from a subtropical Oxisol as influenced by summer crop residues and their management. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:507-516, 2010.
- FANCELLI, A.L. & DOURADO NETO, D. Milho: Fisiologia da produção. In: SEMINÁRIO SOBRE FISIOLOGIA DA PRODUÇÃO E MANEJO DE ÁGUA E DE NUTRIENTES NA CULTURA DO MILHO DE ALTA PRODUTIVIDADE. Piracicaba, ESALQ/USP-POTAFÓS, 1996. p.1-29.
- FERNANDES, F.C.S. & LIBARDI, P.L. Percentagem de recuperação de nitrogênio pelo milho, para diferentes doses e parcelamentos do fertilizante nitrogenado. *R. Bras. Milho Sorgo*, 6:285-296, 2007.
- FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., São Carlos, 2000. Anais... São Carlos, UFSCar, 2000. p.255-258.
- FIORIN, J.E. Recomendação de adubação. 51-98. In.: FIORIN, J.E. ed. Manejo e fertilidade do solo em sistema plantio direto. Passo Fundo, Berthier, 2007. 184p.

- FONTOURA, S.M.V. & BAYER, C. Ammonia volatilization in no-till system in the South-Central region of the State of Paraná, Brazil. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:1677-1684, 2010.
- GADIOLI, J.L.; DOURADO-NETO, D.; GARCÍA, A.G. & BASANTA, M.D.V. Temperatura do ar, rendimento de grãos de milho e caracterização fenológica associada à soma calórica. *Sci. Agric.*, 57:377-383, 2000.
- GLAT, D. A dimensão do milho no mundo. Disponível em: <<http://www.agranja.com/index/revistas/agranja/edicao/738/materia/2842>>. Acesso em: 30 jun. 2010.
- GREGORET, M.C.; DARDANELLI, J.; BONGIOVANNI, R. & DIAZ-ZORITA, M. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un haplusol. *Ci. Suelo*, 24:147-159, 2006.
- JASPER, J.; REUSCH, S. & LINK, A. Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination—impact of seed rate, variety and growth stage. In: van HENTEN, E.; GOENSE, J.D. & LOKHORST, C., ed. EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 7., Wageningen, 2009. Proceedings... Wageningen, Academic Publishers, 2009. p.23-30.
- JØRGENSEN, J.R. & JØRGENSEN, R.N. Uniformity of wheat yield and quality using sensor assisted application of nitrogen. *Prec. Agric.*, 8:63-73, 2007.
- JØRGENSEN, J.R. & JØRGENSEN, R.N. Impact on grain quality parameters when nitrogen is ‘sensor applied’ by the ‘Hydro Precise System’. “Precise system”. In: GRENIER, G.S. & BLACKMORE, S., ed. EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE. 3., Montpellier, 2001. Proceedings... Montpellier, 2001. p.929-934.
- KANG, S.; GU, B.; DU, T. & ZANG, J. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. *Agric. Water Manag.*, 59:239-254, 2003.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNDORFER, G.H. & MOTTA, S.A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: I. Efeito da irrigação e substituição parcial da uréia por sulfato de amônio. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:481-487, 1997b.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNDORFER, G.H. & MOTTA, S.A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: II. Avaliação de fontes sólidas e fluídas em sistema de plantio direto e convencional. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:489-496, 1997a.
- LI, Y.; CHEN, D.; WALKER, C.N. & ANGUS, J.F. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. *Field Crops Res.*, 118:221-227, 2010.
- MÂNICA, N. Disponível em: <<http://mediacenter.clicrbs.com.br/canal-rural-player/99/player/209409/mercado-e-cia-14-09-2011-gauchos-tecnificam-lavouras-e-conseguem-aumentar-a-produtividade-das-safras-/1/index.htm>>. Acessado em: 20 Out. 2011.

- MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A. & RIBOLDI, J. Modelos agrometeorológicos para a estimativa do rendimento do milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesq. Agrop. Gaúcha*, 1:225-241, 1995.
- MAYFIELD, A.H. & TRENGOVE, S.P. Grain and protein responses in wheat using the N-Sensor for variable rate application. *Crop Past. Sci.*, 60:818-823, 2009.
- MELCHIORI, R.; CAVIGLIA, O.; BIANCHINI, A.; FACCENDINI, N. & RAUN, W. Avances en la utilización de sensores remotos para manejo de nitrógeno de maíz. In: NATIONAL CONGRESSO OF AAPRESID, 14., Rosário, 2005. *Proceedings...* Rosário, 2005. p.155-160.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Cadeia produtiva do milho/Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Política Agrícola, Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura. Brasília, IICA,MAPA/SPA, 2007. 108p.
- PORTZ, G.; MOLIN, J.P. & JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. *Prec. Agric.*, 13:33-44, 2012.
- POVH, F.P. & GIMENEZ, L.M. Aplicação de fertilizantes e corretivos em taxa variável. In: FONSECA, A.F.; CAIRES, E.F & BARTH, G., ed. *Fertilidade do solo e nutrição de plantas no sistema plantio direto*. Ponta Grossa, 2011. p.217-247.
- RAUN, W.R. & JOHNSON, G.V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.*, 91:357-362, 1999.
- RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; MARTIN, K.L.; FREEMAN, K.W.; MULLEN, R.W.; ZHANG, H.; SHEPERS, J.S. & JOHNSON, G.V. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 36:2759-2781, 2005.
- ROJAS, C.A.L.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; WEBER, M.A. & VIEIRO, F. Volatilização de amônia da uréia alterada por sistemas de preparo de solo e plantas de cobertura invernais no Centro-Sul do Paraná. *R. Bras. Ci. Solo*, 36:261-270, 2012.
- SANGOI, L.; ERNANI, P.R.; LECH, V.A. & RAMPAZZO, C. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da uréia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. *Ci. Rural*, 33:65-70, 2003.
- SARAIVA, A.M.; CUGNASCA, C.E. & HIRAKAWA, A.R. Aplicação em taxa variável de fertilizantes e sementes. In: BORÉM, A.; GIÚDICE, M.P.; QUEIROZ, D.M.; MANTOVANI, E.C.; FERREIRA, L.R.; VALLE, F.X.R. & GOMIDE, R.L., eds. *Agricultura de precisão*. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2006. p.109-145.
- SHAHANDEH, H.; WRIGHT, A.L.; HONS, F.M. & LASCANO, R.J. Spatial and temporal variation of soil nitrogen parameters related to soil texture and corn yield. *Agron. J.*, 97:772-782, 2005.

- SINGH, I.; SRIVASTAVA, I.A.; CHANDNA, P. & GUPTA, R. Crop sensors for efficient nitrogen management in sugarcane: Potential and constraints. *Sugar Technol.*, 8:299-302, 2006.
- SODERSTROM, M.; BORJESSON, T.; PETTERSSON, C.G.; NISSEN, K. & HAGNER, O. Prediction of protein content in malting barley using proximal and remote sensing. *Prec. Agric.*, 11:587-599, 2010.
- SOLIE, J.B.; RAUN, W.R. & STONE, M.L. Submeter spatial variability of selected soil and bermudagrass production variables. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:1724-1733, 1999.
- TREMBLAY, N.; WANG, Z.; MA, B.L.; BELEC, C. & VIGNEAULT, P. A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. *Prec. Agric.*, 10:145-161, 2009.
- WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. *Applications of soil physics*. New York, Academic Press, 1980. p.319-344.
- YARA. Operation manual for the Yara N-Sensor. Software release 3.00. Duermen, Research Center Hanninghof, 2008. 55p.

CAPÍTULO 3

EFICIÊNCIA DE USO DO NITROGÊNIO APLICADO À DOSE VARIADA PRESCRITA POR SENSOR ÓPTICO NA CULTURA DO MILHO¹

RESUMO

A eficiência da fertilização nitrogenada no milho (*Zea mays* L.) geralmente é baixa, impactando negativamente a nutrição de plantas, o retorno econômico e o meio ambiente. A dose variada de nitrogênio (DVN), prescrita por sensores de cultura, tem sido proposta em substituição a dose uniforme (DUN). Porém, na agricultura brasileira, ainda são escassos os trabalhos sobre a eficiência desta estratégia. Este estudo testou a hipótese de que a DVN, baseada no N-Sensor[®] ALS, aumenta a eficiência de uso do N (EUN) e a produtividade de grãos em relação à DUN. O experimento foi conduzido em faixas (36 x 300 m) distribuídas em delineamento de blocos casualizados com três repetições, nas quais se avaliou os seguintes tratamentos: 0, 70, 140 e 210 kg ha⁻¹ a DUN e 140 kg ha⁻¹ a DVN. A fonte de N foi a ureia aplicada a lanço com um distribuidor de fertilizantes acoplado ao sensor óptico de culturas. O solo é um Latossolo Vermelho e o clima subtropical (Cfa) com precipitação anual de 1700 mm e temperatura média de 19,5 °C. As determinações do sensor óptico de cultura correlacionaram-se com a produção de matéria seca ($R^2=0,91$; $p<0,0001$) e a quantidade de N absorvido ($R^2=0,87$; $p<0,0001$). A produtividade de grãos variou de 10,2 a 15,5 Mg ha⁻¹, com resposta linear as doses de N. A DVN incrementou em 11,8 e 32,6 % a quantidade de N absorvido e a EAN, respectivamente, em comparação à DUN. Porém, o incremento na produtividade não foi significativo, sugerindo que, neste estudo, o principal efeito da DVN foi a redução do risco de impacto ambiental.

Palavras chave: Manejo sítio-específico, sensor óptico de cultura, agricultura de precisão, fertilidade do solo.

⁽¹⁾Este capítulo foi elaborado de acordo com as normas do Periódico Agronomy Journal. O mesmo foi submetido para apreciação no Agronomy Journal em 27 Dez. 2013 e aguarda designação. (Submission Number: AJ-13-0596-A).

Nitrogen use efficiency of variable rate prescribed by optical sensor in corn

ABSTRACT

The nitrogen (N) fertilizer use efficiency in corn (*Zea mays* L.) is usually low, negatively impacting plant nutrition, the economic return, and the environment. The variable rate of nitrogen (VRN), prescribed by crop sensors, has been proposed as an alternative to the uniform rate of nitrogen (URN), traditionally used by farmers. However, in Brazilian agriculture, there are few studies to assess the effectiveness of this strategy. This study tested the hypothesis that VRN, based on N-Sensor[®] ALS, increases the N use efficiency (NUE) and corn grain yield in relation to URN. The experiment was conducted in long strips (36 x 300 m), distributed in a randomized block design with three replications, with the following treatments: 0; 70; 140; and 210 kg ha⁻¹ under URN, and 140 kg ha⁻¹ under VRN. The N source was urea broadcasted on the soil surface with a distributor equipped with the crop sensor. The soil is Oxisol under a subtropical climate (Cfa) with annual rainfall of 1700 mm and an average temperature of 19.5 °C. The crop optical sensor correlated with the dry matter production ($R^2=0.91$, $p<0.0001$) and with the corn N uptake ($R^2=0.87$, $p<0.0001$). In this study, the corn grain yield ranged from 10.2 to 15.5 Mg ha⁻¹, with linear response to N fertilizer rates. The VRN increased by 11.8 and 32.6 % the quantity of N uptake and NAE, respectively, compared to URN. However, the increase in corn grain yield was not statistically significant, suggesting that the major benefit of VRN was reducing the risk of fertilizer environmental impact.

Index terms: site-specific management, crop sensor, precision agriculture, soil fertility.

INTRODUÇÃO

O milho é o principal cereal cultivado no Brasil, com área superior a 15 milhões de ha. A produção brasileira alcançou 81,3 milhões de Mg na safra 2012/2013 (CONAB, 2013), com um incremento da produção, na última década, de 3,4 % ao ano, enquanto que a área cultivada, no mesmo período, aumentou somente 0,4 % (Miranda et al. 2012). Por isso, o recente aumento da produção brasileira de milho foi associado principalmente ao aumento de produtividade, refletindo a melhora no manejo da cultura, especialmente, no manejo da fertilização nitrogenada, cuja dose tem um aumento projetado de 3 % ao ano para o período de 2010-2016 (ANDA, 2010).

O aumento da dose de N na fertilização do milho pode intensificar o impacto ambiental, uma vez que mundialmente a eficiência da fertilização nitrogenada é baixa e fica próxima a 33 % (Raun e Johnson, 1999). Atualmente, no Sul do Brasil, a recomendação da fertilização nitrogenada à dose uniforme (DUN) é baseada no teor de matéria orgânica do solo (MOS), expectativa de produtividade, e cultura antecessora (Amado et al., 2002; CQFS - RS/SC, 2004). No entanto, a variabilidade espacial das propriedades do solo que governam a disponibilidade de N para plantas, tais como: MOS (Casa et al., 2011), nitrato de solo (Ferguson et al., 2002; Casa et al., 2011), e armazenamento de água do solo (Santi et al., 2012), não são levados em consideração. Assim, para uma mesma área pode ser encontrada diferentes doses ótimas de N na fertilização (Raun et al., 2002; Portz et al., 2012) e, neste caso, a DUN pode não ser adequada para toda a área, resultando em áreas sub ou superfertilizadas (Martin et al., 2007; Gregoret et al., 2008; Mayfield e Trengove, 2008). Portanto, a variabilidade espacial de atributos do solo e de planta na área é um desafio para otimizar a EUN e obter altas produtividades das culturas.

A dose variada de N (DVN) pode ajustar a dose de fertilizante de acordo com o estado nutricional de N da planta. Neste caso, uma das mais frequentes estratégias para a prescrição de fertilizantes é aumentar a dose de N em plantas com o estado nutricional deficiente, em que há uma maior probabilidade de resposta à fertilização. Esta estratégia resulta, frequentemente, na otimização da eficiência de uso do N (EUN) (Khosla et al., 2002; Raun et al., 2005; Singh et al., 2006, Bragagnolo et al., 2013b). Além disso, a DVN pode promover aumentos na absorção de N pelas plantas e, como consequência, reduzir o risco de perdas de N por lixiviação, escoamento superficial e volatilização (Basso e Ceretta, 2000; Wolschick et al., 2003; Fixen et al., 2005).

No momento da semeadura, a previsão das condições climáticas durante o período de desenvolvimento que afetam a disponibilidade de N no solo (suplemento N) e da produção de MS de milho (demanda N) é uma tarefa difícil. Como consequência, a utilização dos sensores ópticos de cultura poderia ser benéfica em relação aos métodos tradicionais de análise de nitrato no solo e/ou teor de MOS (Jasper et al., 2009; Portz et al., 2012; Bragagnolo et al., 2013b). Além disso, a utilização de sensores ópticos para prescrição da DVN tem vantagens por ser um método prático, econômico, e não destrutivo de análise indireta da planta em comparação com os métodos tradicionais diretos (Khosla et al., 2002; Raun et al., 2005).

Os sensores de cultura baseados na espectrometria óptica utilizam o princípio da reflectância de ondas no espectro do visível e do infravermelho próximo dos tecidos foliares das plantas. Entre os sensores de plantas utilizados para a prescrição da fertilização nitrogenada destacam-se: GreenSeeker[®] (Raun et al., 2002; Grohs et al., 2009), Crop Circle[®] (Amaral e Molin, 2011; Scharf et al., 2011) e N-Sensor[®] ALS (Yara International ASA) (Jasper et al., 2009; Portz et al., 2012; Bragagnolo et al., 2013 a, b).

Jasper et al. (2009) relataram que a relação dos comprimentos de onda de 730 e 760 nm, utilizados pelo N-Sensor[®] ALS, estimam eficientemente a quantidade de N absorvidas pelas plantas de trigo. De maneira análoga, Portz et al. (2012) encontraram uma alta relação entre a leituras do N-Sensor[®] ALS com o N absorvido e produção de MS em cana de açúcar.

Entre as principais vantagens da fertilização nitrogenada à DVN com base no sensor óptico destaca-se o incremento da produtividade de grãos na faixa de 3,0 a 13,0 % (Singh et al., 2006). No entanto, alguns estudos têm relatado aumentos menores na produtividade de grãos de cereais, variando de 0,8 a 5,1 % (Jørgensen e Jørgensen, 2007; Mayfield e Trengove, 2009), ou até mesmo ausência deste (Raun et al., 2005). Em áreas com alta variabilidade espacial de atributos do solo e da planta, espera-se melhores resultados com a estratégia de DVN em relação à DUN. Em alguns casos, mesmo sem ganho de produtividade das culturas, o aumento da quantidade de N absorvido pelas plantas fertilizadas à DVN pode melhorar a qualidade do produto, expressa pelo aumento de proteína nos grãos de trigo em relação à DUN (Jørgensen e Jørgensen, 2001). Outros estudos mostram uma possível redução na quantidade de entrada de fertilizantes N de até 14 % sem prejudicar a produtividade da cultura (Singh et al., 2006).

No Brasil, as informações sobre o uso de sensores ópticos para fertilização nitrogenada são escassas. Este estudo testou a hipótese de que a utilização do sensor de espectrometria óptica aumenta a eficiência da fertilização nitrogenada na cultura do milho. Os objetivos específicos do trabalho foram: a) avaliar a eficiência do sensor óptico em captar o

estado nutricional da cultura em diferentes estádios fenológicos de desenvolvimento, e b) comparar a EUN e produtividade de grãos de milho com uso das estratégias de fertilização à DVN e DUN.

MATERIAL E MÉTODOS

A área experimental localizada em Não-Me-Toque, RS, Brasil, está situada entre as coordenadas S 28 31'36" e W 52 47 '45", com 550 m de altitude. O clima é subtropical úmido (Cfa), segundo classificação Köppen (1948), com incidências frequentes de estiagens durante o verão. A precipitação média é de 1700 mm ano⁻¹ distribuída ao longo do ano, com uma temperatura média anual de 19,5 °C.

Este estudo foi realizado em uma área de sequeiro cultivada em 2010/2011 com condições favoráveis de precipitação durante o período de crescimento do milho, com um volume total de 1048 mm de pluviosidade uniformemente distribuída (Figura 1), correspondendo a aproximadamente 62 % da precipitação média anual.

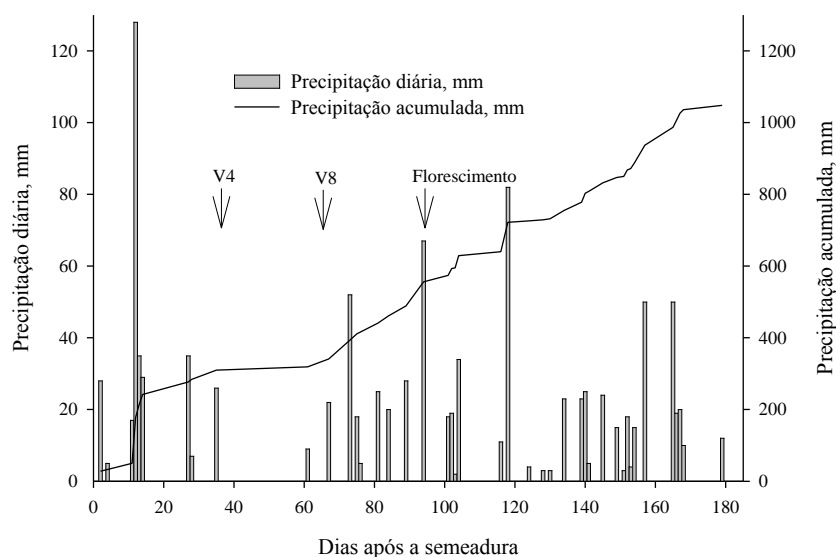


Figura 1. Precipitações diárias e acumulada ocorridas durante o ciclo da cultura do milho na safra agrícola de 2010/2011. Fonte: Cotrijal.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho (Embrapa, 2006), com declive suave. Antes da instalação do experimento, a área foi manejada sob sistema de plantio direto (SPD) contínuo por 15 anos. Na Tabela 1, são apresentadas as características granulométricas e químicas do solo determinadas quando da implantação do experimento.

Tabela 1. Análise granulométrica e características químicas do solo na camada de 0-0,10 m da área experimental

Argila ¹	pH H ₂ O ²	MOS ³	P ⁴	K ⁴	Al ⁵	Ca ⁵	Mg ⁵	CTC
g kg ⁻¹		%	mg dm ⁻³	-----cmol _c dm ⁻³ -----				
550	5,8	3,8	12,3	0,638	0,0	7,0	2,2	14,0

¹Determinada por densimetria; ²determinado por potenciometria; ³MOS= matéria orgânica do solo determinado pelo método Walkley-Black; ⁴determinado pela solução Mehlich-1; ⁵determinados por extração com KCl (1 mol L⁻¹); CTC= capacidade de troca de cátions.

A semeadura do milho foi realizada no dia 10 de setembro de 2010 sobre palhada de aveia (*Avena strigosa* S.), utilizando-se semeadora-adubadora SSM 27[®] (Semeato) equipada com caixa de fertilizante e caixa de sementes para 11 linhas de semeadura espaçadas a 0,50 m. Utilizou-se o híbrido de milho 30F53 (Pioneer) com população final estimada em 67.000 plantas ha⁻¹. A fertilização de base consistiu de 30 kg ha⁻¹ de N, 78 kg ha⁻¹ de P e 69 kg ha⁻¹ de K. A fonte de N foi de ureia (CO(NH₂)₂) com 45 % de N, a fonte de P foi o superfosfato triplo Ca(H₂PO₄)₂.H₂O com 21 % de P₂O₅, e a fonte de K foi cloreto de potássio (KCl) com 60 % de K₂O.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados com três repetições, com os tratamentos dispostos em faixas no sentido das linhas de semeadura de milho (Figura 2). As parcelas tiveram dimensões de 36 x 300 m totalizando uma área experimental de 10800 m². Os tratamentos consistiram das seguintes doses de N e estratégias de fertilização: 1) 0 kg ha⁻¹ (Testemunha); 2) 70 kg ha⁻¹ a dose uniforme (70DUN); 3) 140 kg ha⁻¹ a dose uniforme (140DUN); 4) 140 kg ha⁻¹ a dose variada baseada no sensor óptico (140DVN); 5) 210 kg ha⁻¹ a dose uniforme (210DUN). Neste experimento, a ureia foi a fonte de N, distribuída a lanço com o distribuidor equipado com duplo disco centrífugo (Twister 1500[®], STARA) em condições de umidade do solo elevada. A dose de N (140 kg ha⁻¹), selecionada para comparar as estratégias de fertilização de DUN e DVN, é a recomendada regionalmente para uma expectativa de produtividade entre 8 a 9 Mg ha⁻¹, para solos com teores de MOS na faixa de 2,6 a 5,0 %, com cultivo anterior de gramíneas CQFS-RS/SC (2004).

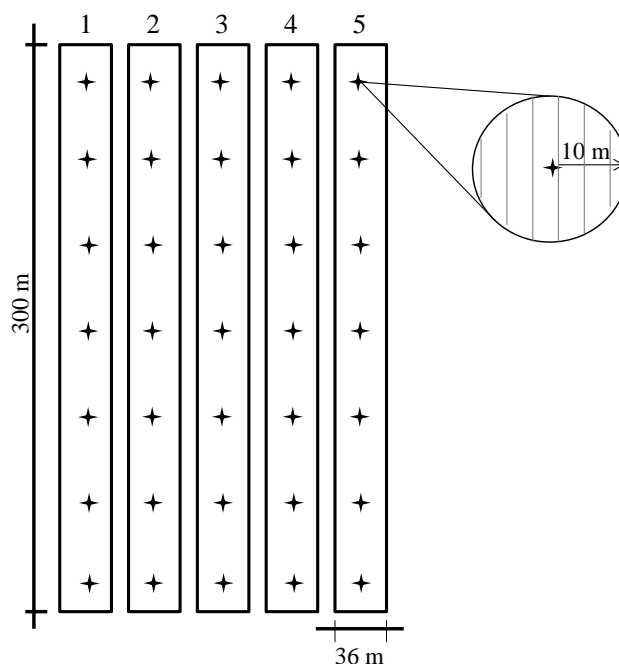


Figura 2. Croqui da área experimental, com transecto utilizado para avaliação de atributos vegetativos em diferentes estádios de desenvolvimento e raio de interpolação dos dados do sensor óptico para relacionar com os atributos vegetativos.

Os tratamentos com doses de N superiores a 70 kg ha^{-1} , foram divididos em três aplicações. A primeira foi de 30 kg ha^{-1} , a dose uniforme na semeadura, a segunda foi de 40 kg ha^{-1} , a dose uniforme aplicada no estágio de quatro folhas completamente expandidas milho (V4), e a terceira, aplicada no estágio V8 com 70 kg ha^{-1} , a dose uniforme (140DUN) e a dose variada (140DVN) e 140 kg ha^{-1} , a dose uniforme (210DUN).

Os atributos vegetativos avaliados, nos estádios fenológicos V4, V6, V8, V10, V12 e florescimento foram: teor de N no tecido vegetal da parte aérea, N total absorvido, produção de MS, teor relativo de clorofila determinada pela leitura do clorofilômetro manual (Minolta SPAD-502[®], MINOLTA) e IV determinado pelo sensor óptico (N-Sensor[®] ALS). Para as amostragens de planta, utilizou-se um transecto com sete pontos georreferenciados distanciados 40 m entre si por parcela (Figura 2). Para determinação da produção de MS foram coletadas plantas em 2 m lineares em torno do ponto georreferenciado e, posteriormente, realizada a determinação do teor de N no tecido vegetal, através de digestão úmida por micro-Kjeldhal, conforme descrito em Tedesco et al. (1995). Para obter o teor relativo de clorofila, as leituras de clorofilômetro manual foram realizadas em cinco plantas por ponto georreferenciado seguindo metodologia descrita em Argenta et al. (2004).

No tratamento 140DVN, baseado no IV determinado com o sensor óptico, foi prescrita a dose variada de fertilizante nitrogenado por meio de um algoritmo desenvolvido pela YARA (Yara International ASA, Duermen, Alemanha). O equipamento, composto por dois sensores ópticos (direito e esquerdo), foi acoplado na parte superior da cabine do trator, a aproximadamente 3,8 m da superfície do solo, realizando a leitura de uma faixa de 3,0 m de largura de cada lado do trator, permitindo ao equipamento fazer a leitura em 33 % das plantas presentes no experimento. O ângulo formado pelo feixe de luz emitido pelo transmissor de xênon e a superfície do solo ficou compreendido entre 50° a 66°.

O N-Sensor[®] ALS é composto por transmissores de xenon que emitem raios multiespectrais (650 a 1100 nm) de alta intensidade, e receptores com dois fotodiodos utilizados para determinação do IV, com base na relação de reflectância das ondas espectrais nos comprimentos de 730 e 760 nm calculado pela equação 1 (Jasper et al., 2009):

$$IV = (\ln R_{760} - \ln R_{730}) \times 100 \quad (1)$$

Onde: IV é o índice de vegetação; R_{760} é a reflectância no comprimento de onda 760; R_{730} é a reflectância no comprimento de onda 730 nm.

No tratamento 140DVN, a dose foi prescrita utilizando-se o sensor no modo de operação “N-application”, dividindo os trabalhos de campo em duas etapas. Na primeira etapa, realizou-se a determinação do IV médio (64,7) das plantas na área no estádio V8 para o qual se atribuiu a dose referência a ser aplicada de 70 kg ha⁻¹ de N. Em seguida, realizou-se a segunda etapa, com nova determinação de IV e prescrição em tempo real das doses de N a serem aplicadas, transmitindo-as ao controlador (Topper 4500[®], STARA) do distribuidor centrífugo de discos (Twister[®], STARA) com o qual foi realizada a distribuição do fertilizante. A largura de distribuição de fertilizantes foi ajustada para 18 m, distribuindo, assim, fertilizante em uma faixa de 36 m de largura.

Os dados obtidos a partir do sensor óptico foram transferidos para um sistema de informação geográfica (Campeiro 7.0, Giotto et al., 2011), através do qual efetuou-se o tratamento das informações, eliminando-se pontos externos às parcelas (erro de posicionamento). Posteriormente, foi determinada, em um raio de 10 m em torno de cada ponto georreferenciado do transecto, a média das leituras de IV e das doses de N prescritas.

Para fins de avaliação da eficiência das doses N prescritas selecionou-se, entre os 21 pontos georreferenciados do transecto, os valores de dose prescrita mais baixos (valor médio de $64,5 \pm 2,2 \text{ kg ha}^{-1}$), valores em que a dose prescrita ficou mais próxima à média (valor médio de $70,4 \pm 0,3 \text{ kg ha}^{-1}$) e valores em que as doses prescritas foram mais altas (valor médio de $78,1 \pm 4,0 \text{ kg ha}^{-1}$), sendo utilizadas 4 repetições representativas para cada uma das três classes.

Os dados de produtividade de grãos foram obtidos através da colheita manual das espigas de 2 fileiras de 2 metros lineares (2 m^2), em torno de cada ponto georreferenciado do transecto. Ainda, cada parcela foi colhida separadamente com colhedora MF34[®] (Massey Ferguson) equipada com sensor de produtividade e a produção total da parcela determinado separadamente por balança. Os resultados de produtividade foram ajustados para 13,0 % de umidade.

Para avaliar a eficiência do uso de N (EUN), foram determinadas a eficiência agrônômica do N (EAN) e a eficiência de recuperação aparente do N (ERN) seguindo metodologia descrita em Cassman et al. (2002) e Dobermann (2005):

$$\text{EAN} = (P_N - P_T)/D_N \quad (2)$$

Onde: EAN = eficiência agrônômica do N (kg kg^{-1} de grão por N aplicado); P_N = produtividade do tratamento com N fertilizante (kg ha^{-1} de grão); P_T = produtividade da testemunha (sem fertilização nitrogenada) (kg ha^{-1} de grão); D_N = dose de N fertilizante (kg ha^{-1} de N).

$$\text{ERN} = (N_N - N_T)/D_N \quad (3)$$

Onde: ERN = eficiência de recuperação aparente do N aplicado (kg kg^{-1} de N absorvido por N aplicado); N_N = quantidade de N absorvido no tratamento com N fertilizante (kg ha^{-1}); N_T = quantidade de N absorvido na testemunha (sem fertilização nitrogenada) (kg ha^{-1}); D_N = dose de N fertilizante (kg ha^{-1} de N).

Para o cálculo da renda bruta foi levado em conta o preço do saco de milho de 60 kg de R\$ 25,00 e o preço da tonelada de ureia de R\$ 1000,00, com base no mercado regional de grãos e insumos, no momento da colheita (Cotrijal, 2011).

Os resultados experimentais foram submetidos à análise descritiva e de variância. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), seguida de regressões polinomiais através do pacote estatístico SISVAR 4.0 (Ferreira, 2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Efeito da fertilização nitrogenada sobre o estado nutricional do milho e produtividade de grãos de milho

Os atributos vegetativos relacionados com o estado nutricional do milho, avaliados no florescimento, correlacionaram-se diretamente com a produtividade de grãos (Tabela 2), com exceção da MS ($p = 0,6643$). Portanto, o conteúdo de N na planta ($R^2 = 0,99$, $p = 0,0017$) e absorção de N pelas plantas ($R^2 = 0,90$, $p = 0,0084$) obtiveram forte relação com a produtividade de grãos de milho. Além disso, a quantidade de N absorvido obteve relação com o teor de N planta ($R^2 = 0,89$, $p = 0,0100$) e com a leitura do clorofilômetro ($R^2 = 0,91$, $p = 0,0073$). Já, o teor de N na planta mostrou uma relação forte com a leitura do clorofilômetro ($R^2 = 0,90$, $p = 0,0073$).

Tabela 2. Atributos vegetativos avaliados no estágio de florescimento do milho para os tratamentos com fertilização nitrogenada

	Teor de N	N absorvido	MS	Clorofilômetro	Produtividade ¹
	%	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	SPAD	kg ha ⁻¹
T	1,2 d	117,0 c	10111 ab	51,2 d	10231 c
70 DUN	1,3 c	109,9 c	8760 c	54,5 c	11125 c
140 DUN	1,6 b	163,3 b	10417 a	57,1 b	13743 b
140 DVN	1,7 ab	182,6 a	10180 ab	57,5 ab	14887 ab
210 DUN	1,8 a	177,2 ab	9563 ab	59,4 a	15564 a
Equação	$y = 1,17 + 0,0031x$	$y = 108,99 + 0,3662x$	ns	$y = 51,52 + 0,0395x$	$y = 9973 + 28,014x$
R ²	0,91	0,64	ns	0,98	0,91
p	0,0076	0,0496	0,6643	0,0006	0,0104

T = testemunha (0 kg ha⁻¹ de N); DUN = dose uniforme de N; DVN = dose variada de N prescrita pelo sensor óptico; MS = matéria seca; SPAD = leitura do clorofilômetro manual SPAD; N absorvido % = teor N no tecido vegetal; N absorvido kg ha⁻¹ = N na matéria seca, kg ha⁻¹; ¹ = produtividade de grãos avaliada manualmente; R² = coeficiente de determinação; p = nível de significância calculado pelo teste T; Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade ($p < 0,05$); ns = não significativo.

Como esperado, as doses de fertilizante nitrogenado marcadamente influenciaram o estado nutricional do milho (Tabela 2). Este foi um pré-requisito importante para o objetivo de avaliar a eficiência do sensor óptico e a estratégia da DVN. Portanto, o tratamento com a maior dose de N aplicada (210DUN) aumentou em 56 e 50 % o N absorvido e o teor de N na planta, respectivamente, em relação à testemunha. Estes resultados são devidos ao efeito do N nas plantas, tendo este papel importante para a divisão e expansão celular, além de ser o componente principal para as moléculas de clorofila responsáveis pela fotossíntese (Marchner, 1995; Malavolta et al., 1997), conduzindo à acumulação de carboidratos, expansão da folha, e crescimento da planta (Lea e Morot-Gawdy, 2001; Lobell, 2007).

O tratamento controle, embora sem a entrada de fertilizantes nitrogenados, teve alta quantidade de N acumulado pelas plantas (117 kg ha^{-1}) e produção de MS de milho (10111 kg ha^{-1}) (Tabela 2). Este resultado está associado ao uso de plantio direto contínuo, com rotação de culturas e culturas de cobertura adotado nesta área cultivada nos últimos 15 anos, teor médio de MOS de 3,8 %, juntamente com as condições climáticas favoráveis durante o ciclo de desenvolvimento do milho (Figura 1). Com isso, mesmo o tratamento testemunha alcançou elevada produtividade de grãos de milho (10231 kg ha^{-1}) (Tabela 2). Anteriormente, Ortiz et al. (2001) e Lázaro et al. (2013), no Sul do Brasil, também obtiveram altas produtividades, superiores a 10000 kg ha^{-1} , sem adição de fertilizantes nitrogenados em condições climáticas favoráveis e as boas práticas de manejo. Embora essa estratégia provavelmente não seja sustentável para a produção de grãos de milho em longo prazo, uma vez que pode levar ao depauperamento das reservas de N no solo.

O teor relativo de clorofila obtido através das leituras de clorofilômetro no milho apresentam uma relação linear positiva com as doses da fertilização nitrogenada (Tabela 2), estando de acordo com o relatado anteriormente por Jakelaitis et al. (2005). Somente os tratamentos testemunha e 70DUN apresentaram leituras de clorofilômetro abaixo do proposto como crítico (57,1) (Argenta et al., 2004), enquanto que a maior produtividade de milho ($15,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) foi obtida no tratamento 210DUN com leitura de clorofilômetro (59,4) ligeiramente superior ao valor crítico, demonstrando nutrição mais adequada para obtenção de elevadas produtividades.

Os teores de N no tecido vegetal no estágio de florescimento enquadraram-se, independente do tratamento, dentro ou acima da faixa sugerida como crítica (1,0 a 1,3 %) (Stanford, 1973; Grove et al., 1980; Amado et al., 2002). Porém, as produtividades de milho obtidas com teores de N na faixa de 1,6 a 1,8 % foram superiores as obtidas na faixa sugerida como crítica (Tabela 2).

A quantidade de N absorvido pelo milho no florescimento apresentou uma relação linear com dose de N fertilizante aplicado até a dose de 210 kg ha⁻¹ (p=0,0496) e com a produtividade de grãos ($y = 3235 + 65,81x$; $R^2=0,90$; p=0,0084) (Tabela 2). Esta relação linear sugere que, se doses maiores de N fossem investigadas, ainda poderia ser observado aumento da produtividade de grãos de milho. Assim, o tratamento com a maior dose de N (210DUN) apresentou um aumento de 5333 kg ha⁻¹ (52,0 %) na produtividade em relação à testemunha (Tabela 2). A elevada resposta à fertilização nitrogenada, em parte, pode ser atribuída às condições climáticas favoráveis para o desenvolvimento do milho, expressas pela combinação de fatores como precipitações satisfatórias em estágios críticos (Figura 1), luminosidade abundante e noites com temperaturas amenas, além do solo de qualidade e do híbrido de milho com potencial para obtenção de elevadas produtividades de grãos (Tabela 1).

Anteriormente, Jakelaitis et al. (2005), avaliando a resposta fertilizante nitrogenado do híbrido de milho AGN 2003, registraram um ajuste linear até 240 kg ha⁻¹. Da mesma forma, Ortiz et al. (2011) relataram para o mesmo híbrido de milho utilizado em nosso estudo (Pioneer 30F53), resposta ao uso de fertilizantes N até 200 kg ha⁻¹ de N, obtendo produtividade próximas a 14000 kg ha⁻¹, ligeiramente inferior ao obtidos em nosso estudo (15564 Mg ha⁻¹).

Estado nutricional nitrogenado do milho acessado com uso do sensor óptico

A eficiência da estratégia de fertilização à DVN depende, entre outros fatores, da capacidade do sensor óptico em captar, em um estágio fenológico precoce, as distintas condições nutricionais de plantas do milho na lavoura, de modo que a fertilização nitrogenada em cobertura possa corrigir deficiências nutricionais através da realocação do insumo de plantas que já se encontram com estado nutricional satisfatórios.

Neste estudo, as leituras de IV obtidas com o sensor óptico foram intimamente relacionadas com a quantidade de N absorvido ($R^2=0,91$; p<0,0001) e com a produção de MS ($R^2=0,94$; p<0,0001) (Figura 3). Anteriormente, Mayfield e Trengove (2009) reportaram forte correlação ($R^2=0,76$; p=0,0001) entre as leituras do N-Sensor com a quantidade N absorvido pelo trigo. Já, Portz et al. (2012) relataram correlação das leituras de IV com a absorção de N ($R^2=0,74$ a 0,94) e de produção de MS da cana de açúcar ($R^2=0,74$ a 0,96). Em nosso estudo, para a prescrição da DVN, o sensor óptico foi utilizado no estágio V8 de desenvolvimento da cultura, no qual o sensor apresenta sensibilidade para relacionar os atributos vegetativos ao estado nutricional nitrogenado das plantas.

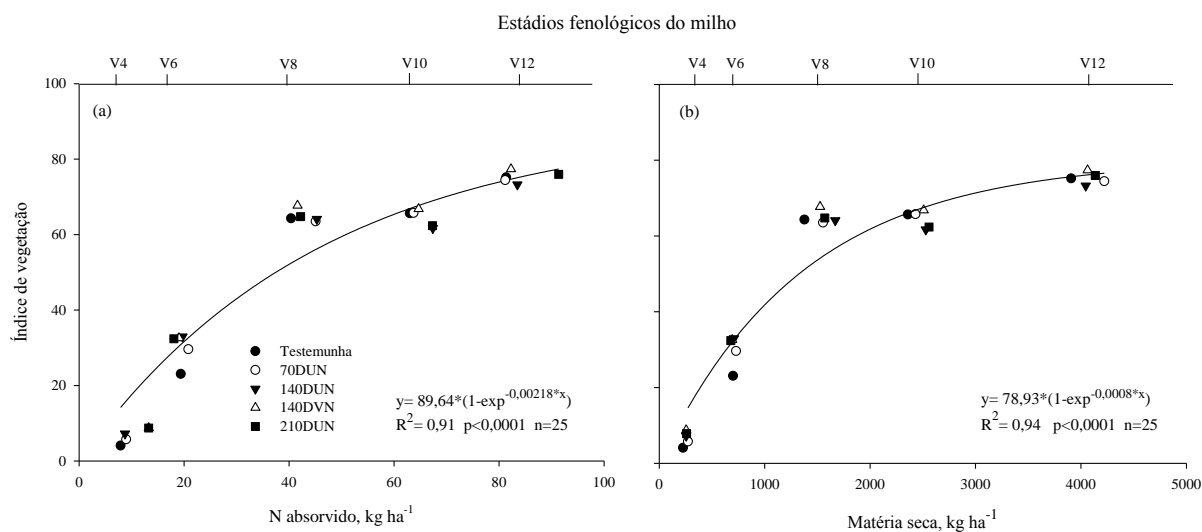


Figura 3. Relações entre a quantidade de nitrogênio absorvido (a) e a produção de matéria seca (b) do milho com o índice de vegetação determinado pelo sensor óptico.

Na Figura 3, observou-se que as leituras de IV obtidas com o sensor óptico ajustam funções exponenciais com a quantidade de N absorvida e MS das plantas de milho, na qual, em estádios fenológicos avançados da cultura, o sensor óptico apresentou uma perda de sensibilidade (efeito de saturação), expresso pela pequena variação do IV aos incrementos na quantidade de N absorvido e na produção de MS. Neste estudo, o efeito de saturação foi observado quando a quantidade de N absorvido foi superior a 70 kg ha^{-1} e a produção de MS a 2500 kg ha^{-1} , correspondendo a estádios fenológicos superiores ao V10. Anteriormente, Portz et al. (2012) reportaram o efeito de saturação para este sensor óptico quando a quantidade de N acumulado pelas plantas foi superior a 40 kg ha^{-1} e de produção de MS superior a 4000 kg ha^{-1} para a cana de açúcar. O efeito da saturação também foi relatado para outros tipos de sensores de cultura baseados na espectrometria óptica (Mutanga e Skidmore, 2004; Heege et al., 2008; Grohs et al., 2009; Portz et al., 2012).

Dose variada de nitrogênio prescrita com base no sensor óptico

Com base nas leituras de IV do sensor óptico e a amostragem de plantas feitas no estádio V8, em cada ponto do transecto, foi possível estabelecer a relação entre as leituras IV e a dose prescrita de N (Figura 4a). Neste caso, a DVN variou de 62 a 84 kg ha^{-1} (Figura 4a), enquanto que o N absorvido pelas plantas variou $36,7$ a $52,5 \text{ kg ha}^{-1}$ e a produção de MS de milho de 1270 a 1916 kg ha^{-1} . Assim, as plantas que tiveram menor IV foram associadas à deficiência na nutrição nitrogenada e produção de MS inferior, conseqüentemente, com maior

probabilidade de resposta à aplicação de fertilizantes, justificando o aumento da dose de N em comparação com a dose referência (70 kg ha^{-1}) prescrita para este estágio da cultura. Em contraste, as plantas com maior IV, indicando plantas bem nutridas e com alta produção de MS (Figura 4a), e, portanto, com menor probabilidade de responder à fertilização nitrogenada, o que justifica a redução da dose de N em relação à dose referência.

Anteriormente, Mayfield e Trengove (2009) relataram que, para uma dose de referência de 33 kg ha^{-1} de N no trigo, as doses de N prescritas pelo sensor óptico estavam na faixa dos 20 aos 52 kg ha^{-1} , enquanto que a quantidade de N absorvido pelas plantas variou de 69 a 118 kg ha^{-1} , e a produção de MS variou de 1510 a 3050 kg ha^{-1} .

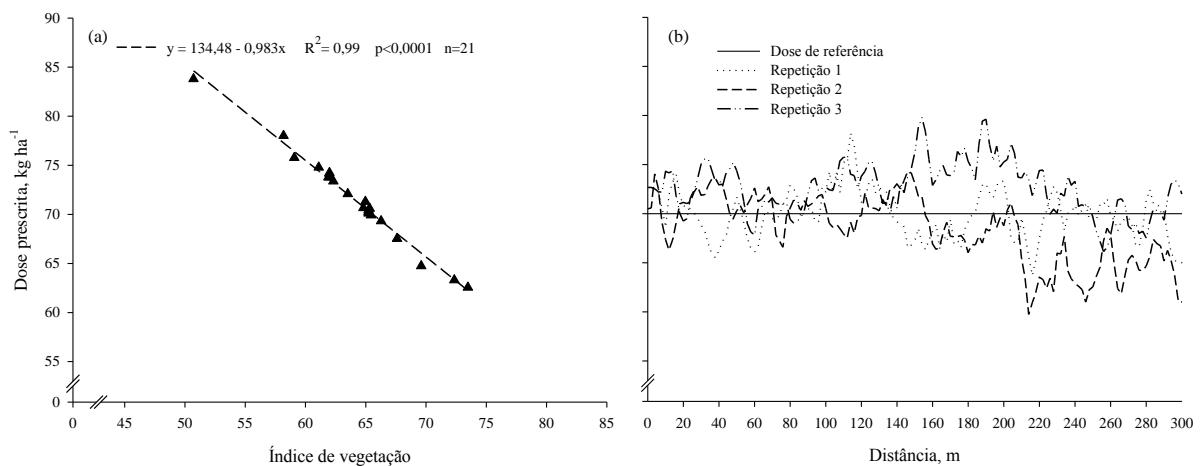


Figura 4. Doses de nitrogênio prescritas em função do índice de vegetação determinados pelo sensor óptico no estágio fenológico V8 do milho (a) e distribuição longitudinal das doses variadas de N nas repetições para o tratamento 140DVN (b).

De forma geral, apenas 9,7 % dos valores prescritos pelo sensor óptico coincidiram com a dose de N de referência, enquanto que 36,9 % e 53,4 % das doses prescritas foram inferiores e superiores a esta dose, respectivamente (Figura 4b). A repetição 3 da DVN apresentava as menores leituras de IV e, neste caso, apresentou uma maior frequência de doses de N prescritas superiores a dose referência. Por outro lado, na repetição 2, a partir dos 150 m verificou-se maior frequência de doses de N prescritas abaixo da referência, indicando variabilidade longitudinal dentro da parcela. De um modo geral, neste estudo, a variabilidade espacial até a metade das parcelas era menor do que no restante, indicando que, além de captar diferenças entre as parcelas, o sensor foi capaz de registrar diferenças dentro da mesma parcela.

Assim, para a repetição 1 da DVN, 36,7 % das doses prescritas de N foram inferiores a dose de N referência, enquanto que 17,3 % foram semelhantes a esta e 46,0 % ficaram acima. Já na repetição 2, 68,4 % foram inferiores a dose de N de referência, 8,2 % foram iguais a esta e 23,4 % ficaram acima. Enquanto que, na repetição 3, 8,4 % foram abaixo, 3,6 % correspondiam a dose de N de referência e 88,0 % foram superiores a mesma. A alta variabilidade espacial do estado nutricional do milho quanto ao N capturada pelo sensor óptico é atribuído às características intrínsecas do solo, microclima e manejo sítio específico que afetam o desenvolvimento das culturas (Mayfield e Trengove de 2009; Jørgensen e Jørgensen, 2007) e não necessariamente um reflexo do mau manejo da área.

Estratégias de fertilização nitrogenada à DVN e DUN

A comparação entre as estratégias de fertilização DUN e DVN foi feita com base nos resultados apresentados na Tabela 2. No tratamento com DVN, o teor de N, a quantidade de N absorvido e a produtividade de grãos foram incrementados em 6,3, 11,8 e 8,3 %, respectivamente, em relação à DUN. Embora somente a quantidade de N absorvido tenha diferenciado estatisticamente as estratégias de fertilização. Ainda, o tratamento DVN incrementou a ERN (Equação 2) em aproximadamente 14,0 kg kg⁻¹ em relação à DUN. O tratamento 140DVN, entre todos os tratamentos investigados, obteve a maior quantidade de N absorvido pelo milho (182,6 kg ha⁻¹), porém, sem diferença estatística para o tratamento 210DUN, que recebeu uma dose de N 50 % maior. Este resultado é relevante, uma vez que o principal objetivo da estratégia de DVN é aumentar a absorção de N na planta. Assim, a redistribuição do fertilizante nitrogenado com base na variabilidade espacial do estado nutricional das plantas captada pelo sensor óptico, combinado com a prescrição de uma dose maior para as plantas com menor IV, foi uma estratégia eficiente de aumentar a quantidade de N absorvido pelo milho e a ERN (Tabela 2). Este resultado é importante porque auxilia na redução do impacto ambiental da fertilização nitrogenada.

A DVN apresentou incremento na produtividade de 1144 kg ha⁻¹ em relação à DUN, embora sem diferença estatística (Tabela 2). Anteriormente, Jørgensen e Jørgensen (2001; 2007), Mayfield e Trengove (2009) e Boyer et al. (2011) também reportaram incrementos de produtividade de grãos com uso da DVN na cultura do trigo com uso de DVN, porém sem diferença estatística em relação à DUN.

Com a utilização do sensor óptico, no estágio fenológico V8, foi possível confirmar a existência de importante variabilidade espacial no estado nutricional das plantas, tanto nas parcelas do tratamento 140DUN como na do 140DVN (Figura 5). Assim, no tratamento à DUN, a fertilização nitrogenada foi realizada de maneira uniforme com uma única dose de 70 kg ha⁻¹ (Figura 5c), desconsiderando a existência da variabilidade espacial da nutrição de plantas (Figura 5a), enquanto que no tratamento DVN, a variabilidade da dose de fertilizantes (Figura 5d) foi dependente do IV (Figura 5b).

Um dos principais objetivos da estratégia de fertilizantes à DVN é reduzir a variabilidade espacial do estado nutricional das plantas de milho quanto ao N dentro da área. Essa meta pode ser avaliada através das leituras de IV em estádios de desenvolvimento da cultura posteriores a fertilização nitrogenada, como o estágio V12 (Figuras 5e, f). Neste caso, verificou-se que a estratégia DVN em geral reduziu a variabilidade espacial das leituras de IV em relação à DUN. Somente na repetição 3, a DVN não foi capaz de reduzir a variabilidade espacial das leituras de IV. Outro efeito importante da DVN foi o de reduzir a ocorrência de plantas com provável consumo de luxo de N (Figuras 5e, f). Assim no estágio de desenvolvimento V12, na estratégia DVN, apenas 8 % da área havia plantas com IV>78, enquanto na DUN 44 % (5,5 vezes) da área havia plantas com IV maior do que este. Plantas de milho com IV>78 apresentaram as seguintes características: a quantidade média de N absorvido foi de 84,0 kg ha⁻¹, o teor médio de N na planta foi de 2,1 % e a leitura média de clorofilômetro foi de 51,7.

A aparente superfertilização pode ser visualizada na repetição 2 da DUN que no terço superior já apresentava plantas com altas leituras de IV no estágio V8 (Figura 5a), e após o uso da estratégia de fertilização nitrogenada à dose uniforme (Figura 5b), apresentaram, na maior parte da parcela, plantas superfertilizadas no estágio V12. Portanto, a DVN promoveu uma maior uniformidade de IV em relação à DUN, reduzindo a ocorrência de plantas com aparente consumo de luxo de N.

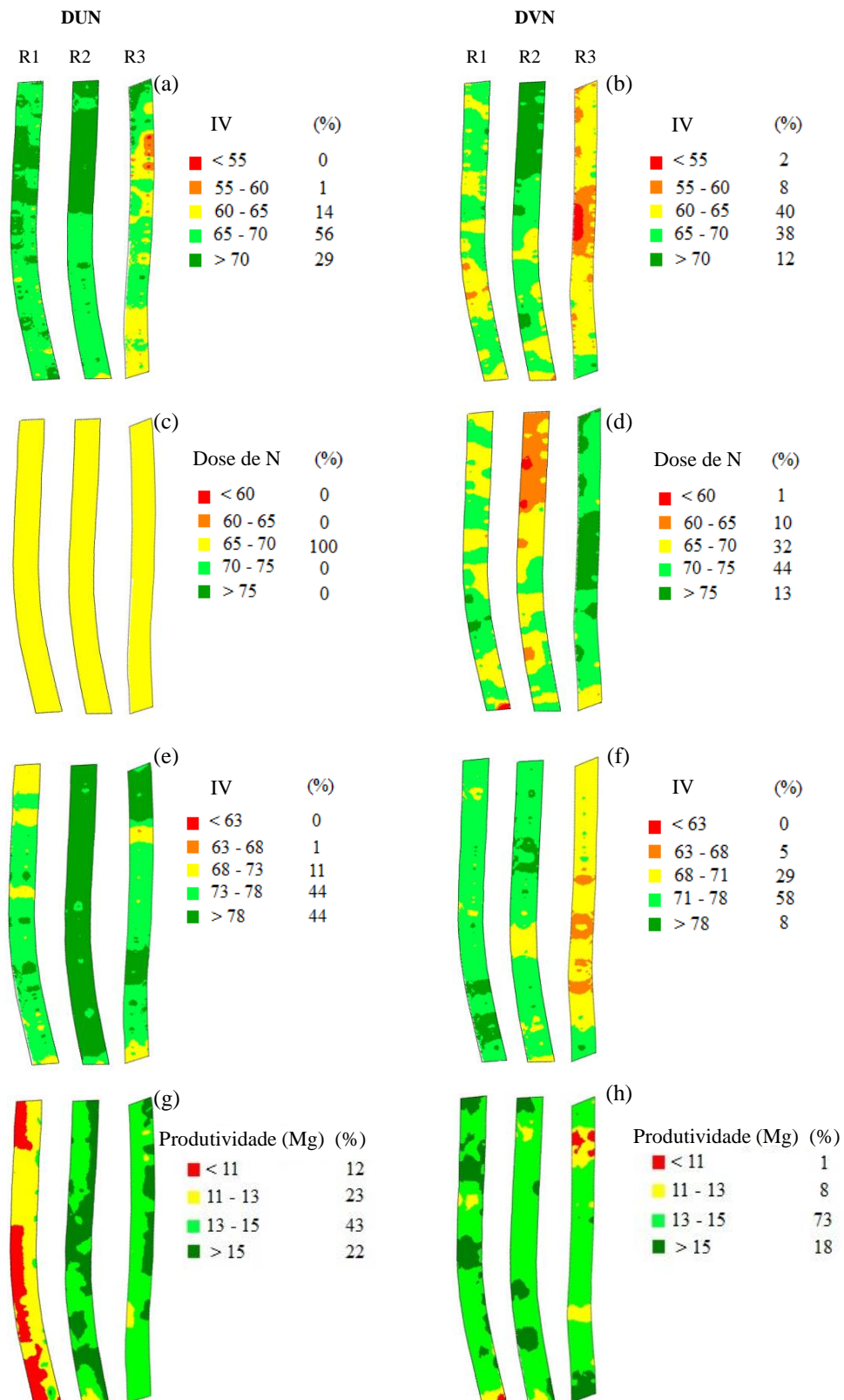


Figura 5. Índice de vegetação determinado com sensor óptico no estágio V8 (a, b) e V12 (e, f), dose prescrita pelo sensor no estágio de V8 (c, d) e produtividade do milho (g, h) para os tratamentos com uso de estratégias à DUN e DVN, respectivamente.

Utilizando-se os histogramas da distribuição da produtividade de grãos a partir dos dados de colheita mecanizada, pode-se observar que a utilização de DVN promoveu maior uniformidade da produtividade (Figura 6), com reduções de 27 e 30 % no desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) em relação aos obtidos com a DUN (Figura 6).

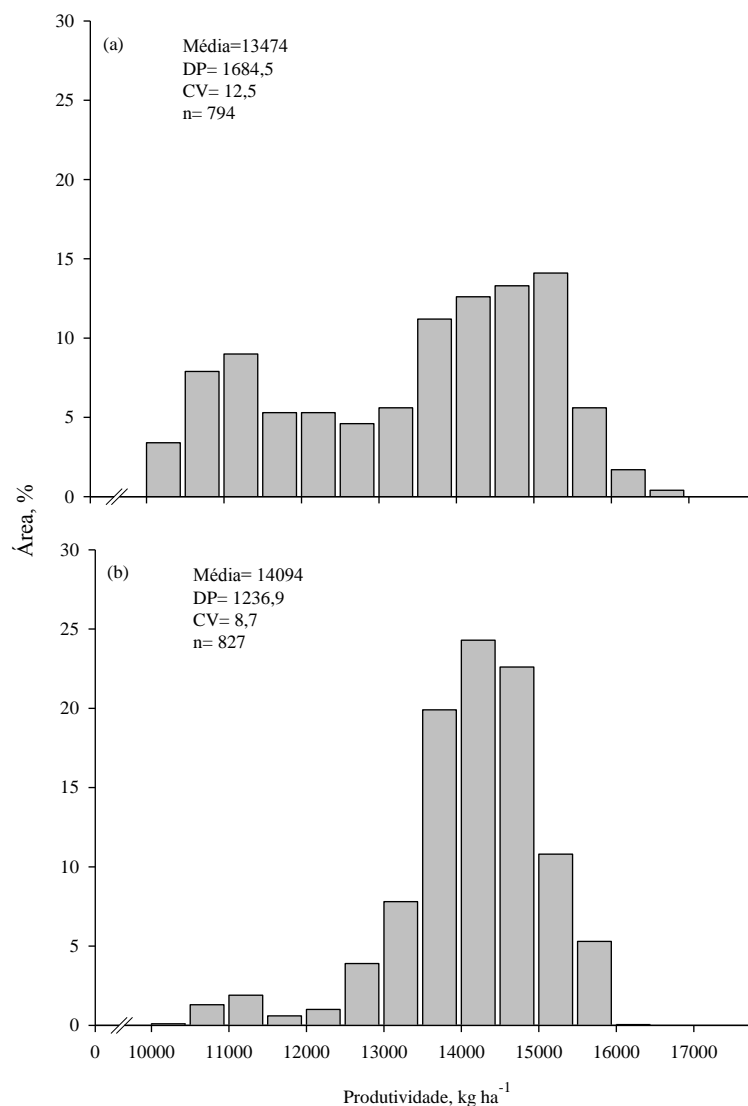


Figura 6. Histogramas de frequência de distribuição das produtividades para as estratégias de fertilização à DUN (a) e DVN (b). DP= desvio padrão; CV= coeficiente de variação; n= número de observações.

A frequência de classe de produtividade de grãos de milho menores que 12000 kg ha⁻¹ foi maior na DUN do que na DVN (Figura 6). Este resultado sugere que os aumentos das doses de N em plantas com IV menores foi uma estratégia eficiente em corrigir o estado nutricional deficiente diagnosticado no estágio V8 (Figura 5b). Por outro lado, a ocorrência de

plantas aparentemente superfertilizadas na DUN resultou no aumento de 22 % na frequência de classe de produtividade de grãos de milho superiores a 15000 kg ha⁻¹ em relação à DVN. Além disso, só na DUN foram observadas plantas com produtividades de grãos superiores a 16000 kg ha⁻¹.

Os resultados apresentados na figura 6 sugerem que a DUN propiciou uma distribuição de frequência de classe de produtividade maior do que DVN. Assim, a estratégia de fertilizantes à DVN resultou em uma distribuição assimétrica das classes de produtividade com alta concentração de frequência ao lado direito, onde se observa produtividades maiores, resultando em um aumento de 70 % na frequência de classes de produtividade nas faixas de 13000-15000 kg ha⁻¹, em relação à DUN. Em resumo, uma das principais vantagens da DVN sobre a produtividade de grãos de milho foi de diminuir a frequência de plantas menos produtivas.

Além desta redução na distribuição de frequência de classes de produtividades menores, os dados de produtividade obtidos, através da colheita mecânica na DVN, permitiram observar um incremento de 6,5 % em relação à DUN (Figura 6), sem diferença estatística entre as estratégias de fertilizantes, semelhantes aos resultados obtidos com a colheita manual (8,3 %) (Tabela 2). A ausência de diferença na produtividade de grãos pelas estratégias de fertilizantes pode ser explicada pelo fato de, na estratégia à DVN, ter ocorrido uma redução da dose de N em relação à dose de N referência (70 kg ha⁻¹) nas plantas aparentemente bem nutridas, uma vez que, neste estudo, foi observada relação linear da produtividade de grãos com a dose de N até 210 kg ha⁻¹ (Tabela 2). Assim, é esperado que pudesse ter ocorrido alguma penalização a produtividade de grãos de milho, devido à redistribuição de N no tratamento com a estratégia de fertilização à DVN, para os locais onde as doses de N foram inferiores a dose de N de referência. Isto reforça o fato de que, para melhorar a eficiência da DVN, a dose de N de referência deve estar tão próxima quanto possível do máximo da eficiência econômica e as plantas devem ser mantidas sempre bem nutridas, para que não ocorra perda de potencial produtivo.

Eficiência do uso de N à DUN e DVN

Os indicadores produtividade de grãos de milho, EAN e renda bruta investigados para as classes de dose de N prescrita na estratégia à DVN são apresentadas na figura 7. Assim, a classe de baixa dose de N prescrita apresentou um aumento de 24,2 % na produtividade de

grãos de milho em relação à DUN, mesmo com a redução de 7,9 % na dose de N prescrita. Além disso, a classe de baixa dose de N prescrita promoveu incremento de 110,4 % na EAN em relação à DUN. Portanto, a classe de baixa dose de N prescrita foi capaz, neste estudo de curto prazo, de sustentar a alta produtividade de grãos, resultando em um grande aumento na EAN. Anteriormente, Cassman et al. (2002), Doberman (2005) e Snyder e Bruulsema (2007), relataram aumento da EAN com a redução da dose de N aplicada.

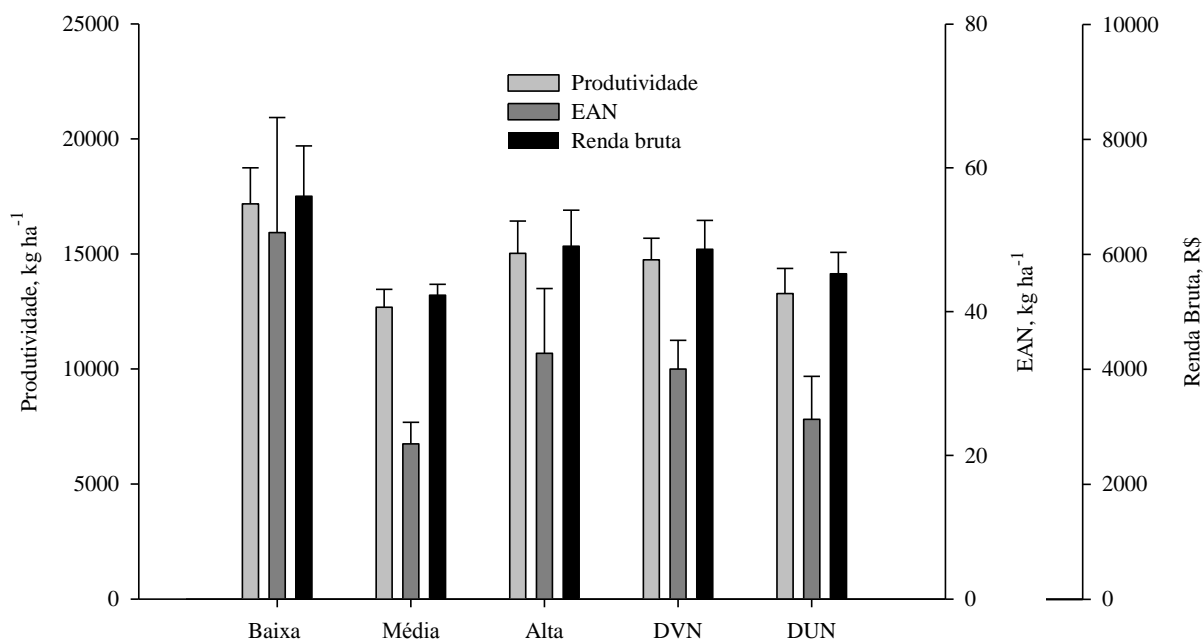


Figura 7. Produtividade, eficiência agrônômica do fertilizante nitrogenado e renda bruta em diferentes classes de fertilização à DVN e DUN. EAN= eficiência agrônômica do N; DUN= dose uniforme de N; DVN= dose variada de N prescrita pelo sensor óptico.

Ainda, a classe de baixa dose de N prescrita com uso da estratégia DVN promoveu um aumento de 26,9 % na renda bruta em relação à DUN. Portanto, a redução da dose de N para as plantas com maiores IV no estágio V8 de desenvolvimento da cultura foi uma estratégia eficiente, especialmente a partir das perspectivas econômica e ambiental.

Na classe de alta dose de N prescrita, o aumento de 11,6 % na dose de N em relação à dose de N de referência promoveu um incremento de 11,1 % na produtividade de grãos de milho em relação à DUN. Além disso, verificou-se que a classe de alta dose de N prescrita promoveu incrementos de 41,7 % na EAN e 12,8 % na renda bruta em relação à DUN. Estes resultados sugerem uma recuperação da planta quando ao estado de deficiência nutricional aparente em relação a outras plantas da área cultivada no estágio V8 de desenvolvimento

quando foi realizada a aplicação de fertilizantes à DVN, porém abaixo dos valores obtidos pelas plantas aparentemente bem nutridas que receberam dose inferior de N pela prescrição a DVN. Resultados similares foram relatados para fertilizações à DVN por Tubaña et al. (2008) para a cultura do milho e Mayfield e Trengove (2009) para a cultura do trigo.

Quando comparado a alta dose de N prescrita com a baixa dose de N prescrita, obteve-se uma redução de produtividade de 10,57 % mesmo com o aumento de 21,1 % da dose de N, o que acarretou na redução da EAN de 32,7 % e da renda bruta de 11,95 %, demonstrando que a manutenção das plantas em estado nutricional adequado durante o desenvolvimento da cultura é mais eficiente do que o aumento da dose de fertilizante para manter o potencial produtivo.

Desta forma, a classe de alta dose de N prescrita obteve indicadores mais baixos do que a classe de baixa dose de N prescrita, mas maiores do que a classe de média dose de N prescrita. Enquanto que a classe de dose média de N prescrita obteve indicadores semelhantes à DUN, como esperado.

De forma geral, o resultado de EAN apresentada pelas estratégias de fertilização nitrogenada à DUN e DVN foi de 25,0 e 32,0 kg kg⁻¹, respectivamente (Figura 7). Assim, a DVN incrementa a EAN em 32,6 % em relação à DUN. Anteriormente, Raun et al. (2005), Singh et al. (2006) e Maine et al. (2009) também relataram aumentos na EUN com DVN comparada com a DUN. Além disso, a EAN obtida com a estratégia DVN é superior a 30 kg kg⁻¹, sugerida por Dobermann (2005) e Snyder e Bruulsema (2007), como um indicador de sistemas de fertilização bem manejados. Enquanto que a DUN apresentou valor de EAN abaixo deste limite.

Para a DVN ser uma estratégia eficaz de fertilizantes, duas condições principais devem ser atendidas: a) a diminuição da dose de N para as plantas com alto IV, pode resultar em redução na produtividade de grãos, mas não deve comprometer o retorno econômico, e b) o aumento da dose de N para plantas com baixo IV deverá resultar um aumento na produtividade de grãos capaz de compensar o aumento do custo da dose de N adicional. Os resultados obtidos sugerem que ambas as condições foram atendidas, resultando no aumento da EAN e renda bruta em relação à DUN (Figura 7). Além disso, a DVN foi uma estratégia eficiente do ponto de vista ambiental, porque reduziu os riscos associados à superfertilização nitrogenada.

CONCLUSÕES

1. A nutrição do milho e a produtividade de grãos foram influenciadas positivamente pela fertilização nitrogenada, com uma resposta linear à taxa de N até 210 kg ha⁻¹, porém a dose utilizada para a avaliação das estratégias à DVN e DUN foi de 140 kg ha⁻¹ o que pode ter causado subdosagem na prescrição pelo sensor óptico e interferindo nos resultados obtidos com a estratégia à DVN.
2. O sensor óptico de culturas utilizado mostrou uma forte relação com o N absorvido e a produção de matéria seca pelo milho.
3. A dose variada de N, embora sem aumentar a produtividade de grãos de milho em relação à dose uniforme de N, aumentou a quantidade de N acumulado pelas plantas e a EAN reduzindo o risco de impacto ambiental da superfertilização.
4. A estratégia de dose variada de N mostrou-se eficiente quanto ao uso do N quando avaliada pela redução e aumento da dose de N prescrita pelo sensor óptico, conforme o estado nutricional da cultura.

LITERATURA CITADA

- Amado, T.J.C., J. Mielniczuck, and C. Aita. 2002. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema de plantio direto. R. Bras. Ci. Solo. 26:241-248.
- Amaral, L.R.; and J.P. Molin. 2011. Sensor óptico no auxílio à recomendação de adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. Pesq. Agropec. Bras. 46:1633-1642. doi:10.1590/S0100-204X2011001200008
- ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos. Agroconsult. Estimativa de 2011 a 2016. Available at www.anda.org.br/multimedia/investimentos.pdf. 30 de Jul. 2013.

Argenta, G., P.R.F. Silva, and L. Sangoi. 2004. Leaf relative chlorophyll content as an indicator parameter to predict nitrogen fertilization in maize. *Ci. Rural.* 34:1379-1387. doi:10.1590/S0103-84782004000500009

Basso, C.J., and C.A. Ceretta. 2000. Manejo do nitrogênio no milho em sucessão a plantas de cobertura de solo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo.* 24:905-915.

Boyer, C.N., B.W. Brorsen, J.B. Solie, and W.R. Raun. 2011. Profitability of variable rate nitrogen application in wheat production. *Precision Agric.* 12:473-487. doi: 10.1007/s11119-010-9190-5

Bragagnolo, J., T.J.C. Amado, R.S. Nicoloso, J. Jasper, J. Kunz, and T.G. Teixeira, T.G. 2013a. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: I. Plant nutrition and dry matter production. *R. Bras. Ci. Solo.* 37:1288-1298. doi:10.1590/S0100-06832013000500018

Bragagnolo, J., T.J.C. Amado, R.S. Nicoloso, A.L. Santi, J.E. Fiorin, and F.M. Tabaldi. 2013b. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: II. Indices of fertilizer efficiency and corn yield. *R. Bras. Ci. Solo.* 37:1299-1309. doi:10.1590/S0100-06832013000500019

Casa, R., A. Cavalieri, and B. Locascio. 2011. Nitrogen fertilization management in precision agriculture: a preliminary application example on maize. *Ital. J. Agron.* 6:23-27. doi:10.4081/ija.2011.e5

Cassman, K.G., A. Dobermann, and D.T. Walters. 2002. Nitrogen use efficiency, and nitrogen management. *Ambio.* 31:132-144.

CQFS–RS/SC - Comissão de Química e Fertilidade do Solo. 2004. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10. ed. Sociedade Brasileira de Ciências do Solo. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. Porto Alegre.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. 2013. Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2012/2013. Décimo segundo levantamento, Setembro/2013. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília. Available at www.conab.gov.br. 12 de Out. 2013.

COTRIJAL - Cotrijal Cooperativa Agropecuária e Industrial. 2011. Available at www.cotrijal.com.br. 30 de Fev. 2011.

Dobermann, A. Nitrogen Use Efficiency – State of the Art. 2005. p. 1-18. *In* IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers. 28-30 Jun. 2005. Frankfurt, Germany.

Ferguson, R.B., G.W. Hergert, J.S. Schepers, J.E. Gotway, J.E. Cahoon, and T.A. Peterson. 2002. Site-specific nitrogen management of irrigated maize. Yield and soil residual nitrate effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:544-553.

Ferreira, D.F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. 2000. p. 255-258. *In* Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria, 45. Jun. 2000. UFSCar. São Carlos, Brasil.

Fixen, P.E., J. Jiyun, K.N. Tiwari, and M.D. Stauffer. 2005. Capitalizing on multi-element interactions through balanced nutrition — A pathway to improve nitrogen use efficiency in China, India and North America. *Science in China Series C: Life Sciences.* 48:780-790.

Giotto, E. Sistema CR - Campeiro 7.0. 2011. Available at www.crcampeiro.net. 14 Out. 2011.

Grohs, D.S., C. Bredemeier, C.M. Mundstock, and N. Poletto. 2009. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor Greenseeker. *Eng. Agríc.* 29:101-112. doi:10.1590/S0100-69162009000100011.

Gregoret, M.C., J. Dardanelli, R. Bongiovanni, and M. Diaz-Zorita. 2006. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un haplusol. *Ci. Suelo. Argentina.* 24:147-159.

Grove, L.T., K.D. Ritchey, and G.C. Naderman Junior. 1980. Nitrogen fertilization of maize on Oxisol of the cerrado of Brasil. *Agron. J.* 27:261-265.

Heege, H.J., S. Reusch, and E. Thiessen. 2008. Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. *Prec. Agric.* 9:115–131. doi:10.1007/s11119-008-9055-3

Jakelaitis, A., A.A. Silva, and L.R. Ferreira. 2005. Efeitos do nitrogênio sobre o milho cultivado em consórcio com *Brachiaria brizantha*. *Acta Scientiarum. Agronomy.* 27:39-46.

Jasper, J., S. Reusch, and A. Link. 2009. Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination—impact of seed rate, variety and growth stage. p. 23–30. *In* Van Henten, E.J.; D. Goense, and C. Lokhorst (eds). *Precision agriculture 2009. Proceedings of the 7th European Conference on Precision Agriculture.* 7. 6-8 Jul. 2009. Wageningen, The Netherlands.

Jørgensen, J.R., and R.N. Jørgensen. 2001. Impact on grain quality parameters when nitrogen is ‘sensor applied’ by the ‘Hydro Precise System’. “Precise system”. p. 929–934. *In* Grenier, G.S., and S. Blackmore (eds). *Proceedings of the 3th European Conference on Precision Agriculture.* 3. 18-21 Jul. 2001. Montpellier, France.

Jørgensen, J.R., and R.N. Jørgensen. 2007. Uniformity of wheat yield and quality using sensor assisted application of nitrogen. *Prec. Agric.* 8:63–73. doi:10.1007/s11119-006-9029-2

Khosla, R., K. Fleming, J.A. Delgado, T.M. Shaver, and D.G. Westfall. 2002. Use of site-specific management zones to improve nitrogen management for precision agriculture. *J. Soil and Water Conserv.* 57:513-518.

Koppen, W.P. 1948. *Climatologia, com un estudio de los climas de la tierra.* Fondo de Cultura Económica. México.

Lázaro, R.L., A.C.T. Costa, K.F.S. Silva, M.V.M Sarto, and J.B. Duarte Júnior. 2013. Produtividade de milho cultivado em sucessão à adubação verde. *Pesq. Agropec. Trop. Goiânia.* 43:10-17.

Lea, P.J., and J.F. Morot-Gaudry (eds). 2001. *Plant Nitrogen.* Springer-Verlag, Berlin.

- Lobell, D.B. 2007. The cost of uncertainty for nitrogen fertilizer management: a sensitivity analysis. *Field Crop Res.* 100: 210–217. doi:10.1016/j.fcr.2006.07.007
- Maine, N., J. Lowenberg-Deboer, W.T. Nell, and Z.G. Alemu. 2009. Impact of variable-rate application of nitrogen on yield and profit: a case study from South Africa *Precision Agric.* Published online Sep. 2009. doi:10.1007/s11119-009-9139-8.
- Malavolta, E., G.C. Vitti, and S.A. Oliveira. 1997. *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2.ed. POTAFOS. Piracicaba.
- Marchner, H.1995. *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press. San Diego.
- Martin, K.L., K. Girma, K.W. Freeman, R.K. Teal, B. Tubaña, D.B. Arnall, B. Chung, O. Walsh, J.B. Solie, M.L. Stone, and W.R. Raun. 2007. Expression of variability in corn as influenced by growth stage using optical sensor measurements. *Agron. J.* 99:384–389. doi:10.2134/agronj2005.0268
- Mayfield, A.H., and S.P. Trengove. 2009. Grain and protein responses in wheat using the N-Sensor for variable rate application. *Crop Past. Sci.* 60:818-823. doi:10.1071/CP08344
- Miranda, R.A.; J.O. Duarte; and J.C. Garcia. 2012. *Cultivo de milho. Sistema de produção*. Ed 8. EMBRAPA. Available at: www.sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_8ed/mercado. 02 Aug. 2013.
- Mutanga, O., and A.K. Skidmore. 2004. Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation. *Intern. J. Remote Sensing.* 25:3999–4014. doi:10.1080/01431160310001654923
- Ortiz, A.H.T., R.S. Okumura, D.C. Mariano, and A.M. Shono. 2011. Análise econômica da aplicação de duas fontes nitrogenadas na cultura do milho sob plantio direto. *In Encontro Internacional de Produção Científica*, 7. 25-28 Out. 2011. CESUMAR – Centro Universitário de Maringá. Maringá, Paraná, Brasil.

Portz, G., J.P. Molin, and J. Jasper. 2012. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. *Prec. Agric.* 13:33-44. doi: 10.1007/s11119-9243-4

Raun, W.R., and G.V. Johnson. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.* 91:357-63.

Raun, W.R., J.B. Solie, G.V. Johnson, M.L. Stone, R.W. Mullen, K.W. Freeman, W. Thomason, and E. Lukila. 2002. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agron. J.* 98:815-820.

Raun, W.R., J.B. Solie, M.L. Stone, K.L. Martin, K.W. Freeman, R.W. Mullen, H. Zhang, J.S. Shepers, and G.V. Johnson. 2005. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 36:2759-2781. doi:10.1080/00103620500303988

Santi, A.L., T.J.C. Amado, M.R. Cherubin, T.N. Martin, J.L. Pires, L.P. Della Flora, and C.J. Basso. 2012. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. *Pesq. Agropec. Bras.* 47:1346-1357. doi:10.1590/S0100-204X2012000900020

Scharf, P.C., D.K. Shannon, H.L. Palm, K.A. Sudduth, S.T. Drummond, N.R. Kitchen, L.J. Mueller, V.C. Hubbard, and L.F. Oliveira. 2011. Sensor-based nitrogen applications outperformed producer-chosen rates for corn in on-farm demonstrations. *Agron. J.* 103:1683-1691. doi:10.2134/agronj2011.0164

Singh, I., A.K. Srivastava, P. Chandna, and R.K. Gupta. 2006. Crop sensors for efficient nitrogen management in sugarcane: potential and constraints. *Sugar Tec.* 8:299-302. doi:10.1007/BF02943572

Snyder, C.S., and T.W. Bruulsema. 2007. Nutrient use efficiency and effectiveness in North America: Indices of agronomic and environmental benefit. IPNI. Norcross, Georgia.

Soil Survey Staff. 2010. Keys to soil taxonomy. 11a ed. USDA-Natural Resources Conservation Service. Washington DC.

Stanford, G. 1973. Rationale for optimum nitrogen fertilization in corn production. *J. Environ. Qual.* 2:159-166.

Tedesco, M.J., C. Gianello, C.A. Bissani, H. Bohnen, and S.J. Volkweiss. 1995. *Análises de solo, plantas e outros materiais*. 2. ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Solos. Porto Alegre.

Tubaña, B.S., D.B. Arnall, O. Walsh, B. Chung, J.B. Solie, K. Girma, and W.R. Raun. 2008. Adjusting midseason nitrogen rate using a sensor-based optimization algorithm to increase use efficiency in corn. *J. Plant Nutrition*. 31:1393-1419. doi:10.1080/01904160802208261

Wolschick, D., R. Carlesso, M.T. Petry, and S.O. Jadoski. 2003. Adubação nitrogenada na cultura do milho no sistema plantio direto em ano com precipitação pluvial normal e com “El Niño”. *R. Bras. Ci. Solo*. 27:461-468.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em função dos resultados obtidos pode-se inferir que nos três experimentos realizados o milho foi responsivo as doses de N aplicadas, porém as condições de solo e clima intrínsecas de cada área afetaram os resultados. Obtendo-se maiores produtividades médias na área 3, onde as precipitações foram regulares e em volume adequado, seguida da área 1 que apresentou elevada quantidade de precipitação nos estádios iniciais de desenvolvimento, e a menor produtividade média foi observada na área 2, que apresentou déficit hídrico.

O sensor óptico foi capaz de determinar, no estádio V8 de desenvolvimento, a existência de variabilidade entre as plantas de milho dentro dos experimentos, expresso pela alta variabilidade do índice de vegetação observadas nas três áreas, sendo maior nas áreas 1 e 2 do que na área 3, quando avaliadas pelo coeficiente de variação e desvio padrão. Estas determinações de índice de vegetação foram altamente relacionadas com a quantidade de N absorvido pela cultura e produção de matéria seca do milho. Demonstrou ainda ser relacionado, em menor grau, com os demais atributos vegetativos avaliados, sendo positivamente com as leituras do clorofilômetro manual e negativamente com o teor de N no tecido vegetal.

Através dos resultados observou-se que em estádios mais avançados do desenvolvimento da cultura, o sensor apresenta uma perda de eficiência (saturação) na sua relação entre o índice de vegetação com a quantidade de N absorvido e produção de matéria seca do milho. Este efeito foi observado para valores acima de 70 kg ha^{-1} e 2500 kg ha^{-1} para N absorvido e matéria seca, respectivamente. Considerando que o milho absorveu a maior parte do N após o estádio de desenvolvimento V8, a utilização do sensor óptico de plantas neste estádio mostrou-se uma estratégia viável para a fertilização nitrogenada a dose variada, aumentando o sincronismo entre a demanda da cultura e disponibilidade de N e reduzindo os riscos de perdas de N. Porém, a utilização do sensor óptico para a prescrição da dose variada de fertilizante nitrogenado em situação de saturação do índice de vegetação deve ser melhor estudada.

A utilização de fertilização nitrogenada a dose variada no milho com base na prescrição do sensor óptico possibilitou a melhoria nas condições nutricionais da cultura expressa pelo aumento significativo do N absorvido em 11,8 % observado na área 3, porém o incremento médio de 6,1 % (654 kg ha^{-1}) na produtividade de grãos de milho com uso da dose variada de N não se mostrou estatisticamente significativo quando comparado à dose uniforme de N.

A eficiência do uso do N foi baixa na área 2 em vista da restrição hídrica observada e para as áreas 1 e 3 próxima aos níveis geralmente encontrados na literatura. Nestas condições, a dose variada mostrou-se mais eficiente quanto ao uso do N do que a dose uniforme. Analisando-se a estratégia de redução e aumento da dose de N prescrita pelo sensor óptico, conforme o estado nutricional da cultura para a dose variada de N na área 3, ambas as situações mostraram-se eficientes quanto ao uso do N, demonstrando que a dose variada de N é uma estratégia eficiente do ponto de vista ambiental, por reduzir os riscos associados à superfertilização nitrogenada. Porém, na situação estudada a técnica de redução da dose, em relação a dose de N de referência, para plantas supostamente mais bem nutridas pode ter ocasionado interferência nos resultados pelo fato do milho ter apresentado incremento linear até 210 kg ha⁻¹ para o N absorvido e produtividade de grãos.

Desta forma, sugere-se que mais pesquisas devam ser realizadas para avaliar os resultados das fertilizações a dose variada de N, baseada neste sensor óptico, em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, assim como desenvolver pesquisas em áreas com potenciais de produtividade distintas, a fim de determinar a influência da dose variada nestas distintas condições.

Assim mais estudos devem ser realizados para que possa ser possível averiguar se a estratégia de fertilização nitrogenada à dose variada em tempo real é adequada em todas as situações, sugerindo-se serem estudados:

- Resposta da cultura para cada zona de manejo e/ou potencial de produtividade dentro de uma mesma área agrícola.
- Comportamento do sensor óptico quanto à identificação das diferentes zonas de manejo e à prescrição da dose em tempo real, levando-se em consideração estas zonas mais homogêneas e a possibilidade de diferentes respostas à fertilização nitrogenada.
- Estudos com diferentes fontes de N mais modernas e combinadas com a estratégia de dose variada de N, visando ao menor impacto ambiental pela redução das perdas de N por lixiviação e volatilização.
- Avaliar a eficiência das doses menores e maiores prescritas pelo sensor óptico à dose variada de N em diferentes áreas agrícolas, a fim de avaliar em quais situações as mesmas são adequadas.

LITERATURA CITADA

- ARGENTA, G. et al. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 109-119, 2003.
- AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Nitrato no solo com a aplicação de dejetos líquidos de suínos no milho em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 195-205, 2008.
- AMARAL, L. R. **Sensor ótico no auxílio à recomendação de nitrogênio para a cultura da cana de açúcar**. 2010. 81p. (Dissertação de Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. 2010.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Cadeia produtiva do milho**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Política Agrícola, Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura. Brasília, IICA, MAPA/SPA, 2007. 108p.
- BRAGAGNOLO, J. et al. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: I. Plant nutrition and dry matter production. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1288-1298, 2013a.
- BRAGAGNOLO, J. et al. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: II. Indices of fertilizer efficiency and corn yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1299-1309. 2013b.
- BREDEMEIER, C. et al. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 7, p. 1147-1154, 2013.
- CANTARELLA, H. et al. Ammonia volatilization from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 4, p. 397-401, 2008.
- CASA, R.; CAVALIERI, A.; LO CASCIO, B. Nitrogen fertilization management in precision agriculture: a preliminary application example on maize. **Italian Journal of Agronomy**, Viterbo, v. 6, p. 23-27, 2011.
- CERETTA, C. A. et al. Dejeito líquido de suínos: I - perdas de nitrogênio e fósforo na solução escoada na superfície do solo, sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 6, p. 1296-1304, 2005.
- COELHO, A.M; FRANÇA, G.E.; BAHIA FILHO, A.F.C. **Nutrição e adubação do milho**. 2006. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho/feraduba.htm>>. Acesso em: 23 jan. 2012.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS-RS/SC. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3. ed. Passo Fundo: SBCS- Núcleo Região Sul/ UFRGS, 2004. 400p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2013/2014**. Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: CONAB, 2014. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 5 de Fev. 2014.

CRUZ, J. C. et al. Resposta de cultivares de milho à adubação nitrogenada em cobertura. **EMBRAPA**, Sete Lagoas, 2005. 65p. (Comunicado Técnico, 116).

FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D. Milho: ecofisiologia e rendimento. In: **Tecnologia da produção de milho 1**. Piracicaba, 1997. Trabalhos Apresentados. Piracicaba, 1997. p. 157-170.

FERGUSON, R. B. et al. Site-specific nitrogen management of irrigated maize: yield and soil residual nitrate effects. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 66, p. 544-553, 2002.

GADIOLI, J. L. et al. Temperatura do ar, rendimento de grãos de milho e caracterização fenológica associada à soma calórica. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 3, p. 377-383, 2000.

GREGORET, M. C. et al. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un haplustol. **Ciencia del Suelo**, Buenos Aires, v. 24, n. 2, p. 147-159, 2006.

GROHS, D. S. et al. Modelo para estimative do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor Greenseeker. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n. 1, p. 101-112, 2009.

HURTADO, S. M. C.; et al. Variação espacial da resposta do milho à adubação nitrogenada de cobertura em lavoura no cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 3, p. 300-309, 2009.

JASPER, J.; REUSCH, S.; LINK, A. Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination–impact of seed rate, variety and growth stage. In: VAN HENTEN, E.J.; GOENSE, D. & LOKHORST, C., eds. Precision agriculture, 7., 2009. **Proceedings...** Wageningen, The Netherlands, Proceedings: Academic Publishers, 2009. p. 23–30.

JØRGENSEN, J. R.; JØRGENSEN, R. N. Impact on grain quality parameters when nitrogen is ‘sensor applied’ by the ‘Hydro Precise System’. “Precise system”. In GRENIER, G. S. & BLACKMORE, S., ed. Proceedings of the 3th European Conference on Precision Agriculture. 3., 2001. Montpellier. **Proceedings...** Montpellier, France, Proceedings: Academic Publishers, 2001. p. 929–934.

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

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDORFER, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: I. Efeito da irrigação e substituição parcial da uréia por sulfato de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 481-487, 1997.

LINK, A.; JASPER, J.; REUSCH, S. Suitability of different crop parameters for the determination of site-specific nitrogen fertilizer demand. In: STAFFORD, J. V., ed.

PRECISION AGRICULTURE 5., 2005. Wageningen. **Proceedings...** Wageningen, The Netherlands, 2005. Proceedings: Academic Publishers, 2005. p. 297-302.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da produção de milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS. 2006. 10 p. (Circular Técnica, 76).

MARTIN, K. L.; et al. Expression of variability in corn as influenced by growth stage using optical sensor measurements. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, p. 384-389, 2007.

MAYFIELD, A. H.; TRENGOVE, S. P. Grain and protein responses in wheat using the N-Sensor for variable rate application. **Crop & Pasture Science**, Australia, v. 60, p. 818-823, 2009.

PORTZ, G.; MOLIN, J. P.; JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Netherlands, v. 13, p. 33-44, 2012.

POVH, F. P et al. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n.8, p. 1075-1083, 2008.

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

SINGH, J. et al. The role of inhibitors in the bioavailability and mitigation of nitrogen losses in grassland ecosystems. In: NAIDU, R., ed. **Chemical Bioavailability in Terrestrial Environment**. Amsterdam: Elsevier, 2008. p. 329-362.

SINGH, J. et al. Crop sensors for efficient nitrogen management in sugarcane: Potential and constraints. **Sugar Tech**, India, v. 8, n. 4, p. 299-302, 2006.

SUBBARAO, G. V. Scope and Strategies for Regulation of Nitrification in Agricultural Systems - Challenges and Opportunities. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Japan, v. 25, p. 303-335, 2006.

RAUN, W. R. & JOHNSON, G. V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, p. 357-63, 1999.

RAUN, W. R. et al. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, England, v. 36, n. 19-20, p. 2759-2781, 2005.

RAMBO, L. et al. Adequação de doses de nitrogênio em milho com base em indicadores de solo e planta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 3, p. 401-409, 2008.