

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

CLAUDIO KAPP JUNIOR

**SENSORIAMENTO REMOTO COMO FERRAMENTA PARA AUXILIAR NA
PRESCRIÇÃO DE FERTILIZANTE NITROGENADO EM CEREAIS**

**PONTA GROSSA – PR
2016**

CLAUDIO KAPP JUNIOR

**SENSORIAMENTO REMOTO COMO FERRAMENTA PARA AUXILIAR NA
PRESCRIÇÃO DE FERTILIZANTE NITROGENADO EM CEREAIS**

**Tese apresentada à Universidade Estadual de
Ponta Grossa para a obtenção do Título de
Doutor em Agronomia: Área de concentração
em Agricultura.**

Linha de Pesquisa: Uso e manejo de solos.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires.

PONTA GROSSA – PR

2016

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

K17 Kapp Junior, Claudio
Sensoriamento remoto como ferramenta
para auxiliar na prescrição de
fertilizante nitrogenado em cereais/
Claudio Kapp Junior. Ponta Grossa, 2016.
109f.

Tese (Doutorado em Agronomia - Área de
Concentração: Agricultura), Universidade
Estadual de Ponta Grossa.
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero
Caires.

1.Agricultura de precisão. 2.Modelagem.
3.Eficiência agronômica. 4.GreenSeeker.
5.Radiação fotossinteticamente ativa.
I.Caires, Eduardo Fávero. II.
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Doutorado em Agronomia. III. T.

CDD: 631



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Tese: "Sensoriamento remoto como ferramenta para auxiliar na prescrição de fertilizante nitrogenado em cereais".

Nome: Claudio Kapp Junior

Orientador: Eduardo Fávero Caires

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

Prof. Dr. Eduardo Lima

Prof. Dr. Fernando José Garbuio

Dr. Fabricio Pinheiro Povh

Prof. Dr. Helio Antonio Wood Joris

Data da Realização: 23 de dezembro 2016.

AGRADECIMENTOS

Sou grato a Deus pelo dom da vida e por todas as graças que tenho a oportunidade de realizar, neste momento em especial a conclusão deste trabalho.

Eu me lancei ao desafio de desenvolver uma Tese de Doutorado em uma área que não é comum à minha formação de graduação devido ao desejo de aprender mais sobre a Ciência da Agronomia. Esta Ciência que fascina pelos diversos caminhos que apresenta e todos com tamanha importância para o desenvolvimento da humanidade. Descobri neste tempo que a união de diferentes áreas resulta em sinergia para o avanço na fronteira do conhecimento.

Para chegar ao fim deste trabalho em cada etapa foi necessária a participação de pessoas que talvez nem percebessem o quanto eram importantes em determinados momentos. Gostaria de lembrar agora destas pessoas como forma singela de reconhecer a sua importância.

A minha família: pais Claudio e Sueli, irmãos Guilherme e Camila, avós Pedro e Cecília, que durante todo o desenvolvimento do trabalho me davam o conforto de poder errar e saber que se nada desse certo eu teria seu apoio para recomeçar de onde quer que fosse. Ter este amparo facilita os momentos mais difíceis deste caminho. Neste espaço também reservo um agradecimento a minha namorada Amanda que a partir da metade do trabalho me reservou as palavras certas para motivar nos momentos exatos e necessários.

Eu agradeço a confiança que recebi do meu orientador Professor Dr. Eduardo Fávero Caires. Se não fosse ele acreditar que eu poderia desenvolver esta pesquisa, seria muito difícil minha entrada neste Programa de Pós Graduação. Agradeço a paciência, as críticas construtivas, os momentos dispostos para a discussão dos experimentos, das análises, da construção da Tese. Terei para sempre essa referência de condução de aulas, pesquisa e orientação como inspiração para adotar em minha postura profissional.

Agradeço ao Programa de Pós Graduação em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa. Em especial à Professora Dra. Alaine Margarete Guimarães por continuar mantendo abertura para parceria mesmo após o termino da co-orientação do mestrado e pelo auxílio com o empréstimo de aparelhos para o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço aos amigos que são a extensão de minha família, por sempre estarem ao lado proporcionando momentos de alegria que são extremamente importantes e necessários ao longo de qualquer jornada.

Ao pessoal do laboratório de solos, aos orientados de iniciação científica e Pós-Graduação do Professor Eduardo, com os quais passei um período do curso, e demonstraram-se sempre prestativos para ajudar.

Agradeço à Universidade Estadual de Ponta Grossa, a todos que mantive contato no decorrer do curso, principalmente os professores do Programa de Pós Graduação em Agronomia, com os quais tive a oportunidade de ser avaliado nestes anos.

SENSORIAMENTO REMOTO COMO FERRAMENTA PARA AUXILIAR NA PRESCRIÇÃO DE FERTILIZANTE NITROGENADO EM CEREAIS

RESUMO: O desenvolvimento de modelos para converter leitura de refletância espectral (LRE) em dose de fertilizante nitrogenado para cereais, bem como identificar fatores que podem interferir nestas medidas, pode aumentar a eficiência da utilização desta técnica. Este trabalho teve os objetivos de (i) estudar fatores que podem influenciar nas leituras de refletância e diminuir a precisão na indicação da dose de fertilizante nitrogenado, e (ii) propor um modelo para a prescrição da necessidade de nitrogênio (N) para a cultura do milho, a partir de dados de leitura de refletância espectral. Para isso avaliaram-se (i) as influências da altura de posicionamento do sensor, do horário de operação e do estágio de desenvolvimento da cultura do trigo na LRE, (ii) as influências do estágio de desenvolvimento, da população de plantas de milho e da cobertura do solo na LRE; e (iii) também foi proposto um modelo para prescrição de doses de N em cobertura para a cultura do milho combinando LRE com eficiência agronômica do N em cobertura (EAc). O sensoriamento remoto foi realizado por meio do sensor GreenSeeker e as LRE convertidas em índices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e INSEY (*In-Season Estimated Yield*). Na cultura do trigo observou-se que (i) houve diferença de valores de NDVI em relação às alturas nas quais o sensor GreenSeeker foi posicionado, sendo que entre o espaço avaliado, de 10 cm até 120 cm de altura do dossel da cultura, a média de valores estabilizou a partir de 30 cm até 120 cm de altura do dossel da cultura; (ii) antes da aplicação de N em cobertura, o NDVI apresentou diferença significativa entre os estádios de desenvolvimento da cultura; após a aplicação N em cobertura, o NDVI apresentou diferença significativa somente em estágio mais avançado de desenvolvimento da cultura; e (iii) as médias de LRE foram diferentes de acordo com os horários de leitura, com distinta radiação fotossinteticamente ativa, na seguinte ordem: noite > manhã > tarde. Na cultura do milho observou-se que: (i) os valores de NDVI apresentaram diferença significativa em todos os níveis de N aplicados na semeadura para todos os estádios de desenvolvimento da cultura até o momento da aplicação de N em cobertura; (ii) o NDVI não foi influenciado pela cobertura do solo, e aumentou de modo linear ($p < 0,01$) com o aumento da população de milho no estágio V₅. Identificou-se uma relação quadrática entre o ganho de produtividade de milho com adição de N em cobertura e a EAc. Essa relação foi utilizada para propor o modelo de prescrição de N em cobertura a partir de LRE. Os resultados do modelo proposto mostraram produtividades próximas àsquelas máximas indicadas pela equação de regressão, e resultado econômico próximo àquele obtido com a dose econômica, respeitando a limitação de produtividade encontrada pela situação de campo. Concluiu-se que o sensoriamento remoto apresenta potencial para melhorar a eficiência de aplicação de fertilizantes nitrogenados em cereais. Fatores que interferem na LRE devem ser controlados, caso contrário podem afetar a quantidade de N indicada pelos modelos. A EAc é um indicador importante e sua utilização pode aumentar a eficácia dos modelos.

Palavras-chave: Agricultura de precisão, modelagem, eficiência agronômica, GreenSeeker, Radiação Fotossinteticamente Ativa.

FACTORS THAT MAY INFLUENCE SPECTRAL REFLECTIVE READING AND MODEL FOR PRESERVING NITROGEN FERTILIZER IN CEREALS FROM REMOTE SENSING

Abstract: The development of models to convert spectral reflectance measurement to Nitrogen (N) rate in cereals, as well as to identify factors that may interfere with these measurements, may increase the efficiency of this technique. This study aimed to: (i) study factors that can influence the reflectance measure and decrease the accuracy of N rate indication, and (ii) propose a model for the prescription of N requirements for the maize crop, from spectral reflectance measure data. For that, it was evaluated: (i) the influence of the positioning height of the sensor, the hours of operation and the stage of development of the wheat crop in spectral reflectance; (ii) the influence of the stage of development, the maize plant population and the soil cover in spectral reflectance; (iii) it was also proposed a model for prescription N rates in topdressing for maize combining spectral reflectance measure with Agronomic Efficiency of Nitrogen in Topdress (EANT). Spectral Reflectance data was obtained by commercial ground sensor GreenSeeker and converted into NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and INSEY (In-Season Estimated Yield) indices. In the wheat crop, it was observed that: (i) there were differences in NDVI values in relation to the heights in which the GreenSeeker sensor was positioned. Between the evaluated space, from 10 cm to 120 cm of height of the culture canopy, the average values stabilized from 30 cm up to 120 cm in height; (ii) before the N topdress application, NDVI presented a significant difference between the stages of development of the crop. After N topdress application the NDVI presented significant difference only at a more advanced stage of development of the crop; (iii) the averages of spectral reflectance measurement were different according to the reading times, with distinct photosynthetically active radiation, in the following order: night > morning > afternoon. In the maize crop, it was observed that: (i) NDVI values showed a significant difference in all levels of N applied at the sowing for all stages of development of the crop until the topdress N application; (ii) the NDVI was not influenced by soil cover, and increased linearly ($p < 0.01$) with the increase of the maize population in the V₅ stage. It was identified a quadratic relation between maize productivity gain with N topdress and EANT. This relationship was used to propose the model of prescription of N in coverage from spectral reflectance measurement. The results of the proposed model showed productivity close to the maximum values indicated by the regression equation, and economic result close to that obtained with the economic dose, respecting the productivity limitation found by the field situation. It was concluded that remote sensing presents potential to improve the efficiency of application of nitrogen fertilizers in cereals. Factors that interfere with spectral reflectance measurement should be controlled; otherwise they may affect the amount of N indicated by the models. The EANT is an important indicator and its use can increase the effectiveness of the models.

Keywords: precision agriculture, modeling, agronomic efficiency, GreenSeeker, photosynthetically active radiation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Representação esquemática da rota de assimilação do nitrogênio nas raízes e folhas de plantas. (GLN: glutamina; GLU: glutamato; RN: redutase do nitrato; RNi:redutase do nitrito; GS: sintetase da glutamina; GOGAT: sintetase do glutamato; T: transportador).....19
- Figura 2: relação entre o tempo de adoção do sistema de plantio direto com o acúmulo de carbono, e o comportamento de imobilização e mineralização do N. 22
- Figura 3: Espectro eletromagnético.....34
- Figura 4: Diagrama conceitual ilustrando os espectros de refletância de uma folha saudável. 36
- Figura 5: Precipitação pluvial (mm) e eventos ocorridos durante a realização do experimento com a cultura do trigo no município de Palmeira (PR).....52
- Figura 6: Precipitação pluvial ocorrida durante a realização do experimento da cultura do milho na Fazenda Dona Matilde, em Palmeira (PR).....55
- Figura 7: Precipitação pluvial ocorrida durante a realização do experimento da cultura do milho na Fazenda Escola do CESCAGE. 57
- Figura 8: Matéria seca da parte aérea da cultura do trigo em função das doses de nitrogênio aplicadas em cobertura. **: $P < 0,01$. As barras verticais indicam o desvio padrão da média. 59
- Figura 9: Produtividade de grãos de trigo em função das doses de nitrogênio aplicadas em cobertura. **: $P < 0,01$. As barras verticais indicam o desvio padrão da média. 59
- Figura 10: Valores de NDVI em função das doses de nitrogênio aplicadas na semeadura da cultura do trigo, no momento em que foi realizada aplicação de N em cobertura (Estádio D24 de ZADOCKS, CHANG e KONZAK, 1974). **: $P < 0,01$. As barras verticais indicam o desvio padrão da média.....60
- Figura 11: Valores médios de NDVI obtidos nos Estádios D17, D20 e D24 (ZADOCKS, CHANG e KONZAK, 1974), de acordo com as doses de nitrogênio aplicadas na semeadura da cultura do trigo. **: $P < 0,01$. As barras verticais indicam o desvio padrão da média. 62
- Figura 12: Valores médios de NDVI em função das doses de nitrogênio aplicadas em cobertura na cultura do trigo. *: $P < 0,05$. As barras verticais indicam o desvio padrão da média.....63
- Figura 13: Valores de NDVI, mensurados no estágio Decimal 50 (Primeira espiguetas da inflorescência recém visível) da escala fenológica decimal de Zadocks, Chang e

Konzak (1974), em função das doses de nitrogênio aplicadas em cobertura na cultura do trigo. $**P < 0,01$. As barras verticais indicam o desvio padrão da média..	64
Figura 14: Valores de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) observados no período da manhã.	64
Figura 15: Valores de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) observados no período da tarde.	65
Figura 16: Matéria seca da parte aérea do trigo em função do NDVI. $*P < 0,05$; $**P < 0,01$	66
Figura 17: NDVI nos estádios V_2 , V_3 , V_4 , V_5 , V_6 e V_7 da cultura do milho em função das doses de N em semeadura. $*P < 0,05$; $**P < 0,01$	67
Figura 18: Valores de NDVI em função da população de plantas de milho no estágio V_5 . $**P < 0,01$. As barras verticais indicam o desvio padrão da média.....	69
Figura 19: Precipitação pluvial (mm) e eventos ocorridos durante os anos agrícolas 2013-14 (a) e 2014-15(b) da cultura do milho.	78
Figura 20: Produtividade de matéria seca da parte aérea da cultura do milho, em 2013-14 e 2014-15, em função das doses de nitrogênio em cobertura. $**P < 0,01$. As barras verticais indicam o erro padrão da média.....	83
Figura 21: Produtividade da grãos de milho, em 2013-14 e 2014-15 em função das doses de nitrogênio em cobertura. $*P < 0,05$. As barras verticais indicam o erro padrão da média.	83
Figura 22: Valores de NDVI obtidos na cultura do milho, em 2013-14, em função das doses de nitrogênio na semeadura. $**P < 0,01$. As barras verticais indicam o erro padrão da média.	84
Figura 23: Produtividade de grãos de milho nos anos de 2013–14 e 2014–15, em função do RI obtido sem aplicação de nitrogênio em cobertura. $**P < 0,01$	86
Figura 24: Produtividade média máxima de grãos de milho nos anos de 2013–14 e 2014–15, em função do INSEY obtido sem aplicação de nitrogênio em cobertura. $**P < 0,01$	87
Figura 25: Valores de eficiência agrônômica do nitrogênio aplicado em cobertura (EAc) em função do ganho de produtividade (GP, kg ha^{-1}) obtido no experimento. $**P < 0,01$	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais fertilizantes nitrogenados e teor de N.	29
Tabela 2: Fórmulas para mensurar e eficiência de uso de nitrogênio.....	33
Tabela 3: Divisão do espectro eletromagnético.....	35
Tabela 4: Índices que podem ser construídos pela leitura de refletância.	38
Tabela 5: Análise de variância para os efeitos de doses de N na semeadura e em cobertura na produtividade de matéria seca da parte aérea de trigo.	58
Tabela 6: Análise de variância para os efeitos de doses de N na semeadura e em cobertura na produtividade de grãos de trigo.	58
Tabela 7: Médias de valores de NDVI em cada altura de posicionamento do sensor GreenSeeker em relação ao dossel de plantas de trigo.....	61
Tabela 8: Valores de NDVI em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura do trigo, antes da aplicação de nitrogênio em cobertura.	62
Tabela 9: Valores de NDVI em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura do trigo, após a aplicação de nitrogênio em cobertura.	63
Tabela 10: Leituras de refletância espectral (NDVI) em períodos diferentes do dia em função das doses de nitrogênio em cobertura na cultura do trigo.	65
Tabela 11: Valores de NDVI para cada dose de nitrogênio na semeadura (N-sem), em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura do milho.	68
Tabela 12: Análise de variância para os efeitos de doses de N na semeadura e em cobertura na produtividade de matéria seca da parte aérea de milho no ano agrícola 2013-14.	81
Tabela 13: Análise de variância para os efeitos de doses de N na semeadura e em cobertura na produtividade de grãos de milho no ano agrícola 2013-14.....	81
Tabela 14: Análise de variância para os efeitos de doses de N na semeadura e em cobertura na produtividade de matéria seca da parte aérea de milho no ano agrícola 2014-15.	82
Tabela 15: Análise de variância para os efeitos de doses de N na semeadura e em cobertura na produtividade de grãos de milho no ano agrícola 2014-15.....	82
Tabela 16: Valores de NDVI e confronto entre as doses de N que proporcionaram a maior produtividade e a maior eficiência econômica com a dose de N indicada pelo modelo, e as respectivas produtividades de grãos de milho em 2013–14.	89

Tabela 17: Valores de NDVI e confronto entre as doses de N que proporcionaram a maior produtividade e a maior eficiência econômica com a dose de N indicada pelo modelo, e as respectivas produtividades de grãos de milho em 2014–15.	90
Tabela 18: Eficiência agronômica de nitrogênio em cobertura (kg milho kg N-1) na cultura do milho nos anos agrícolas de 2013–14 e 2014–15.	90
Tabela 19: Comparativo de resultado econômico entre as doses de nitrogênio indicadas.	91

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. Objetivos gerais.....	15
2.2. Objetivos específicos	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Nitrogênio	16
3.1.1 Nitrogênio nas plantas.....	18
3.1.2 Nitrogênio em sistemas sustentáveis de produção	20
3.1.3 Nitrogênio e pH do solo	26
3.1.4 Fertilizantes nitrogenados	28
3.1.5 Formas e épocas de aplicação de N em cereais.....	29
3.1.6 Nitrogênio e meio ambiente.....	31
3.1.7 Eficiência de uso do nitrogênio.....	32
3.2 Sensoriamento Remoto	33
3.2.1 Sensoriamento remoto e atributos de plantas	36
3.2.2 Modelos.....	38
3.2.2 Fatores que influenciam as leituras de refletância espectral	43
4 INFLUÊNCIA DA ALTURA DE POSICIONAMENTO DO SENSOR, RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA, ESTÁDIO DE DESENVOLVIMENTO, POPULAÇÃO DE PLANTAS E COBERTURA DO SOLO NAS LEITURAS DO SENSOR DE REFLETÂNCIA ESPECTRAL EM CULTURAS DE CEREAIS	46
4.1 INTRODUÇÃO	48
4.2 Objetivos	50
4.3 MATERIAL E MÉTODOS	51
4.3.1 Experimento 1: Influência da altura do sensor, do horário de operação e do estágio de desenvolvimento da cultura do trigo nas leituras de refletância espectral	51
4.3.2 Experimento 2: Influência do estágio de desenvolvimento da cultura do milho nas leituras de refletância espectral	54

4.3.3 Experimento 3: Influência da população de plantas de milho e da cobertura do solo nas leituras de refletância espectral	56
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
4.4.1 Produtividade de matéria seca da parte aérea e de grãos de trigo influenciadas pela aplicação de nitrogênio.....	58
4.4.2 Interferência da altura de trabalho do sensor nas leituras de refletância espectral da cultura do trigo	60
4.4.3 Interferência do estágio de desenvolvimento da cultura do trigo nas leituras de refletância.....	61
4.4.4 Interferência do período do dia nas leituras de refletância da cultura do trigo .	63
4.4.5 Interferência do estágio de desenvolvimento da cultura do milho nas leituras de refletância espectral	67
4.4.6 Interferência da população de plantas de milho e da cobertura do solo nas leituras de refletância espectral.....	68
4.5 CONCLUSÕES	70
5 MODELO PARA PRESCRIÇÃO DE DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA PARA A CULTURA DO MILHO COMBINANDO LEITURA DE REFLETÂNCIA ESPECTRAL COM EFICIÊNCIA AGRONÔMICA	71
5.1 INTRODUÇÃO	73
5.2 OBJETIVOS	75
5.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	76
5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	79
5.4.1 Desenvolvimento do modelo para prescrição da adubação nitrogenada	79
5.4.2 Aplicação do modelo para prescrição de dose de N em cobertura na cultura do milho.....	81
5.4.3 Análise das doses obtidas pelo modelo	89
5.5 CONCLUSÕES	93
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
7 REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) é o nutriente mineral exigido em maior quantidade e o que mais influencia a produtividade de cereais (AMADO *et al.*, 2002). Esse nutriente participa de processos vitais, sendo essencial para a estrutura e funções das células, para todas as reações enzimáticas, faz parte da molécula de clorofila, é indispensável para a fotossíntese, é componente das vitaminas biotina, tiamina, niacina e riboflavina; das proteínas, aminoácidos, ácidos nucleicos e tem função na produção e uso de carboidratos (TAIZ e ZEIGER, 2006).

Em diversos estudos foram observadas respostas positivas da adubação nitrogenada na produtividade de cereais (HEINEMANN *et al.* 2006; BOSCHINI *et al.* 2011), porém é o fertilizante que mais onera o custo de produção (SILVA *et al.*, 2001). Silva *et al.* (2005) enfatizam a necessidade de estudos mais específicos à interação do N no sistema solo-planta, visando a tomada de decisão quanto a formas de manejo, de tal modo que a disponibilidade do nutriente seja sincronizada com a necessidade da cultura.

A sincronia do N com a necessidade das culturas é complexa, pois no solo esse nutriente é dinâmico e está sujeito a processos de mineralização, imobilização, volatilização, nitrificação, desnitrificação e lixiviação. Estas transformações são afetadas por diversos fatores como temperatura, umidade (MARTHA JUNIOR, *et al.* 2004), textura do solo (BUSO e KLIEMANN, 2003), época e fonte de fertilizante (LARA CABEZAS E COUTO, 2007), culturas antecessoras (FONTOURA e BAYER, 2009) e sistema de cultivo (FARINELLI e LEMOS, 2012). Essa dinâmica faz com que ocorram demandas variáveis por N em uma mesma área agrícola. Na maioria das situações, é difícil prever a quantidade de N disponível no solo para absorção pelas plantas (KOCH *et al.*, 2004). Tanto o excesso quanto a falta de N podem ser prejudiciais.

A aplicação de N em excesso pode diminuir a eficiência agronômica (FAGERIA e BALIGAR, 2005), trazendo piores resultados econômicos ao produtor, além de passivos ambientais como eutrofização de corpos d'água e emissão de formas gasosas que têm alto impacto no efeito estufa (GARCIA, CARDOSO e SANTOS, 2013).

A falta de N em culturas de cereais pode ocasionar deficiência de clorofila, a qual pode ser reconhecida pela coloração pálida ou mesmo esbranquiçada das

folhas (clorose), e considerável mudança no metabolismo das plantas, modificando sua estrutura (TAIZ E ZEIGER, 2006) e influenciando a produtividade (DA ROS, *et al.*, 2003.; FONTOURA e BAYER, 2009).

Essas variações de coloração e estrutura das plantas podem ser mensuráveis pelo sensoriamento remoto. Menezes e Almeida (2012) explicam que o sensoriamento remoto é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética (REM) com os materiais terrestres, sem que haja contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto.

Para o desenvolvimento da agricultura de precisão vêm sendo realizados estudos envolvendo equipamentos com esta tecnologia agregada. Os valores de refletância espectral obtidos pelos sensores podem ser convertidos em índices que têm sido associados aos atributos de desempenho relacionados com a nutrição nitrogenada das plantas (KAPP JUNIOR, CAIRES E GUIMARÃES, 2014). Isso possibilita o uso de técnicas de sensoriamento remoto para identificação da necessidade de fertilização nitrogenada em algumas culturas (RAMBO *et al.*, 2004).

A literatura tem abordado o desenvolvimento de modelos para a conversão dos índices obtidos pelos sensores de refletância em doses de fertilizantes nitrogenados (RAUN *et al.*, 2002; POVH *et al.*, 2008; HOLLAND E SCHEPERS, 2010). No entanto, esta modelagem é complexa, pois além da dinâmica do ciclo do N no sistema solo-planta (KERBAUY, 2004), fatores relacionados com solo, clima, planta e condições de operação do sensor podem interferir nos índices gerados pelo sensoriamento remoto (MADEIRA, GILLESPIE E DUKE, 2001; BREUNING *et al.*, 2013; KIPP, MISTELE E SCHMIDHALTER, 2013; RISSINI, KAWAKAMI E GENÚ, 2015). Se o modelo utiliza índices como referência e estes apresentarem alguma distorção por interferência desses fatores, as doses indicadas podem não ser condizentes com as ideais para atender a demanda das plantas. Estudar esses fatores e o aprimoramento de modelos existentes pode melhorar a prescrição de fertilizantes nitrogenados, contribuindo para o aumento da sustentabilidade da atividade agrícola.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Os objetivos gerais desse estudo foram (i) estudar fatores que podem influenciar nas leituras de refletância e diminuir a precisão na indicação de doses de fertilizante nitrogenado e, (ii) propor um modelo para a prescrição da necessidade de N para a cultura do milho, a partir de dados de leitura de refletância espectral.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Esse estudo teve os objetivos específicos: (i) avaliar o desempenho das culturas de milho e trigo, e de sensores de refletância espectral frente a doses de N aplicadas em cobertura; (ii) estudar as correlações entre as leituras dos sensores e os atributos de desempenho das culturas avaliadas; (iii) estudar fatores que possam interferir na precisão da associação das leituras dos sensores com os atributos das culturas; e (iv) propor um modelo para a prescrição de doses de N por meio de técnicas não destrutivas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 NITROGÊNIO

O maior reservatório de nitrogênio (N) encontra-se na atmosfera, a qual possui aproximadamente 79% de sua composição com esse nutriente na forma de N_2 (Kerby, 2004). A fixação do N_2 atmosférico no solo pode ocorrer por descargas energéticas de relâmpago ou radiação ultravioleta, as quais separam as moléculas de N. Isso permite a sua ligação com moléculas de oxigênio presentes no ar, formando monóxido de nitrogênio (NO) e, posteriormente, sendo dissolvido na água da chuva e depositado no solo. Existe também a fixação industrial do N_2 por meio da produção de amônia (NH_3), a qual é incorporada a fertilizantes que são posteriormente distribuídos no solo (TAIZ E ZEIGER, 2006).

Algumas bactérias utilizam diretamente o N_2 atmosférico através da fixação biológica do nitrogênio (FBN). Ferguson (1998) explica que a FBN é o processo primário através do qual o N_2 , quimicamente indisponível para a maioria dos organismos, se torna fisiológica e metabolicamente disponível, inicialmente sob a forma de NH_3 , e posteriormente, por meio da ciclagem, se transforma em outros compostos nitrogenados. Kerbaui (2004) explica que grande parte dos processos de transformação de N no solo é mediada por microrganismos. Os microrganismos do solo mais importantes em relação às transformações de N são os fungos, bactérias e os actinomicetos. O N presente no solo pode apresentar uma série de transformações, dentre elas:

a) Mineralização: processo em que o N orgânico é transformado em N mineral por meio da decomposição da matéria orgânica. Formas orgânicas de N podem ser usadas pelos microrganismos, capazes de decompor as moléculas orgânicas e liberar o íon NH_4^+ que fica sujeito aos outros processos de transformação (VICTORIA, PICCOLO E VARGAS, 1992).

b) Imobilização: processo no qual o N mineral é transformado em N orgânico, participando da composição de plantas ou microorganismos. Se, por um lado, a biomassa microbiana imobiliza o N mineral diminuindo a sua disponibilidade para as plantas, por outro lado pode se constituir em uma fonte de N potencialmente mineralizável. Os nutrientes presentes na comunidade microbiana podem atingir valores elevados, mas a sua reciclagem e liberação são mais rápidas, se

comparadas a outras frações da matéria orgânica do solo. Ocorrendo a morte dos microrganismos, estes são rapidamente mineralizados pelos microrganismos remanescentes liberando os nutrientes imobilizados no processo conhecido como remineralização (VARGAS, SELBACH E SÁ, 2005).

c) Nitrificação: processo em que o íon NH_4^+ é transformado no íon NO_3^- . Segundo Ernani (2005) a nitrificação normalmente é indesejável porque em solos brasileiros predominam cargas negativas nos valores de pH utilizados para a produção agrícola e, portanto, não ocorre a retenção do NO_3^- nas partículas coloidais do solo. Com isso, o NO_3^- está sujeito à lixiviação, diferentemente do que ocorre com o NH_4^+ que, por possuir carga positiva, pode ser adsorvido eletrostaticamente às cargas negativas do solo.

d) Desnitrificação: conforme Taiz e Zeiger (2006) este processo representa a redução do N nítrico para formas gasosas que se perdem para a atmosfera (N_2 , NO e N_2O). Esta reação ocorre em solos com baixa disponibilidade de O_2 , porque os microrganismos anaeróbios utilizam o oxigênio do nitrato como receptor de elétrons na cadeia respiratória.

e) Volatilização: passagem do N do solo para a atmosfera. Pode ser consequência das outras transformações que o N sofre no solo ou da aplicação de fertilizante nitrogenado. Scivittaro et al. (2010) explicam que a ureia apresenta reação inicial alcalina no solo, e isso acarreta em perdas por volatilização de amônia. Quando aplicada em superfície, parte dela geralmente é hidrolisada, por meio da urease, uma enzima extracelular produzida por bactérias, actinomicetos e fungos do solo ou, ainda, originada de restos vegetais. Como resultado da hidrólise, tem-se a formação de carbonato de amônio, o qual não é estável e se desdobra em CO_2 , H_2O e NH_3 (gás) que se perde para a atmosfera.

f) Lixiviação: representa a perda de N-NO_3^- em profundidade no solo. Sangoi (2003) afirma que o NO_3^- é a forma mineral de N predominante nos solos sem restrição de oxigênio. Devido ao predomínio de cargas negativas nas camadas superficiais do solo, a sua adsorção eletrostática é insignificante. Desta forma, o NO_3^- permanece na solução do solo favorecendo sua lixiviação no perfil para profundidades inexploradas pelas raízes. A lixiviação de NO_3^- é considerada a principal perda do N disponível às plantas. Fatores como sistemas de preparo do solo, tipo de solo e formas de aplicação dos fertilizantes nitrogenados podem influenciar tanto o fluxo de água quanto a concentração de NO_3^- na solução do solo.

Apesar de complexo, o manejo adequado da disponibilidade de N para as culturas é uma tarefa fundamental, pois os compostos nitrogenados estão diretamente relacionados com o desenvolvimento estrutural normal das plantas (TAIZ e ZEIGER, 2006).

3.1.1 Nitrogênio nas plantas

Kerbaui (2004) explica que, apesar da abundância de N_2 na atmosfera, o N precisa estar disponível na forma mineral para ser absorvido pelas plantas. Essa transformação ocorre por processos naturais ou artificiais. Tanto o NH_4^+ quanto o NO_3^- são prontamente utilizados pelas plantas. A Figura 1 apresenta um resumo de como ocorre o metabolismo do N nas plantas.

A absorção do NO_3^- ocorre por um transportador de H^+ do tipo simporte (TAIZ e ZEIGER, 2006). Após absorção, o nitrato é convertido em nitrito, com alto consumo de energia, no citoplasma das células por meio da ação da enzima redutase do nitrato (RN). Esse processo ocorre, principalmente, nas raízes e nas folhas (KERBAUI, 2004). A RN possui molibdênio em sua constituição e sua capacidade de redução depende da presença deste micronutriente (CAMPBELL, 1999).

O nitrito é convertido em NH_4^+ por meio com a ação da enzima redutase do nitrito (RNI). Esta transformação ocorre nos plastídios, quando a ação é realizada nas raízes, e nos cloroplastos, quando acontece nas folhas (TAIZ e ZEIGER, 2006). Para essa reação, é exigida a redução da ferredoxina que ocorre no citosol pelo NADPH produzido no ciclo das pentoses (CRAWFORD, 1995 citado por BREDEMEIER e MUNDSTOCK, 2000).

O NH_4^+ pode ser absorvido por processo ativo, quando a concentração externa é baixa, e passivo, quando é alta; e após absorção esse nutriente precisa de rápida assimilação na forma orgânica, pois representa toxidez para as plantas (KERBAUI, 2004).

De acordo com Kerbaui (2004) a assimilação do NH_4^+ ocorre pela ação (i) da enzima sintetase da glutamina (GS) que catalisa a união de amônio com glutamato para formar glutamina [essa reação ocorre na maioria das vezes nos plastídeos (na raiz) e nos cloroplastos (nas folhas)]; e (ii) da enzima desidrogenase do glutamato (GDH) que catalisa uma reação entre 2-oxoglutarato, NH_4^+ e NADH formando o aminoácido glutamato.

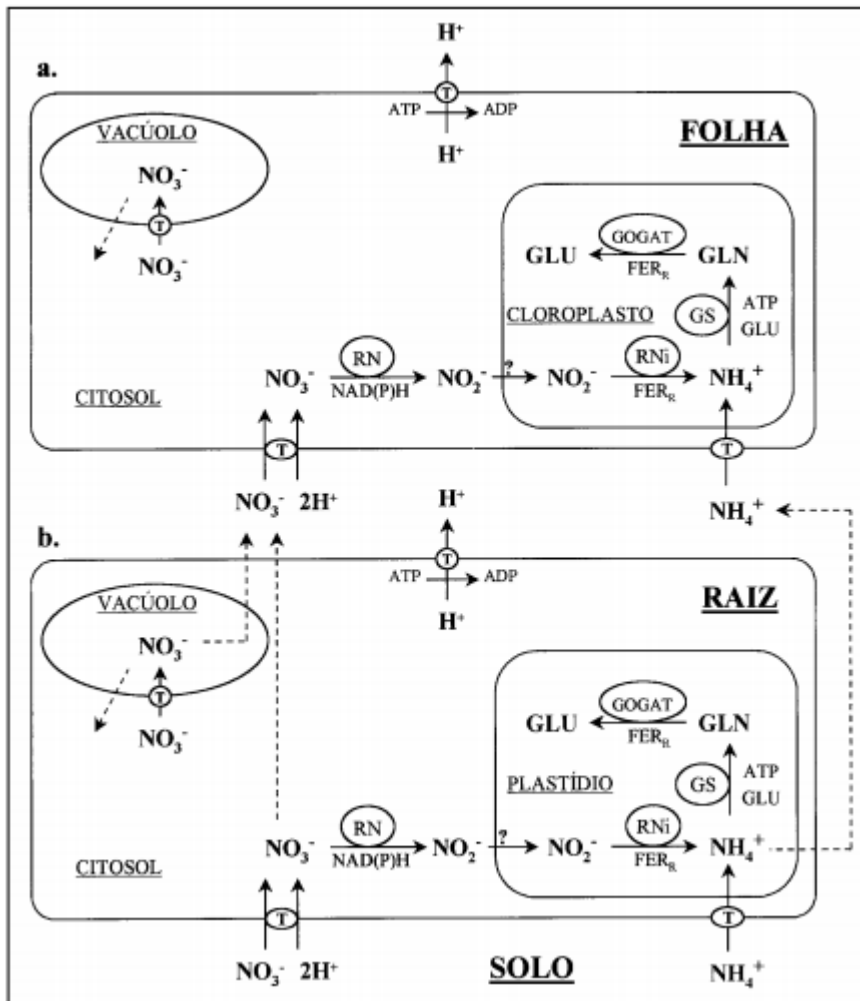


Figura 1: Representação esquemática da rota de assimilação do nitrogênio nas raízes e folhas de plantas. (GLN: glutamina; GLU: glutamato; RN: redutase do nitrato; RNi:redutase do nitrito; GS: sintetase da glutamina; GOGAT: sintetase do glutamato; T: transportador).
Fonte: Bredemeier e Mundstock (2000).

Conforme Teiz e Zaiger (2006) o N da glutamina formada com a ação da GS é transferido para 2-oxoglutarato, formando duas moléculas de glutamato, em uma reação catalisada pela enzima sintetase do glutamato (GOGAT). Essa enzima necessita de elétrons fornecidos pela ferredoxina (isoforma localizada no cloroplasto) ou NADH (isoforma de tecidos não-verdes) (KERBAUY, 2004). O glutamato é distribuído ou transformado em outros aminoácidos para ser transportado para os sítios de consumo onde servirão como doadores de N para a composição de outros compostos nitrogenados das plantas.

Ernani (2003) comenta que quase todo o N das plantas faz parte da estrutura dos aminoácidos e das proteínas. Uma porção menor de N, mas também importante, integra as moléculas de clorofila, dos nucleotídeos (ATP, ADP, NAD e

NADP), dos ácidos nucleicos (ADN e ARN), das purinas, pirimidinas, vitaminas e das coenzimas.

Fageria e Baligar (2005) relatam que a deficiência de N pode causar a senescência das folhas mais velhas. Conforme Uharte e Andrade (1995), em casos de persistência, a deficiência de N pode causar diminuição do índice de área foliar, com conseqüente menor interceptação da radiação, diminuindo o uso eficiente da radiação e culminando em menor taxa de fotossíntese.

A seguir serão abordadas algumas das principais questões relacionadas com a dinâmica do N e sua influência na adubação nitrogenada em sistemas sustentáveis de produção.

3.1.2 Nitrogênio em sistemas sustentáveis de produção

Considerando todos os processos que podem influenciar a disponibilidade de N para as plantas, pode-se classificar como extremamente complexa a correta prescrição de fertilizantes nitrogenados. A análise de solo é pouco explorada para avaliar a disponibilidade de N para as plantas por causa da dinâmica no nutriente no solo (ERNANI, 2003). Como as transformações do N no solo são rápidas, os teores de NO_3^- e NH_4^+ existentes no solo podem diferir daqueles obtidos na ocasião do término das análises. Em decorrência da baixa demanda inicial de N pelas plantas, da possibilidade de perdas de N por lixiviação e do índice salino dos fertilizantes, apenas parte do N é aplicada na semeadura, sendo o restante aplicado em cobertura em épocas de maior exigência pelas culturas (BINOTTI et al., 2009).

Experimentos regionais com doses crescentes de N têm sido utilizados como referência na prescrição de doses de maior eficiência econômica de N. Fontoura (2005) encontrou a dose de 150 kg N ha^{-1} como a média de máxima eficiência econômica para a cultura do milho; no entanto, nos diferentes experimentos deste estudo, a quantidade ideal para o milho variou de 40 a 240 kg N ha^{-1} . Esta oscilação foi influenciada pela desigual potencialidade de suprimento de N dos solos, pelas plantas de cobertura de inverno e diferentes regimes de chuva registrados, os quais afetaram a capacidade de produção e a reposta da cultura ao adubo nitrogenado.

De acordo com Fontoura e Bayer (2009), existem quatro fatores essenciais para serem observados na prescrição de N em experimentos regionais: (i) o potencial produtivo da cultura, (ii) o teor de matéria orgânica do solo, (iii) o tipo de planta de cobertura antecessora e (iv) a eficiência de aproveitamento do N aplicado.

Conforme Leite e Galvão (2008), a matéria orgânica do solo é formada por resíduos animais e vegetais que podem estar ainda vivos, como as raízes de plantas e os organismos do solo, constituindo aproximadamente 4% do carbono orgânico total (COT); ou mortos (até 98% do COT) que compreendem o húmus (fração pesada com 70% a 90% do COT morto) e a fração leve (com 10% a 30% deste COT morto), também chamada de fração lábil, constituída de resíduos de plantas em diferentes estágios de decomposição.

As práticas de manejo podem aumentar a oxidação da matéria orgânica pela quebra dos agregados do solo, expondo novas superfícies ao ataque de microrganismos (BEARE et al., 1994). Um dos principais mecanismos responsáveis pela preservação da matéria orgânica do solo sob sistemas de cultivo conservacionistas é a formação e a estabilização de macroagregados. O balanço de carbono (C) no solo é dependente da relação entre as adições de C fotossintetizado pelas plantas (parte aérea e raiz) e as perdas de C para a atmosfera resultantes da oxidação microbiana de C orgânico a CO_2 (COSTA et al., 2008),

A fração lábil da matéria orgânica do solo apresenta elevado índice de decomposição e pouca durabilidade no solo (SILVA e MENDONÇA, 2007). Esta fração fornece os nutrientes para as culturas pelo processo de mineralização, além de energia e C aos microrganismos. Já, a fração humificada tem maior durabilidade no solo e atua nas condições físicas e químicas do solo, além de ser destaque no sequestro de C atmosférico.

O não-revolvimento do solo promove modificações na ciclagem dos nutrientes, e o N é o mais afetado, pois com a decomposição mais lenta dos resíduos vegetais deixados sobre a superfície do solo, processos como imobilização, mineralização, lixiviação, volatilização e desnitrificação são alterados (LARA CABEZAS et al., 2000).

De acordo com Hart et al. (1994), a complexidade do N no solo é afetada pela qualidade e a quantidade de COT. Thicke et al. (1993) comentam que a matéria orgânica constitui a principal reserva de N no solo e tem grande influência na disponibilidade deste nutriente para as plantas. O N orgânico é mineralizado à amônia que, nas condições de acidez predominante nos solos, é convertida a NH_4^+ e, posteriormente, pode ser convertido em NO_3^- , pela ação das bactérias nitrificantes. O NO_3^- é de alta mobilidade no solo devido às cargas negativas presentes no complexo coloidal.

Stanford e Smith (1976) relatam que, ao longo do desenvolvimento das plantas, existem variações na quantidade de N orgânico disponível por meio da mineralização. Dahnke e Johnson (1990) explicam que a mensuração do potencial de mineralização geralmente mantém-se constante entre um ano e outro e, desta maneira, pode indicar a disponibilidade de N, a não ser que o tipo de cultura ou a quantidade e qualidade do resíduo incorporado sejam alterados.

A figura 2 apresenta a relação entre o tempo de adoção do sistema de plantio direto e o acúmulo de C, bem como o comportamento de imobilização e mineralização do N em função desta relação.

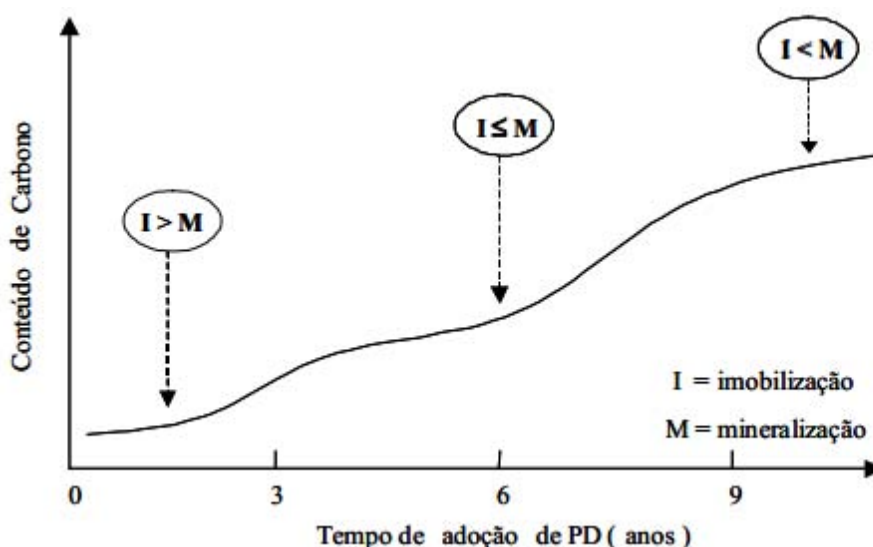


Figura 2: relação entre o tempo de adoção do sistema de plantio direto com o acúmulo de carbono, e o comportamento de imobilização e mineralização do N.
Fonte: Sá (1999) citado por ANDA (2004).

A disponibilidade de N pode ser influenciada pelo sistema de produção adotado (SÁ, 1996). As fases iniciais de adoção do plantio direto demandam maior quantidade de N, pois ocorre maior imobilização pelo aumento da atividade microbiana e os teores de matéria orgânica ainda são baixos. Isso torna a demanda em N pela biomassa microbiana do solo e pelas culturas elevada, notadamente na fase inicial de crescimento, exigindo maiores doses de N para suprir as exigências nutricionais nessa fase. Isso também foi observado no trabalho de Souza e Melo (2000), os quais encontraram maiores valores de N potencialmente mineralizável (NPM), na camada 0-0,05 m, para o tratamento em plantio direto comparado com o sistema convencional de preparo. A explicação para esse efeito se deve à decomposição mais acelerada no sistema convencional decorrente do ataque mais

intenso dos microrganismos ao material orgânico incorporado e mineralização do N em período mais curto, fruto da maior exposição dos agregados.

As plantas incluídas na rotação de culturas também exercem influência na mineralização da matéria orgânica (MIELNICZUK et al., 2003). O maior uso de fabáceas (leguminosas) e a implantação de espécies com maior produção de biomassa causam maior armazenamento de N total no solo.

Doneda et al. (2012) comentam que a utilização de plantas de cobertura com a intenção de atender uma das premissas básicas do sistema plantio direto, que é o acúmulo de matéria orgânica e nutrientes com rotação e diversificação de culturas, deve ser planejada de modo a selecionar plantas com capacidade de produzir fitomassa e aportar C e N. Deve-se considerar ainda a complexidade da decomposição e liberação de nutrientes dos resíduos das culturas. Pitol et al. (2006) verificaram que o sistema de cultivo (rotação, sucessão ou consórcio), bem como a combinação entre cultivo principal e adubo verde, influenciam na utilização eficiente dos nutrientes liberados.

Amado e Mielniczuk (2000) relataram que disponibilidade de N das culturas de cobertura foi influenciada pela quantidade total de N na fitomassa e sua relação C/N. Geralmente se aceita que materiais com relação C/N = 25 causam equilíbrio entre os processos de mineralização e imobilização, enquanto valores superiores causam imobilização líquida e os inferiores a 25 promovem mineralização líquida (AITA, 1997).

Souza e Melo (2000) observaram que o cultivo de leguminosas como adubo verde durante o inverno propiciou a adição de maior quantidade de fitomassa à superfície. Como consequência, obteve-se maior atividade microbiana, já que grande parte dos tecidos das leguminosas contém proteínas, aminoácidos, ácidos nucléicos e outros materiais facilmente decomponíveis (MENGEL, 1996).

Castro et al. (1993) encontraram maior nodulação da soja em sistema de plantio direto com maior população de microrganismos celulolíticos, concluindo que o sistema influencia o número e a atividade de alguns segmentos da microbiota do solo.

Andrade et al. (2012) observaram que houve maior acúmulo de N total em plantio direto, quando comparado com o sistema convencional de preparo, ao longo dos primeiros 20 cm. No plantio direto houve maior concentração de N na camada de 0-2,5 cm quando se utilizou a sucessão de milho e ervilhaca em comparação com

a rotação de feijão preto, aveia preta, milho, nabo forrageiro, soja e ervilhaca, em 12 anos. Os autores atribuíram a diferença pela maior presença de leguminosas ao longo dos anos.

Silva *et al.* (2011) compararam o plantio direto com o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) e a mata nativa (MN). O sistema de ILP com 8 anos (antecedida pelo sistema plantio direto) apresentou teores de C semelhantes aos do plantio direto com 23 anos, nas camadas de 0–10, 10–20 e 20–30 cm. Os estoques de NT (0–30 cm) para os sistemas de ILP (8 anos) e plantio direto foram de 5,5 e 5,8 Mg ha⁻¹ de N, semelhantes aos da MN, provavelmente pelo fato de a produção de leguminosas aumentar a FBN, assim como observado por Lovato *et al.* (2004).

Silva *et al.* (2011) verificaram que a substituição do plantio direto por ILP em 8 anos aumentou o teor de C nas substâncias húmicas e não diferiu da vegetação nativa, apenas na camada de 0-10 cm. Já, o estoque de C foi superior na camada de 0-30 cm no sistema de ILP quando comparado com o plantio direto, e não diferiu da MN. Houve ampliação do potencial de retenção de C nestas frações mais recalcitrantes por elas serem mais abundantes e quimicamente reativas da matéria orgânica. Comportamento diferente para as substâncias húmicas foi encontrado com relação aos teores de N que não apresentaram diferença em nenhum tratamento; e os estoques de N que foram superiores apenas na MN.

Amado *et al.* (2002) comentam que as plantas de cobertura já são usadas como um dos critérios para a prescrição de N em sistema plantio direto na região Sul do Brasil. Considerações semelhantes também foram feitas por Sousa e Lobato (2004) para a região do Cerrado.

Para Silva *et al.* (2006), a disponibilidade de N no solo para a cultura do milho é controlada, basicamente, pela decomposição da matéria orgânica e por adubações nitrogenadas, sendo que, quando são utilizadas culturas com baixa relação C/N na matéria seca, em rotação ou sucessão, aliada ao manejo de incorporação dos restos culturais, a decomposição e a mineralização são mais rápidas e a ciclagem de N ocorre em curto espaço de tempo.

Leal *et al.* (2013) explicam que, se o objetivo é cobertura vegetal e suprimento de palhada, deve-se escolher poáceas (gramíneas) para o sistema pois as mesmas produzem grande quantidade de matéria seca; se o objetivo é a nutrição da cultura posterior, deve-se optar pelas fabáceas, pois estas realizam ciclagem mais rápida de nutrientes, além da capacidade de fixação do N₂ atmosférico.

Silva *et al.* (2006) comentam que o uso de fabáceas como fonte de N é viável pelo fato destas associarem-se com bactérias especializadas em transformar o N_2 atmosférico em NH_3 . Alves *et al.* (2003) demonstraram que o plantio direto pode ajudar na FBN das fabáceas em razão da quantidade mais baixa de N no solo decorrente da imobilização da população microbiana, com resultados favoráveis em diferentes regiões. No entanto, Zotarelli (2000) demonstrou que a quantidade de N exportada pelos grãos é proporcional àquela fixada biologicamente.

Alves *et al.* (2006) obtiveram balanço negativo de N no primeiro ano (em -8 kg ha^{-1} , porém estatisticamente não diferente de zero) e positivo no segundo ano (em 10 kg ha^{-1}) relacionado com a contribuição da FBN e à menor produtividade da cultura. Os autores comentam que os valores encontrados seriam pelo menos 5% superiores se tivessem considerado o N acumulado no sistema radicular, o que resultaria em $+2 \text{ kg N ha}^{-1}$ no primeiro ano, e $+19 \text{ kg N ha}^{-1}$ no segundo ano.

Doneda *et al.* (2012) observaram que a utilização de fabáceas e crucíferas consorciadas com gramínea proporcionou mais fitomassa e decomposição mais lenta dos resíduos quando comparada ao tratamento sem consórcio. Torres *et al.* (2008) também obtiveram maior permanência de palha na superfície do solo decorrente de menor decomposição da matéria orgânica com a utilização de resíduos de maior relação C/N.

Em cultivo de arroz, Gitti *et al.* (2012) obtiveram maior produtividade quando o tratamento de cobertura vegetal apresentava palha de fabáceas, com maior rendimento de grãos encontrado com a utilização de guandu; a crotalária proporcionou rendimento de grãos intermediário, seguido de milho e braquiária, cujos tratamentos resultaram nas menores produtividades de arroz. Leal *et al.* (2013) também observaram que a cobertura de crotalária tem vantagem em relação ao milho para anteceder o milho, produzindo mais e diminuindo a necessidade de adubação nitrogenada. Albuquerque *et al.* (2013) obtiveram indicadores maiores de produtividade de milho quando este foi antecedido pela crotalária em comparação com a mucuna preta e o guandu anão. Collier *et al.* (2006) observaram que a crotalária foi superior ao feijão-de-porco para anteceder o milho. Gerlach *et al.* (2013) observaram ganhos com a utilização da crotalária como cobertura vegetal também para a cultura do feijão.

O consórcio de milho com plantas forrageiras de *Panicum* e *Brachiaria* não afetou o teor de N foliar nem a produtividade de grãos se comparado com apenas a cultura de milho (GARCIA *et al.* 2013).

Viola *et al.* (2013) constataram que o adubo verde cultivado entre milho e trigo beneficiaram a produção deste último em comparação com o pousio. A ervilha forrageira e o nabo forrageiro acumularam mais matéria seca e nutrientes, dentre eles o N, principalmente pela decomposição e liberação deste para o trigo quando em maior demanda. Resultados semelhantes foram encontrados por Nunes *et al.* (2011). A resposta do trigo à aplicação de N mineral é dependente da cultura antecessora e das condições meteorológicas, fatos que também foram apontados por Viola *et al.* (2013). Esses autores verificaram que o efeito da ervilha forrageira, do nabo forrageiro e da ervilhaca foi observado até mesmo na qualidade de panificação.

Devido à influência que as culturas anteriores exercem no efeito da adubação nitrogenada, Fontoura e Bayer (2009) desenvolveram critérios de recomendação de N para a cultura do milho baseados na expectativa de rendimento de grãos, na cultura antecessora e no teor de matéria orgânica do solo. Estes indicadores baseiam-se na demanda de N para diferentes faixas de rendimento de grãos, na capacidade de suprimento de N do solo pela matéria orgânica, no efeito da planta de cobertura antecessora na disponibilidade de N e na eficiência do N aplicado via fertilizante mineral. O modelo desenvolvido mostrou-se adequado conforme evidenciado pela significativa relação entre as doses indicadas de N com as doses de eficiência econômica de N para a cultura do milho. O uso racionalizado de N pode diminuir efeitos indesejáveis, como diminuição no pH do solo com o uso contínuo e acúmulo de doses maiores (STIPP e POCHNOW, 2008).

3.1.3 Nitrogênio e pH do solo

Freire *et al.* (2000) destacaram que os principais efeitos do pH na dinâmica de N no solo são: (i) a mineralização do N orgânico ocorre em toda a faixa de pH do solo, porém, a taxa diminui gradativamente a valores de pH inferiores a 6,0-6,5; (ii) a taxa de nitrificação é ótima na faixa de pH entre 6,6 e 8,0, e reduz progressivamente com a diminuição do pH, atingindo valores insignificantes a valores pH menores que 4,5; (iii) a faixa ideal de pH para desnitrificação varia de 7,0 a 7,5, atingindo valores

bem menores a pH 5,0; (iv) a perda de NH_3 por volatilização é altamente dependente do pH, aumentando a probabilidade de ocorrência acima de pH 7,0.

Em vasos com algodão, Rosolem *et al.* (2003) verificaram que a calagem, ao aumentar a mineralização e a nitrificação, disponibilizou N às plantas e aumentou a lixiviação de NO_3^- no perfil do solo, independentemente do modo de aplicação do corretivo.

Briedis *et al.* (2012) observaram que calagem superficial proporcionou maior acúmulo de N total em um Latossolo há 15 anos sob plantio direto, especialmente na camada de 0–2,5 cm.

Coser (2006) verificou que na medida em que a dose de N aumenta, o pH do solo diminui, principalmente nas camadas superficiais (0-5 e 5-10 cm), independentemente da época de aplicação. Graham (2002) explica que esta acidificação é ocasionada pela nitrificação do íon NH_4^+ , gerando NO_3^- que é lixiviado, e esta reação libera o H^+ no solo.

Caires (2013) relata que a acidez gerada pela nitrificação que ocorre com a aplicação de fertilizantes amoniacais pode auxiliar a dissolução do calcário aplicado na superfície. Como a absorção de NO_3^- pelas raízes normalmente é maior que a de Ca^{2+} pode ocorrer aumento no pH do subsolo por meio da movimentação de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ e outros sais. Rosolem *et al.* (2003) explicam que, independentemente da aplicação em cobertura ou incorporado, parte significativa do N é imobilizada, e a absorção de N pelas plantas, mais sua incorporação à massa microbiana do solo, neutraliza os efeitos do adubo nitrogenado amoniacal sobre o pH do solo. Iturri *et al.* (2011) verificaram valores de pH menores em locais com maior precipitação pluvial, indicando maior perda de bases trocáveis por lixiviação.

Wyngaard *et al.* (2012) também observaram acidificação da camada superficial do solo com a adubação nitrogenada, principalmente em áreas sem calagem. Os autores destacam que a sequência de cultivos também contribui para que isso ocorra, com a decomposição da matéria orgânica.

Cassol *et al.* (2012) não encontraram efeito da aplicação de dejetos suínos nos valores de pH do solo. A diminuição de Al^{3+} pela formação de complexos organometálicos, o aumento na saturação por bases e o consumo de íons H^+ do solo pela protonação de ânions orgânicos derivados do dejetos poderiam alcalinizar o solo, assim como encontrado por Shen e Shen (2001), Lourenzi *et al.* (2011) e Hue e Licudine (1999). Porém, a nitrificação do N amoniacal dos dejetos suínos atuou

contra a alcalinização do solo. Quando se utilizou apenas ureia como fonte de N, houve efeito acidificante da adubação nitrogenada nas camadas superficiais, principalmente de 0-2,5 e 2,5-5 cm.

3.1.4 Fertilizantes nitrogenados

Raij (2011) comenta que o manejo da adubação nitrogenada é difícil porque o N é um elemento que apresenta dinâmica complexa no solo e em virtude do fato de a adubação mineral não apresentar efeito residual. Desta maneira, é necessário buscar alternativas mais eficientes para a prescrição de fertilizantes nitrogenados.

Dada a importância que o N exerce em processos vitais das plantas, existe a preocupação de mantê-lo disponível de maneira eficiente. Garcez Neto *et al.* (2003) comentam que as plantas forrageiras necessitam de suplementação de N em forma de adubação nitrogenada, sendo que a produção pode ser estimulada em função das doses aplicadas e das espécies utilizadas.

Os fertilizantes nitrogenados demandam um desembolso relativamente alto de recursos financeiros e isso ocorre principalmente devido à alta demanda energética para a produção deste fertilizante.

A Tabela 1 apresenta alguns dos principais fertilizantes nitrogenados utilizados na agricultura. Ernani (2003) explica que todos os fertilizantes nitrogenados são completamente solúveis em água, portanto dissolvem rapidamente em solução. Quase todos são produzidos a partir da amônia (NH_3), a qual é obtida através da fixação do N_2 atmosférico, em NH_2 . Sua diferença está na forma e ânions presentes em suas fórmulas químicas em que o N se encontra (amoniacal, nítrica, ou amídica), na concentração, e nos demais cátions. Estas diferenças trazem algumas particularidades a cada um destes fertilizantes. Martha Junior *et al.* (2004) comentam que a ureia e o sulfato de amônio são os fertilizantes mais utilizados, no entanto podem apresentar grandes perdas por volatilização ou lixiviação.

Conforme a Tabela 1, a ureia tem um teor elevado de N (45%) e este fato faz com que os custos energéticos de movimentação deste nutriente acabem ficando mais baratos. Okumura e Mariano (2012) citam ainda outras vantagens da utilização de ureia para o suprimento de N, como: alta solubilidade, menor corrosividade, compatibilidade com vários outros fertilizantes e defensivos, fácil manipulação e menor acidificação no solo. No entanto, para Lara Cabezas (2001), a ureia não é uma fonte eficiente de N em plantio direto devido às perdas de NH_3 por volatilização.

Tabela 1: Principais fertilizantes nitrogenados e teor de N.

Fertilizante	Fórmula química	Teor de N (%)	Solubilidade em água (%)
Sulfato de amônio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	21	100
Uréia	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	45	100
Nitrato de amônio	NH_4NO_3	33	100
Cloreto de amônio	NH_4Cl	26	100
Cianamida de cálcio	CaCN_2	21	100
Nitrato de cálcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	16	100
Nitrato de sódio	NaNO_3	16	100
Amônia anidra	NH_3	82	100
Nitrato de potássio	KNO_3	13	100
Fosfato monoamônico	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	11	100
Fosfato diamônico	$(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4$	18	100

Fonte: Adaptado de FAGERIA et al. (2003).

Blaylock (2007) explica que a evolução dos fertilizantes nitrogenados visando o melhor aproveitamento do nutriente criou um novo grupo com liberação controlada denominado, genericamente, de fertilizantes de eficiência aprimorada, diferenciando-se entre si pelo modo de ação, sendo os principais: (a) inibidores ou de estabilização, (b) fertilizantes solúveis revestidos, (c) compostos orgânicos sintéticos não revestidos, mas de disponibilidade lenta.

3.1.5 Formas e épocas de aplicação de N em cereais

A época e a forma de aplicação dos fertilizantes nitrogenados podem influenciar o aproveitamento de N pelas plantas (SILVA *et al.*, 2005). Os problemas de volatilização de NH_3 e imobilização do N mineral, por exemplo, podem ser potencializados com a aplicação superficial do fertilizante nitrogenado, a qual muitas vezes é feita em virtude da facilidade de aplicação e rendimento operacional.

A absorção de N pelas plantas ocorre durante todo o ciclo vegetativo e a alta concentração deste nutriente na zona radicular pode ser benéfica para que ocorra rápido crescimento inicial das plantas, podendo acarretar também em incrementos na produtividade (SILVA *et al.*, 2005). No entanto, cada cultura apresenta particularidades com relação à absorção e demanda de N, de forma que a maneira e a época ideal de aplicação podem ser diferentes. Esta diferença pode existir inclusive para a mesma cultura submetida a variáveis diferentes como clima e

cultivar. Sá *et al.* (1996) observaram vantagens em aplicar o N na pré-semeadura do milho; Silva *et al.* (2005) observaram, também para a cultura do milho, que as maiores produtividades foram obtidas com a incorporação do fertilizante na semeadura ou aos 15 dias após a emergência, sendo que a aplicação de N aos 20 dias antes da semeadura mostrou-se não recomendável.

Em condições de laboratório, Sangoi *et al.* (2003) observaram perdas maiores de N por volatilização de NH_3 com a distribuição superficial da ureia em relação à sua incorporação, independentemente do manejo dos resíduos culturais de aveia preta, das características texturais, do teor de matéria orgânica e da CTC do solo.

Fontoura e Bayer (2010) observaram que a incorporação de ureia proporcionou perdas menores de N- NH_3 por volatilização em relação à aplicação superficial. O efeito foi o mesmo quando os autores utilizaram outras fontes de fertilizante nitrogenado, como sulfato e nitrato de amônio, ureia com inibidor de urease, dejetos suíno e fertilizante de liberação lenta na cobertura.

Vieiro *et al.* (2014) observaram em uma mesma área menores perdas de N- NH_3 por volatilização em cultura do trigo no inverno quando comparado com a cultura do milho durante o verão, ambos sob sistema de plantio direto. As menores perdas estão associadas às menores temperaturas da estação de inverno. No mesmo estudo observou-se que a incidência de chuva no verão, cinco dias após a aplicação do fertilizante, contribuiu para diminuir as perdas por volatilização de N- NH_3 . A chuva contribuiu para a incorporação do fertilizante no solo para o sistema de plantio direto.

Lara Cabezas *et al.* (2000) explicam que a incorporação da ureia elimina quase que totalmente a volatilização de NH_3 , pois aumenta o contato do N com o solo, facilitando a adsorção do NH_4^+ às cargas negativas.

A existência de resíduos culturais influencia as perdas de N pela volatilização de NH_3 , principalmente quando o fertilizante é aplicado superficialmente, podendo reduzir o contato do fertilizante com o solo e diminuir a adsorção de NH_4^+ aos colóides orgânicos e inorgânicos (VARSA *et al.*, 1995). Bayer e Mielniczuk (1997) comentam que em sistema plantio direto, o aumento de conteúdo de matéria orgânica tende a aumentar a população microbiana e a CTC do solo. Com isto, tem-se maior atividade da urease que catalisa a hidrólise da ureia, favorecendo a volatilização de NH_3 . No entanto, os aspectos econômicos da estratégia de adubação também precisam ser avaliados. Fontoura e Bayer (2010), apesar de

terem encontrado menores perdas de N com a incorporação do fertilizante nitrogenado, a produtividade não diferiu estatisticamente entre os tratamentos, mesmo com o uso de fontes diferenciadas do fertilizante. Desta maneira, em cada caso, é necessário analisar alguns aspectos para a definição da melhor estratégia de adubação nitrogenada, como preço do fertilizante a ser utilizado, custo energético da incorporação ou não do fertilizante, riscos ambientais e ciclagem do N.

3.1.6 Nitrogênio e meio ambiente

Rockström *et al.* (2009) levantaram uma lista de situações que poderiam colocar em risco a vida na Terra caso alguns limites não fossem alcançados. Dentre as atividades para as quais foi possível estabelecer níveis aceitáveis, aquelas nas quais os valores atuais já superaram estes limites são: mudanças climáticas, taxa de perda de biodiversidade e o ciclo do N. Garcia, Cardoso e Santos (2013) demonstraram que o N reativo (disponível biologicamente, ligado a C, H ou O) tem ligação com todos os processos ambientais que poderiam colocar em risco a vida na Terra. No trabalho de Rockström *et al.* (2009), o parâmetro aceitável para o ciclo do N foi mensurado em quantidade de fixação industrial, com valores de 35 e 136 milhões de toneladas por ano de situação aceitável e atual, respectivamente.

O uso de N na agricultura pode apresentar efeitos positivos e negativos. Se, por um lado, a utilização de fontes externas deste nutriente, como fertilizantes e dejetos, está relacionada com o aumento na produção de alimentos observada nos últimos anos, por outro lado seu uso ineficiente está relacionado com impactos ambientais (TILMAN *et al.*, 2002).

Os fertilizantes nitrogenados possuem baixa eficiência de uso. Conforme relatado por Garcia, Cardoso e Santos (2013), cerca de 50% do N aplicado com fertilizantes é utilizado pelas culturas, 14% é consumido em forma de grãos e 4% em forma de carne. Por ter esta baixa eficiência, os fertilizantes nitrogenados aumentam a disponibilidade de N reativo que está relacionado com os gases que têm efeito crítico na troposfera e estratosfera (HALL e MATSON, 1996). Conforme dados do IPCC (2007), o potencial de aquecimento do N_2O é cerca de 300 vezes maior que o do CO_2 . Além disso, o N reativo pode ser transportado na atmosfera por longas distâncias e depositado em ambientes terrestres e aquáticos, podendo causar eutrofização, perda da diversidade e dominância de plantas daninhas (VITOUSEK, *et al.* 1997).

A eutrofização dos rios pode ser consequência da lixiviação de nitrato pelo uso de fertilizantes nitrogenados (CORRIVET, *et al.* 2009). Macedo e Sipaúba-Tavares (2010) explicam que o aumento na concentração de P e N estimula o aumento de algas e cianobactérias. Esse aumento de biomassa de fitoplâncton impede a fotossíntese dos seres das camadas inferiores pelo bloqueio da passagem de luz. Com falta de oxigênio, os peixes e esses organismos acabam morrendo e aumenta o número de seres decompositores. A decomposição e o consumo do oxigênio podem liberar metano e gás sulfídrico. Conforme Barros (2008), estes seres consomem o pouco oxigênio existente quando possuem respiração aeróbia e aqueles que possuem respiração anaeróbica utilizam nitrito e nitrato comoceptor final de elétrons, liberando N_2O ou N_2 , contribuindo para o efeito estufa. Além disso, o consumo humano destas águas com excesso de N pode causar doenças, como a síndrome do bebe azul e meta-hemoglobina, e câncer gástrico (MATOS 2004, citado por Barros 2008). O uso eficiente no fertilizante nitrogenado pode contribuir para a diminuição destes efeitos indesejados ao meio ambiente, na planta e no resultado financeiro da atividade.

3.1.7 Eficiência de uso do nitrogênio

Fageria e Baligar (2005) definem a eficiência de uso do N como a máxima produtividade econômica produzida por unidade de N aplicado, absorvido ou utilizado pela planta para produzir grãos ou tecido. Na Tabela 2 estão apresentadas as fórmulas, citadas por Fageria e Baligar (2003) e Fageria e Baligar (2005), que podem ser utilizadas para mensurar a eficiência do uso de N em culturas agrícolas. Assim, para mensurar a eficiência do uso do N tem sido utilizado:

- (i) EA que representa o ganho na produtividade de grãos que se pode ser obtido por unidade de N aplicado;
- (ii) EF que representa o ganho na produtividade biológica (matéria seca total da parte aérea) que pode ser obtido por unidade de acúmulo de N na parte aérea;
- (iii) EAF que representa o ganho na produtividade de grãos que pode ser obtido por unidade de acúmulo de N na parte aérea;
- (iv) ERA que representa o percentual de acúmulo de N nas plantas em relação à quantidade de N aplicada;
- (v) EUN que é representada pelo produto entre a EF e a ERA, indicando o ganho na produtividade biológica que pode ser obtido por unidade de N aplicado.

Tabela 2: Fórmulas para mensurar e eficiência de uso de nitrogênio.

Nome da Eficiência	Fórmula
Eficiência agrônômica (EA)	$EA = \frac{Pn - Psn}{N} = \frac{kg}{kg}$
Eficiência Fisiológica (EF)	$EF = \frac{PBn - PBsn}{ANn - ANsn} = \frac{kg}{kg}$
Eficiência Agrofisiológica (EAF)	$EAF = \frac{PN - Psn}{ANn - ANsn} = \frac{kg}{kg}$
Eficiência de recuperação aparente (ERA)	$ERA = \frac{ANn - ANsn}{N} \times 100 = \%$
Eficiência de uso de N (EUN)	$EUN = EF \times ERA = \frac{kg}{kg}$

Pn = produtividade de grãos ($kg\ ha^{-1}$) com aplicação de N; Psn = produtividade de grãos sem aplicação de N ($kg\ ha^{-1}$); N = Quantidade do N aplicado ($kg\ ha^{-1}$); PBn = produtividade biológica (matéria seca total da parte aérea em $kg\ ha^{-1}$) com aplicação de N; PBsn = produtividade biológica sem aplicação de N ($kg\ ha^{-1}$); ANn = acúmulo de N na matéria seca total da parte aérea com aplicação de N ($kg\ ha^{-1}$); ANsn = acúmulo de N na matéria seca total da parte aérea sem aplicação de N ($kg\ ha^{-1}$).

Fonte: Adaptado de Fageria e Baligar (2003; 2005).

Majerowicz et al. (2002) comentam que os estudos que visam aumentar a eficiência do uso de N podem seguir linhas diferentes, como (i) empregar menores quantidades de N buscando patamares seguros e produtivos, (ii) utilizar biotecnologia para obter cultivares mais produtivos e eficientes na absorção de N, e (iii) adotar programas de melhoramento com diminuição da entrada de insumos externos. De acordo com Rambo *et al.* (2004), o manejo correto da adubação nitrogenada é um tema abordado na agricultura de precisão, visando aumentar a eficiência de uso do N. Para isso, a utilização de tecnologias embarcadas em equipamentos agrícolas pode colaborar com este propósito, e o sensoriamento remoto é uma das alternativas.

3.2 SENSORIAMENTO REMOTO

Todos os objetos do mundo real que estejam a uma temperatura acima de zero absoluto ($-273,15\ ^\circ C$ ou zero Kelvin) apresentam movimentação aleatória das partículas dos átomos e das moléculas. Quando essas partículas se colidem, elas mudam o seu estado de energia e emitem radiação eletromagnética (REM). E quanto maior é a temperatura da fonte, maior é a sua potência irradiante de energia (MENEZES e ALMEIDA, 2012).

Conforme informações do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a maior fonte de energia do sistema solar é o sol decorrente de sua temperatura

elevada. Essa energia é irradiada para todo o espaço, propaga-se pelo vácuo e atinge a Terra.

Taiz e Zeiger (2006) explicam que a luz possui características de (i) onda eletromagnética transversal em que os campos elétrico e magnético oscilam perpendicularmente a um ângulo de 90° em direção uma à outra – uma onda possui comprimento (distância entre dois picos) e frequência (número de picos que passam por um observador em um determinado espaço de tempo); (ii) partícula que pode-se denominar fóton e cada fóton possui uma quantidade de energia chamada de quantum. A luz solar é como uma chuva de fótons de diferentes frequências.

Toda a informação visual que o ser humano percebe é resultado da refletância da REM no espectro do visível que o objeto refletiu. O espectro do visível é apenas uma parte do espectro eletromagnético, como ilustrado na Figura 3.

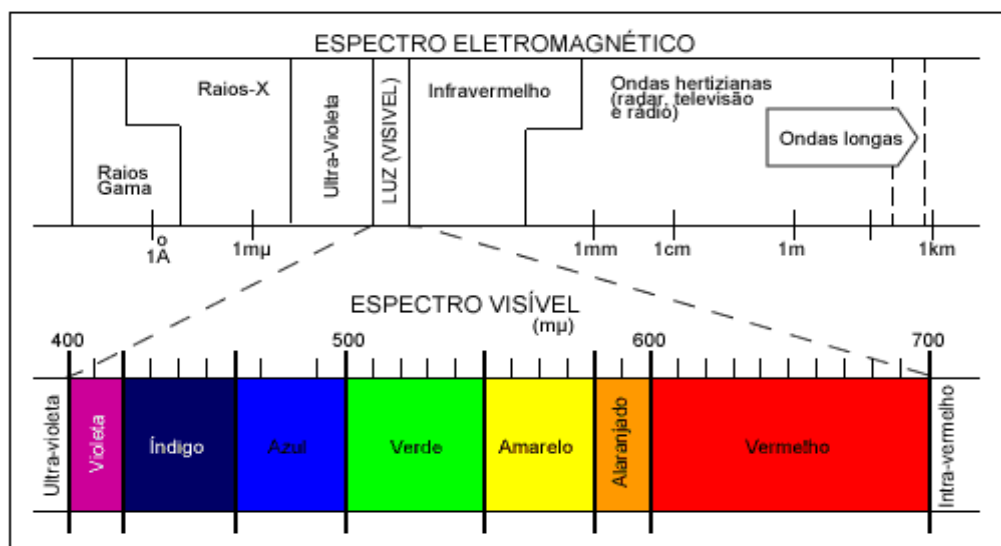


Figura 3: Espectro eletromagnético.

Fonte: Teng (2008).

Galo et. al. (2002) comentam que a REM, dependendo da superfície e do intervalo espectral considerado, pode ser absorvida, transmitida ou refletida quando entra em contato com algum objeto na superfície terrestre.

Quando a radiação é transmitida e refletida, sua reflexão pode ser utilizada para observar alvos por meio do sensoriamento remoto, o qual é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da REM com os materiais terrestres, sem que haja contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto (MENEZES e ALMEIDA, 2012).

Os sensores ativo e passivo podem ter diferentes resoluções, as quais apresentam três parâmetros (NASCIMENTO e ABREU, 2012):

a) Espacial: medida que dita a menor distância entre dois objetos que um sensor é capaz de identificar como diferentes entre si. Sendo assim, a menor parcela imageada representa o tamanho do pixel. Nesse caso, se existe uma resolução de 30 m, significa que dois objetos distantes entre si em 30 m poderão ser distinguidos;

b) Espectral: relacionada com a faixa espectral que o sensor é capaz de trabalhar. A resolução espectral será tão maior quanto mais estreitas forem as faixas espectrais que este consegue trabalhar;

c) Temporal: tem relação com a frequência com que o imageamento passa sobre uma mesma área; quanto maior o número de vezes que ele passa, maior será a resolução temporal.

De acordo com Menezes e Almeida (2012), a divisão mais aceita no sensoriamento remoto descreve os intervalos espectrais, bem como os respectivos comprimentos de onda (Tabela 3).

Tabela 3: Divisão do espectro eletromagnético.

Intervalo Espectral	Comprimento de Onda
Raios Cósmicos	0,01 A ^o
Raios gama	0,01 - 0,1 A ^o
Raios X	0,1- 10 A ^o
Ultravioleta	100 nm - 0,38 µm
Visível	0,38 - 0,76 µm
Infravermelho próximo	0,76 - 1,2 µm
Infravermelho de ondas curtas	1,2 - 3,0 µm
Infravermelho médio	3,0 - 5,0 µm
Infravermelho termal	5,0 - 1 mm
Micro-ondas	1 mm - 100 cm
Rádio	1 m - 10 km
Áudio	10 - 100 km
Corrente alternada	> 100 km

Obs: A^o = 10⁻¹⁰ m; nm = 10⁻⁹ m; µm = 10⁻⁶ m

Fonte: Menezes e Almeida (2012).

Dependendo das características de resolução, sensores podem ser acoplados em plataformas orbitais, aéreas e terrestres. No nível orbital, os sensores estão a bordo de satélites e estações espaciais que estão localizados no espaço entre 400 e 36.000 km de altitude. No nível aéreo, são utilizados aviões que carregam os instrumentos sensores a bordo e estão em torno de 7 a 10 km de altitude. No nível terrestre, os instrumentos sensores estão a poucos metros da superfície terrestre, em torno de 50 cm a 30 m de altura. Dependendo do tipo de estudo a ser realizado

ou projeto desenvolvido, são utilizados dados de diferentes níveis de coleta separadamente ou de forma combinada (SAUSEN, 2008).

Os veículo aéreos não tripulados (VANTs) também são utilizados para obtenção de imageamento georreferenciado (JOHNSON *et al.* 2001; MEDEIROS *et al.* 2008). Jorge e Inamasu (2014) explicam que esses equipamentos são classificados conforme a altitude em qual as imagens são adquiridas. Estas podem variar desde alguns metros até o nível orbital, de acordo com as características do objeto de interesse.

Os sensores remotos representam grande utilidade para a sociedade devido às suas possibilidades de aplicabilidade como auxílio no planejamento urbano, projetos rodoviários, monitoramento de florestas, rios, entre outros. Na agricultura, uma das áreas de aplicação de técnicas de sensoriamento remoto é o monitoramento de atributos de plantas.

3.2.1 Sensoriamento remoto e atributos de plantas

Com a utilização de sensores capazes de identificar a refletância em faixas isoladas, como no vermelho e infravermelho próximo, pode-se associar tais leituras com atributos das plantas em tempo real (KAPP JUNIOR, CAIRES e GUIMARÃES, 2014). De acordo com Campbell (2002) citado por Inman e Khosla (2005), as moléculas de clorofila absorvem entre 70 e 90% de toda a luz incidente nas faixas de comprimento de onda do azul e vermelho, enquanto refletem a luz na faixa verde (Figura 4).

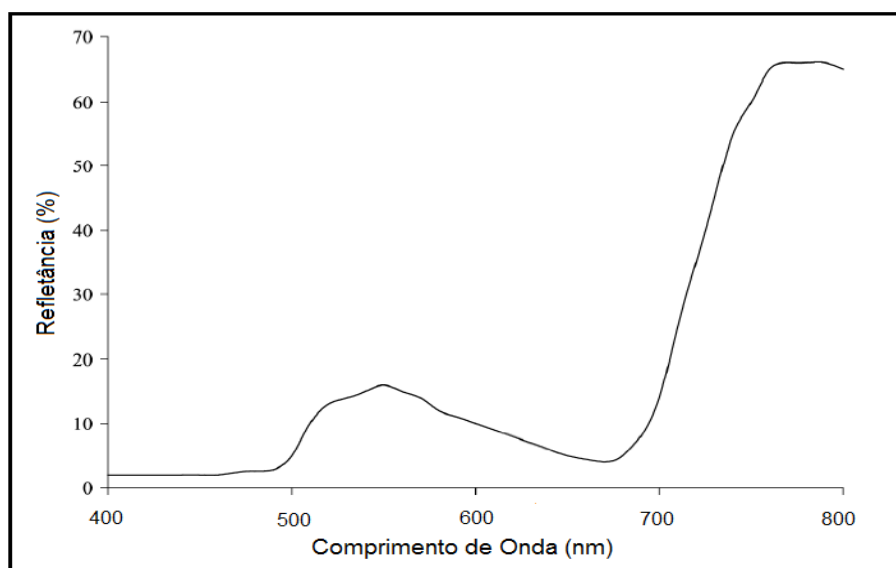


Figura 4: Diagrama conceitual ilustrando os espectros de refletância de uma folha saudável. Fonte: Adaptado de Inman e Khosla (2005).

A quantidade de luz azul e vermelha absorvida pela folha é proporcional à densidade de clorofila da folha (CAMPBELL, 2002, citado por INMAN e KHOSLA, 2005). A refletância da porção do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (760-1.200 nm) é influenciada pelas células do mesofilo, as quais refletem cerca de 60% de toda radiação incidente perto da faixa do infravermelho, enquanto as camadas superiores da folha são quase transparentes a esta faixa.

De acordo com Ramirez (2010), o sensoriamento remoto oferece uma alternativa para aplicação de N a taxa variável. Esta técnica baseia-se na mudança da interceptação de luz e a refletância da vegetação, indicando a cor da folha. Como as clorofilas são os principais contribuintes da cor verde, e seu principal componente é o N, quando ocorre falta de disponibilidade de N, a formação das moléculas de clorofila torna-se limitada e a cor verde das folhas é afetada.

De acordo com Meneses e Almeida (2008), os sensores de refletância se baseiam no fato de que as plantas absorvem a luz e refletem uma porção da luz do infravermelho, devido a propriedades estruturais da planta. As bandas espectrais refletidas podem ser mensuradas e identificadas pelos sensores.

Conforme Zhu *et al.* (2006), as bandas espectrais para o monitoramento de N podem mudar de acordo com as espécies vegetais e as condições experimentais, como a fase em que a cultura se encontra. Xue *et al.* 2004 citados por Zhu *et al.* (2006) propuseram que, na cultura do trigo, a concentração de N no tecido foliar pode ser refletida pelo índice espectral do dossel com base na reflexão de 660 e 440 nm, enquanto que o acúmulo de N foliar pode ser previsto com índice de vegetação de 1.220 e 660 nm. Stone *et al.* (1996) relataram que as bandas espectrais de 671 e 780 nm, quando combinadas, podem estimar o índice espectral e indicar variações no total de N na cultura do trigo.

Blackmer *et al.* (1996) constataram que a refletância próxima de 550 nm poderia discriminar as diferenças entre os tratamentos de N em milho e, em seguida, determinaram as bandas de 550 e 710 nm para o cálculo do índice espectral, apontando a concentração de N na cultura do milho.

Portz, Molin e Jasper (2012) detectaram alta correlação entre índices de refletância espectral, biomassa de cana-de-acúcar e absorção de N, apoiando o potencial de uso dessa tecnologia para desenvolver algoritmos para gerenciar aplicação em taxa variável de N na cultura da cana-de-acúcar. Povh *et al.* (2008)

encontraram correlação positiva das leituras de NDVI em resposta ao incremento de doses de N em relação ao tempo de desenvolvimento da cultura do trigo.

Os índices de refletância geralmente são dados construídos por meio de operações matemáticas com os valores resultantes da mensuração de refletância na faixa do visível (VIS) e do infravermelho próximo (near infra red – NIR). A literatura apresenta uma série de índices aplicados na agricultura e explica a razão da utilização de cada banda espectral (Cao *et al.*, 2013). Alguns dos principais índices estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Índices que podem ser construídos pela leitura de refletância.

Nome	Sigla	Fórmula	Referência
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$(\text{NIR} - \text{VIS}) / (\text{NIR} + \text{VIS})$	Rouse et al. (1974)
Simple Ratio	SR	NIR / VIS	Jordan (1969)
Soil Adjusted Vegetation Index	SAVI	$[(\text{NIR} - \text{VIS}) / (\text{NIR} + \text{VIS} + \text{L})] \times (1 + \text{L})$	Huete (1988)
Wide Dynamic Range Vegetation Index	WDR-NDVI	$(a \times \text{NIR} - \text{VIS}) / (a \times \text{NIR} + \text{VIS})$	Gitelson (2004)

Fonte: Kapp Junior, Caires e Guimarães (2014).

Serrano, Filela e Penuelas (2000) explicam que os maiores níveis de clorofila, associados aos níveis de N, resultam em incremento da área foliar e da biomassa. Grohs et al. (2009) encontraram relação entre NDVI e biomassa acumulada na parte aérea das plantas por ocasião da emissão da sexta folha em cultivares de trigo e cevada, por meio de função quadrática aplicada sobre essa relação. Isso levou à determinação do ponto de saturação do NDVI, ocorrendo quando a curva atinge seu ponto de inflexão, sem prejuízos na manutenção da resposta do NDVI em função da biomassa.

As associações de leitura de refletância espectral com atributos das plantas incentivaram o desenvolvimento de estudos buscando modelos para indicar a demanda de fertilização nitrogenada em resposta aos índices obtidos.

3.2.2 Modelos

As recomendações de adubação nitrogenada têm sido baseadas em experimentos regionais com doses crescentes de N em culturas de interesse econômico. A dose de máxima eficiência econômica tem sido indicada para cada cultura e região, e uma mesma dose é empregada em todo o talhão. Com a utilização do sensoriamento remoto junto com o sistema de posicionamento global

(GPS) na agricultura, introduziram-se metodologias que utilizam a refletância espectral para fazer a gestão localizada de necessidade de N.

Raun et al. (2001) propuseram a identificação do potencial produtivo da cultura do trigo sem adição de fertilizantes (YP0) utilizando um índice chamado de *In-Season Estimated Yield* – Índice de Rendimento Estimado ao longo do ciclo da cultura (YE). Para o cálculo desse índice, utilizou-se o NDVI modificado (Equação 1) para minimizar os efeitos de cobertura de nuvens, sombras e ângulo de incidência dos raios solares, em dois momentos do ciclo de desenvolvimento da cultura: T1 e T2, nos estádios 4 (alongamento da bainha foliar) e 5 (pseudocolmo ereto) de Feeks e Large (Large, 1954), respectivamente.

$$NDVI_{mod} = \frac{[(NIR_{ref}/NIR_{inc}) - (RED_{ref}/RED_{inc})]}{[(NIR_{ref}/NIR_{inc}) + (RED_{ref}/RED_{inc})]} \quad \text{Equação 1}$$

onde: NIR_{ref} mede a magnitude da banda do infravermelho (780 ±6nm) refletido
 RED_{ref} mede a magnitude da banda do vermelho (670 ±6nm) refletido
 NIR_{inc} mede a magnitude da banda do infravermelho (780 ±6nm) incidente
 RED_{inc} mede a magnitude da banda do vermelho (670 ±6nm) incidente

Para o cálculo de YE também se considerou a temperatura do ar entre os períodos T1 e T2, chamada de *Growing Degree Day* – Graus Dia de Crescimento (GDD), calculado pela Equação 2.

$$GDD = \frac{(T_{min} + T_{max})}{2} - 4^{\circ}\text{C} \quad \text{Equação 2}$$

onde, T_{min} = temperatura diária mínima (°C).
 T_{max} = temperatura diária máxima (°C).

De posse desses valores, calculou-se o YE pela Equação 3.

$$YE = \frac{NDVI_{T1} + NDVI_{T2}}{GDDa} \quad \text{Equação 3}$$

onde: GDDa é a soma dos resultados diários de GDD (°C) registrados entre o T1 e T2.

O valor de YE foi então utilizado para realizar análise de regressão com a produtividade de grãos de trigo, gerando, assim, um modelo exponencial para prever a produtividade da cultura a partir do YE obtido em campo.

Johnson e Raun (2003) descrevem que, tanto para milho quanto para trigo, é possível calcular a extensão de resposta à adubação nitrogenada dividindo a máxima produtividade de grãos da cultura com disponibilidade suficiente de N pela

produtividade de grãos da cultura sem a adição de fertilizante nitrogenado. O resultado desta equação foi denominado *Response Index* – Índice de Resposta (RI).

Raun *et al.* (2002) adaptaram o RI substituindo os valores de produtividade de grãos pelas leituras de NDVI obtidas nas culturas, sem limitação de N e sem adição de fertilizante nitrogenado. Os autores adaptaram também o índice YE, substituindo-o pelo índice *In-Season Estimated Grain Yield* - Produtividade de Grãos Estimada ao longo do ciclo da cultura- (INSEY), calculado conforme a Equação 4.

$$INSEY = \frac{NDVI(Feeks4 - 6)}{DAS(GDD > 0)} \quad \text{Equação 4}$$

onde, NDVI (Feeks 4-6) = NDVI mensurado em uma data entre os estádios 4 e 6 de Feeks (Large, 1954).

DAS (GDD>0) = número de dias após a semeadura em que o GDD (calculado para o dia) é maior que 0.

Com esses valores, Raun *et al.* (2002) e Lukina *et al.* (2001) propuseram o cálculo do potencial produtivo da cultura com a adição de fertilizante nitrogenado (YPN) por meio da Equação 5.

$$YPN = YP0 \times RI \quad \text{Equação 5}$$

onde, o RI é limitado a 2,0.

YP0 é a produtividade prevista de grãos sem adição de fertilizante nitrogenado, obtida a partir da equação exponencial gerada na regressão entre INSEY e produtividade de grãos.

YPn é limitado à máxima produtividade da cultura que pode ser estabelecida pelo agricultor.

Com o valor de YPN, Raun *et al.* (2002) sugeriram que a prescrição de fertilizante nitrogenado poderia ser realizada obedecendo as seguintes etapas:

1- Cálculo da previsão de porcentagem de N nos grãos - *Predict percent N in the grain* (PNG), aplicando a Equação 6.

$$PNG = b_0 + b_1 \times YPN \quad \text{Equação 6}$$

onde, YPN = potencial produtivo da cultura com a adição de fertilizante nitrogenado.

b_0 e b_1 são coeficientes da equação gerada entre YPN e porcentagem de N nos grãos.

2- Cálculo da previsão de absorção de N pelos grãos - *Predict Grain N Uptake* (GNUP), por meio da Equação 7.

$$GNUP = YPN \times PNG \quad \text{Equação 7}$$

onde, YPN = potencial produtivo da cultura com a adição de fertilizante nitrogenado

PNG = previsão de porcentagem de N nos grãos

3- Previsão do aproveitamento de N das culturas antecessores de cobertura - *Predict forage N uptake* (FNUP), pela Equação 8.

$$FNUP = b_0 + b_1 e^{b_2 NDVI} \quad \text{Equação 8}$$

onde, b_0 , b_1 e b_2 = coeficientes da equação exponencial gerada entre NDVI e FNUP.
NDVI = NDVI obtido no local.

4- Cálculo da quantidade de N a ser aplicada - Fertilizer N Requirement (FNR), pela Equação 9.

$$FNR = \frac{GNUP - FNUP}{0,70} \quad \text{Equação 9}$$

onde, GNUP = previsão de absorção de N pelos grãos.
FNUP = aproveitamento de N das culturas antecessoras de cobertura.

O divisor 0,70 foi utilizado considerando a eficiência da adubação nitrogenada de 70%.

Povh (2007), trabalhando também com a cultura do trigo, obteve a Equação 10 com o potencial produtivo da região dos Campos Gerais do Paraná função do INSEY.

$$YPN = 731,4e^{169,97INSEY} \quad \text{Equação 10}$$

Em seguida, o autor calculou o RI com a mesma metodologia de Raun et al. (2002) e dividiu YPN por RI para encontrar YP0. Com estes valores, calculou-se a dose de N a ser aplicada pela Equação 11. O valor 0,028 da equação indica que para cada incremento de 1.000 kg de grãos seriam necessários 28 kg de N fornecidos pelo fertilizante.

$$FNR = [(YPN - YP0) \times 0,028] \times 0,70 \quad \text{Equação 11}$$

A abordagem do manejo da adubação nitrogenada pode ocorrer também por identificação de zonas de potencial produtivo. O trabalho de Ghos et al. (2009) estabeleceu classes de baixo, médio, alto e muito alto potencial de produção de biomassa seca da parte aérea da cultura do trigo, a partir das leituras de NDVI realizadas na ocasião de emissão da sexta folha com os valores de 0,13; 0,45; 0,68 e 0,80, em resteva de milho, e de 0,33; 0,59; 0,75 e 0,83, em resteva de soja. Bredemeier et al. (2013) sugeriram um modelo único e simples para prescrição de dose de N baseado no potencial produtivo da cultura de trigo detectado pelo NDVI no estágio de seis folhas. De acordo com os autores, neste estágio de desenvolvimento, as plantas estariam ainda emitindo afilhos e iniciando a diferenciação de estruturas reprodutivas na inflorescência, o que garantiria maior sobrevivência dos afilhos e maior número de grãos por espiga. Assim, poderiam ser

estabelecidas faixas de potencial produtivo (baixo, médio e alto). Para locais de menor produtividade prevista, as quantidades de N a serem aplicadas seriam mais baixas do que para locais de alto potencial produtivo.

Holland e Schepers (2010) propuseram um modelo generalizado para prescrição de N em cobertura, relacionando leituras de refletância normalizadas com a função de crescimento da planta. Por meio de leituras com sensores, os autores calcularam o *Suficiente Index* - Índice de Suficiência – (SI) por meio da Equação 12.

$$SI = \frac{Vle}{Vlr} \quad \text{Equação 12}$$

onde, Vle = índice de vegetação encontrado.

Vlr = índice de vegetação referência (sem limitação por N).

VI = pode ser qualquer índice de vegetação (NDVI, SR, entre outros)

A função de crescimento generalizado foi quadrática com concavidade para baixo (Equação 13), encontrando-se o SI = 1 em função da dose ótima de N.

$$SI = a_2 N^2 + a_1 N + a_0 \quad \text{Equação 13}$$

Igualando-se a zero a primeira derivada dessa função quadrática, obtém-se a dose de N considerada ideal (N_{opt}), por meio da Equação 14.

$$0 = 2a_2 N_{opt} + a_1 \quad \text{ou} \quad N_{opt} = \frac{-a_1}{2a_2} \quad \text{Equação 14}$$

Desenvolvendo estas equações, os autores chegaram à Equação 15 parametrizada para identificar a dose de N a ser aplicada à taxa variável em função da leitura de refletância.

$$Naplic = \sqrt{\frac{N_{opt}^2}{1 - SI_0} \times (1 - S_i)} \quad \text{ou} \quad Naplic = N_{opt} \sqrt{\frac{(1 - S_i)}{\Delta S_i}} \quad \text{Equação 15}$$

onde, Naplic = N a ser aplicado.

SI_0 = S_i quando a dose de N for igual a 0 (igual à a_2 , valor que corta o eixo y)

Este modelo considera a produtividade máxima de matéria seca e pode ainda ser incrementado com a inserção da eficiência econômica, conforme a Equação 16.

$$Naplic = (MZ \times N_{opt} - N_p - N_{crd} + N_{comp}) \times \sqrt{\frac{(1 - S_i)}{\Delta S_i}} \quad \text{Equação 16}$$

onde, MZ = fator de zona de manejo que pode ser adicionado de acordo com o histórico de produtividade da área, análise de solo, etc... $0 \leq MZ \leq 2$.

N_{opt} = dose ideal de N.

N_p = N aplicado na semeadura.

N_{crd} = N de resíduos culturais.

N_{comp} = N que deve ser aplicado em excesso ao N_{opt} , considerando a eficiência da adubação nitrogenada.

Assim como nos estudos descritos, a aplicação de N em taxa variável por meio de leituras de refletância espectral tem sido desenvolvida, aplicada e discutida na literatura nos últimos 15 anos para diferentes culturas, como milho (SCHARF e LORY, 2009; KITCHEN et al., 2010; SOLIE et al., 2012; BRAGNOLO et al. 2013), trigo (MULLEN et al., 2003; RAUN et al., 2005; SOLIE et al., 2012), algodão (VELLIDIS et al., 2011), arroz (XUE et al., 2014; ALI, et al. 2015) e cana-de-açúcar (AMARAL e MOLIN, 2011; AMARAL, MOLIN e SCHEPERS, 2015).

Como todos os modelos descritos são dependentes de leituras de refletância espectral, ao realizar a associação de leituras de refletância com a adubação nitrogenada é preciso estar atento a algumas variáveis que podem afetar tais leituras.

3.2.2 Fatores que influenciam as leituras de refletância espectral

A modelagem da demanda de N a partir de técnicas de sensoriamento remoto é complexa, pois além da dinâmica do ciclo do N no sistema solo-planta (KERBAUY, 2004) existem outros fatores que podem influenciar as leituras de refletância e causar distorção nas doses indicadas. Ponzoni (2001) descreve como fatores que podem afetar o produto do sensoriamento remoto em uma vegetação: (i) a fonte de radiação (irradiância espectral, a localização do ângulo zenital e azimutal solar; (ii) o dossel que pode afetar parâmetros ópticos (refletância e transmitância), estruturais (formas geométricas e posicionamento dos componentes da vegetação: folhas, galhos, frutos e flores), geométricos e ambientais (temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação); (iii) o solo, que possui uma série de propriedades e parâmetros tais como refletância, absorbância, rugosidade superficial, textura e umidade; e (iv) o sensor que possui parâmetros como a sensibilidade espectral, a abertura, a calibração e o posicionamento espacial.

A luz emitida por uma fonte pontual segue a lei do inverso do quadrado. Isso significa que quando a distância da medição dobra, a intensidade de luz diminui quatro vezes (KIPP, MISTELE e SCHMIDHALTER, 2014). Desta maneira, a leitura de uma banda espectral sozinha pode mudar com distâncias diferentes para o alvo (HOLLAND et al., 2012).

Kipp, Mistele e Schmidhalter (2013) testaram a possibilidade de a distorção causada pela distância ser eliminada com a construção dos índices de refletância, e ainda avaliaram a influência da temperatura do ar e da intensidade luminosa externa incidente nas culturas, em condições controladas em câmara de crescimento. Neste trabalho, um tecido (Vendela MW90G , Ikea, Munique , Alemanha) com atributos de refletância e brilho muito parecidos com os das plantas, de 2 m² (1 m × 2 m), montado sobre uma placa de madeira, foi utilizado como uma superfície de referência para a medidas de refletância. O tecido foi esticado firmemente sobre a placa visando obter uma área de medição uniforme e para evitar rugas. Uma variação de 5% da média foi adotada como aceitável e foram encontrados valores entre 70 e 140 cm do dossel como a faixa na qual os índices não apresentavam variações. Os autores observaram ainda que o aumento da temperatura apresentou correlação linear negativa com a mensuração do NDVI e não foi encontrado efeito da intensidade luminosa para o NDVI.

Rahman, Lamb e Stanley (2015) identificaram uma tendência de leve queda nos valores de NDVI obtidos pela leitura de um sensor ativo com a elevação do ângulo de iluminação solar na cultura da soja. No entanto, os autores discutem que, por ser um sensor ativo, provavelmente esta queda nos valores de NDVI é uma consequência indireta de outros atributos, como mudanças na turgescência da folha ou da evapotranspiração, variações diurnas na fluorescência natural da clorofila (ZARCO-TEJADA *et al.*, 2000), foto inibição (MOHOTTI and LAWLER, 2002), e, quando for o caso, heliotropismo (BAWHEY, GRANT e GAO, 2003).

A presença de água nas folhas da planta, condição encontrada após a incidência de chuva ou orvalho, também pode influenciar os resultados de refletância. Madeira, Gillespie e Duke (2001) obtiveram índices distintos para condições diferentes de chuva e orvalho no dossel de gramado, sendo que o principal efeito foi sobre a refletância na região do infravermelho próximo, obtendo menores valores com maior presença de água, mudando a composição dos índices de vegetação. Em condições de alta umidade, observaram-se maiores valores de refletância na região do vermelho visível.

O estágio de desenvolvimento das plantas também deve ser levado em consideração, pois este altera a estrutura do dossel das culturas (PONSONI, 2001). Prasad *et al.* (2007) observaram que os padrões de refletância são fortemente influenciados pelas crescentes estações e fases do desenvolvimento. Rissini,

Kawakami e Genú (2015) acrescentam que os cultivares interagem com o estágio de desenvolvimento das culturas e com doses diferentes de N para o efeito de mensuração de índices de refletância espectral.

Para que as leituras de refletância espectral possam se aproximar das doses de eficiência econômica do fertilizante nitrogenado a ser aplicado devem ser estudadas as fontes de erro e as possíveis maneiras de minimizar sua influência. Nas sessões a seguir, são apresentados os resultados de experimentos realizados com o objetivo de verificar algumas dessas fontes de erro, bem como apresentar uma contribuição para modelagem de doses de fertilizantes nitrogenados a partir das leituras de refletância espectral.

4 INFLUÊNCIA DA ALTURA DE POSICIONAMENTO DO SENSOR, RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA, ESTÁDIO DE DESENVOLVIMENTO, POPULAÇÃO DE PLANTAS E COBERTURA DO SOLO NAS LEITURAS DO SENSOR DE REFLETÂNCIA ESPECTRAL EM CULTURAS DE CEREAIS

RESUMO: O sensoriamento remoto é uma técnica que pode auxiliar na identificação de demandas localizadas que as culturas de cereais podem apresentar por nitrogênio (N). Isso permite que o fertilizante nitrogenado seja aplicado em doses variáveis, de acordo com a demanda localizada, sem excessos ou falta, evitando prejuízos ambientais e financeiros. Identificar fatores que podem interferir nestas medidas, pode aumentar a eficiência da utilização desta técnica. Este capítulo teve o objetivo de estudar fatores que podem influenciar nas leituras de refletância espectral (LRE) e diminuir a precisão na indicação de doses de fertilizante nitrogenado. Para isso, por meio de estudos com adubação nitrogenada avaliaram-se: (i) a influência da altura do sensor, do horário de operação e do estágio de desenvolvimento da cultura do trigo na LRE; (ii) a influência do estágio de desenvolvimento da cultura do milho na LRE; (iii) a influência da população de plantas de milho e da cobertura do solo na LRE. O sensoriamento remoto foi realizado por meio do sensor GreenSeeker e as LRE convertidas em índices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e INSEY (*In-Season Estimated Yield*). Na cultura do trigo observou-se que (i) doses de N na semeadura, apesar de não influenciarem a produtividade de grãos e de matéria seca da parte aérea das plantas, tiveram estreita correlação com as leituras de NDVI realizadas por ocasião da emissão do 4^a perfilho (momento em que realizada aplicação de N em cobertura), demonstrando que o fertilizante influenciou no arranque inicial diferenciado da cultura; (ii) doses de N aplicadas em cobertura influenciaram a produtividade de grãos e a produção de matéria seca da parte aérea; (iii) houve diferença de valores de NDVI em relação às alturas nas quais o sensor GreenSeeker foi posicionado, sendo que entre o espaço avaliado, de 10 cm até 120 cm de altura do dossel da cultura, a média de valores estabilizou a partir de 30 cm até 120 cm de altura do dossel da cultura; (iv) antes da aplicação de N em cobertura, o NDVI apresentou diferença significativa entre os estádios de desenvolvimento da cultura; após a aplicação de N em cobertura, o NDVI apresentou diferença significativa somente em estágio mais avançado de desenvolvimento da cultura; e (v) as médias de LRE apresentaram diferenças de acordo com os horários de leitura, com distinta radiação fotossinteticamente ativa, na seguinte ordem: noite > manhã > tarde. Na cultura do milho observou-se que (i) os valores de NDVI apresentaram diferença significativa em todos os níveis de N aplicados na semeadura para todos os estádios de desenvolvimento da cultura até o momento da aplicação de N em cobertura; (ii) o NDVI não foi influenciado pela cobertura do solo, e aumentou de modo linear ($p < 0,01$) com o aumento da população de milho no estágio V₅, sendo que em V₇ este efeito não foi mais observado. Concluiu-se que o sensoriamento remoto apresenta potencial para melhorar a eficiência de aplicação de fertilizantes nitrogenados em cereais. Porém, os fatores que interferem na LRE devem ser controlados, pois eles podem interferir na quantidade de N prescrita pelos modelos desenvolvidos para a recomendação de fertilizantes nitrogenados por sensoriamento remoto.

Palavras Chave: Agricultura de precisão, índice de vegetação, NDVI, nitrogênio, horário do dia.

4 INFLUENCE OF THE POSITIONING HEIGHT OF THE SENSOR, PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION, STAGE OF DEVELOPMENT, PLANT POPULATION AND THE SOIL COVER ON SPECTRAL REFLECTANCE SENSOR READINGS IN CEREAL CROPS

ABSTRACT: Remote sensing is a technique that can assist in the identification of localized demands that cereal crops can present by nitrogen (N). This allows the nitrogen fertilizer to be applied in varying rates, according to the local demand, without excess or lack, avoiding environmental and financial damages. Identifying factors that may interfere with these measures may increase the efficiency of using this technique. This chapter aimed to study factors that can influence spectral reflectance measurement and decrease the accuracy of N fertilizer rates. It was evaluated: (i) the influence of the positioning height of the sensor, the hours of operation and the stage of development of the wheat crop in spectral reflectance; (ii) the influence of the stage of development, the maize plant population and the soil cover in spectral reflectance. Spectral Reflectance data was obtained by commercial ground sensor GreenSeeker and converted into NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and INSEY (In-Season Estimated Yield) indices. In the wheat crop, it was observed that: (i) N rates at the sowing, although not influencing the grain yield and dry matter, had a close correlation with the NDVI readings performed at the time of the 4th tillering. Demonstrating that the fertilizer influenced the initial differentiated start of the crop; (ii) N topdress rates influenced grain yield and dry matter production; (iii) there were differences in NDVI values in relation to the heights in which the GreenSeeker sensor was positioned. Between the evaluated space, from 10 cm to 120 cm of height of the culture canopy, the average values stabilized from 30 cm up to 120 cm in height; (iv) before N topdress application NDVI presented a significant difference between the stages of development of the crop. After N topdress application the NDVI presented significant difference only at a more advanced stage of development of the crop; (v) the averages of spectral reflectance measurement were different according to the reading times, with distinct photosynthetically active radiation, in the following order: night> morning> afternoon. In the maize crop, it was observed that: (i) NDVI values showed a significant difference in all levels of N applied at the sowing for all stages of development of the crop until the topdress N application; (ii) the NDVI was not influenced by soil cover, and increased linearly ($p < 0.01$) with the increase of the maize population in the V₅ stage. In V₇ this effect was no longer observed. It was concluded that remote sensing presents potential to improve the efficiency of application of nitrogen fertilizers in cereals. However, the factors that interfere in the spectral reflectance measurement must be controlled, as they can interfere in the amount of N prescribed by the models developed for the recommendation of nitrogen fertilizers by remote sensing.

Keywords: Precision agriculture, vegetation index, NDVI, nitrogen, time of day.

4.1 INTRODUÇÃO

A tecnologia embarcada em equipamentos agrícolas com sistemas de posicionamento geográfico (GPS), sensores e softwares avançados para aplicação de insumos são ferramentas aliadas na gestão sustentável de recursos para a produção de alimentos. Dentre as possibilidades de utilização de ferramental tecnológico abordado na literatura encontra-se o monitoramento da nutrição nitrogenada por meio de sensores de refletância espectral.

A luz possui características de onda eletromagnética transversal, sendo que os campos elétrico e magnético oscilam perpendicularmente a um ângulo de 90° em direção uma à outra (TAIZ; ZAIGER, 2006). Quando esta radiação incide em alguma superfície e é refletida, existem sensores que podem efetuar a medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres, sem que haja contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto (MENEZES; ALMEIDA, 2012).

Uma série de sensores ópticos está disponível para os agricultores. Estes aparelhos sensores montados em veículos estão ligados ao GPS de modo que a posição das leituras é gravada e pode ser mapeada com precisão para informar atributos de plantas. As estimativas de biomassa da parte aérea (KAPP JUNIOR, CAIRES e GUIMARÃES, 2014) e de produtividade de grãos (POVH *et al.* 2008) por exemplo, podem ser feitas com resultados de leituras de comprimentos de onda na região visível e no infravermelho próximo (HEDLEY, 2014).

Fatores como a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) (RAHMAN, LAMB E STANLEY, 2015), a temperatura do ar (KIPP; MISTELE; SCHMIDHALTER, 2013), variações diurnas na fluorescência natural da clorofila (ZARCO-TEJADA *et al.*, 2000), fotoinibição (MOHOTI and LAWLER, 2002), heliotropismo (BAWHEY, GRANT e GAO, 2003), chuva e orvalho (MADEIRA, GILLESPIE e DUKE, 2001) podem, direta ou indiretamente, influenciar os resultados de leitura dos sensores. Os padrões de refletância são fortemente influenciados também por questões ligadas ao desenvolvimento das plantas, como crescentes estações e fases do desenvolvimento, e doses diferentes de fertilizante nitrogenado na semeadura (PRASAD ET AL., 2007; RISSINI, KAWAKAMI E GENUÍ 2015).

Os resultados de leitura dos sensores podem ainda ser influenciados pela distância entre o sensor e o dossel das plantas (KIPP, MISTELE e SCHMIDHALTER, 2014). As medições dos sensores são normalizadas para diminuir os efeitos resultantes de condições diferenciadas, melhorando as condições para que os modelos de predição de fertilizantes, por meio de leituras de refletância, possam ser aplicados em muitos campos e diferentes culturas (HOLLAND; SCHEPERS, 2010).

4.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste capítulo foram, por meio da utilização do sensor ativo GreenSeeker, avaliar (i) os efeitos da adubação nitrogenada nas leituras de refletância espectral em plantas de trigo, na produção de matéria seca da parte aérea e na produtividade de grãos; (ii) a influência da altura de posicionamento do sensor em relação ao dossel de plantas de trigo nas leituras de refletância espectral; (iii) a influência dos estádios de desenvolvimento das culturas de trigo e milho nas leituras de refletância espectral do dossel das plantas; (iv) a influência de momentos distintos do dia nas leituras de refletância espectral do dossel de plantas de trigo; e (v) a influência da população de plantas de milho e de diferentes situações de resíduos de cobertura do solo nas leituras de refletância espectral.

4.3 MATERIAL E MÉTODOS

4.3.1 Experimento 1: Influência da altura do sensor, do horário de operação e do estágio de desenvolvimento da cultura do trigo nas leituras de refletância espectral

Para avaliar a influência da altura de operação do sensor, do período do dia para a operação e da época de realização das leituras, foi realizado um experimento com a cultura do trigo na Chácara São Pedro, em um Latossolo Vermelho textura argilosa, no município de Palmeira (PR) (25° 23' S, 50° 00' W), pertencente à região dos Campos Gerais do Paraná. O clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cfb, com verões amenos e geadas frequentes durante o inverno. A altitude média é de 920 m. A precipitação pluvial média anual é de cerca de 1.900 mm. Análises químicas do solo, na camada de 0–20 cm, realizadas antes da instalação do experimento, revelaram os seguintes resultados: pH (CaCl₂) de 5,2; acidez potencial (H + Al) de 43 mmol_c dm⁻³; teores de Ca, Mg e K trocáveis de 58, 28 e 1,3 mmol_c dm⁻³, respectivamente; P (Mehlich-1) de 3,5 mg dm⁻³; carbono orgânico de 20 g dm⁻³; capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0 de 130,30 mmol_c dm⁻³; e saturação por bases (V) de 67%. Por ocasião da semeadura foi realizada a adubação com 300 kg ha⁻¹ da fórmula 0-20-20 (N-P₂O₅-K₂O).

O delineamento experimental empregado foi o de blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. Nas parcelas (24 m × 6 m), foram aplicadas quatro doses de N-ureia na semeadura (0, 20, 40 e 60 kg ha⁻¹) e, nas subparcelas (6 m × 6 m), foram empregadas quatro doses de N-ureia em cobertura (0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹).

O trigo (*Triticum aestivum* L.), cv. Quartzo, foi semeado no dia 26 de junho de 2014, após cultivo de soja, com uma população de 350 plantas/m² e espaçamento de 0,17 m entre as linhas. A adubação nitrogenada de cobertura foi realizada por ocasião do perfilhamento da cultura do trigo, no Estádio Decimal 24 (colmo principal e quatro afilhos) da escala de Zadocks, Chang e Konzak (1974). O controle de pragas, doenças e plantas daninhas foi realizado de acordo com as necessidades da cultura, de modo a permitir o adequado desenvolvimento das plantas para alcançar o máximo potencial produtivo.

A precipitação pluvial ocorrida durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo é apresentada na Figura 5.

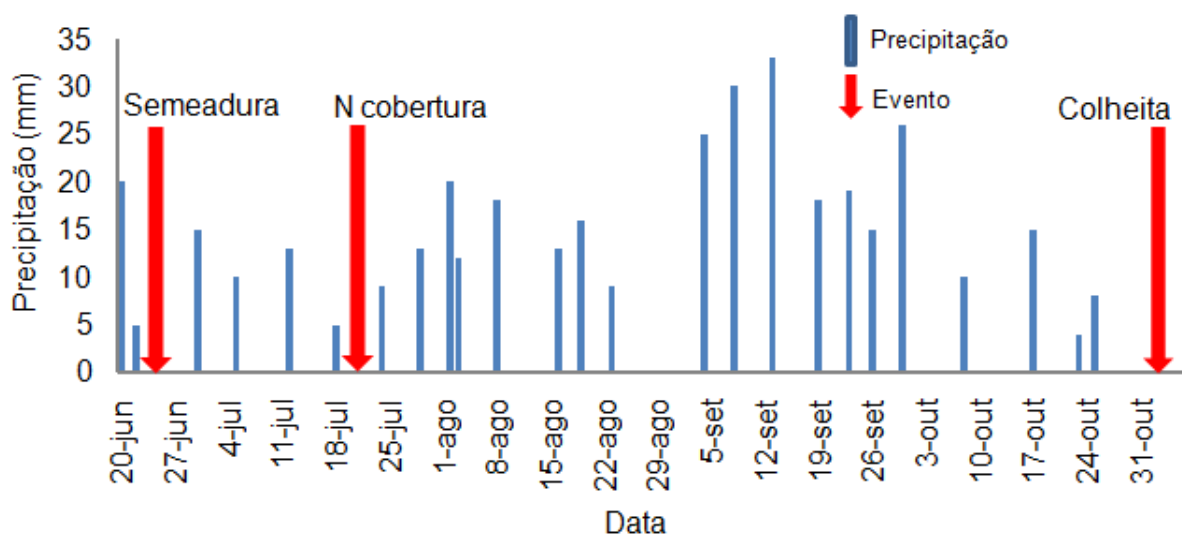


Figura 5: Precipitação pluvial (mm) e eventos ocorridos durante a realização do experimento com a cultura do trigo no município de Palmeira (PR).

As leituras de refletância espectral foram realizadas com o sensor GreenSeeker, o qual foi desenvolvido pela Universidade de Oklahoma (EUA), na década de 1990. Foi utilizado aparelho na versão ativa que, de acordo com Erdle, Mistele e Schmidhalter (2011), utiliza diodos emissores de luz (LEDs) como uma fonte de radiação e detecta a reflexão nas regiões espectrais do visível (VIS) e infravermelho próximo (NIR). A quantidade de luz VIS e NIR refletida pelo dossel de plantas é medida pelo aparelho e transmitida para um computador portátil adaptado ao sensor. Os arquivos são gerados em formato “.CSV” e transformados no formato desejado para posterior cálculo dos índices necessários (KAPP JUNIOR, 2013). Realizaram-se as leituras na região espectral do visível (VIS-650 $\pm$ 10 nm) e do infravermelho (NIR-770 $\pm$ 15 nm). A conversão das leituras obtidas para o índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (ROUSE et al., 1974) foram realizadas pelo aparelho GreenSeeker.

Para avaliar a influência da altura de operação do sensor nas leituras de refletância espectral, o sensor GreenSeeker foi posicionado entre 0,10 m e 1,20 m do dossel das plantas e as leituras foram espaçadas em 0,10 m, totalizando 12 leituras. As leituras de refletância espectral, nas diferentes alturas, foram realizadas por ocasião da aplicação de N em cobertura, delimitando-se uma área de 1,0 m² (2 m $\times$ 0,5 m) para essa avaliação. Como, nessa época, as doses de N em cobertura ainda não tinham sido aplicadas, as subparcelas foram representadas pelas

diferentes alturas de operação do sensor e os tratamentos correspondentes às doses de N em cobertura foram considerados repetições. Estas leituras ocorreram entre as 13:00 horas e as 17:00 horas, em um dia praticamente sem nuvens para não interferir na transmissão da radiação solar.

Para avaliar a influência da época de realização da leitura nos valores de refletância espectral, o sensor GreenSeeker foi posicionado a 0,90 m do dossel das plantas. As leituras de refletância espectral foram realizadas em diferentes estádios durante o desenvolvimento da cultura do trigo, caracterizados pela escala fenológica decimal de Zadocks, Chang e Konzak (1974): (i) Decimal 17 – D17 (sete folhas abertas); (ii) Decimal 20 – D20 (somente o colmo principal); (iii) Decimal 24 – D24 (colmo principal e quatro afilhos); (iv) Decimal 31 – D31 (alongamento – primeiro nó visível); (v) Decimal 34 – D34 (alongamento – quarto nó visível); (vi) Decimal 45 – D45 (emborrachamento completo). Para a realização das leituras com o sensor, delimitou-se uma área de 3 m² (3 m × 1 m) na região central de cada subparcela. Como as doses de N em cobertura foram aplicadas somente em D24, as leituras realizadas em D17, D20 e D24 foram consideradas subparcelas e os tratamentos correspondentes às doses de N em cobertura foram utilizados como repetições. Depois da adubação nitrogenada em cobertura, as subparcelas foram representadas pelas doses de N aplicadas em cobertura e as leituras realizadas em D30, D37 e D45 foram consideradas subsubparcelas.

Para avaliar a influência do período do dia para operação do sensor nas leituras de refletância espectral, o sensor GreenSeeker foi posicionado a 0,90 m do dossel das plantas. No estádio Decimal 50 (Primeira espiguetta da inflorescência recém visível) da escala fenológica decimal de Zadocks, Chang e Konzak (1974), em um dia praticamente sem nuvens e sem orvalho para não interferir na transmissão da radiação solar, foram realizadas leituras de Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) e de refletância espectral. As leituras ocorreram em três diferentes períodos do dia, compreendendo os horários de (i) 7:30–8:30 h (manhã), (ii) 13:00–14:00 h (tarde) e (iii) 19:00–20:00 h (noite), na mesma área de 3 m² (3 m × 1 m) na região central de cada subparcela, delimitada para a avaliação da influência das épocas de leitura. Nesse caso, as leituras realizadas nos diferentes períodos do dia (manhã, tarde e noite) foram consideradas subsubparcelas. Para medir a RFA foi utilizado o sensor AccuPar modelo LP-80 que possui uma sonda de

aproximadamente 86 cm, com 80 sensores que fazem a leitura em unidade quanta (TAIZ e ZEIGER, 2006) com uma resolução de $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Aos 120 DAS, coletaram-se três linhas por quatro metros de plantas ($2,04 \text{ m}^2$), somente a parte aérea, para avaliação da produção de matéria seca. A produção de grãos de trigo foi avaliada após a maturidade fisiológica da cultura, por meio de colheita manual e trilhagem em máquina debulhadora estacionária. Foram colhidas as 20 linhas centrais por 4 m de comprimento de cada subparcela ($13,6 \text{ m}^2$), desprezando-se 2,0 m de cada extremidade. A produtividade de grãos foi calculada em kg ha^{-1} , corrigindo-se o teor de água nos grãos para 130 g kg^{-1} .

Os resultados obtidos foram submetidos às análises de variância e de regressão, de acordo com o delineamento de blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas ou subsubdivididas, dependendo dos fatores avaliados e do momento das leituras. Os efeitos das doses de N, na semeadura e em cobertura, sobre os parâmetros avaliados foram comparados por meio de análises de regressão. Adotou-se como critério para escolha do modelo a magnitude dos coeficientes de determinação significativos a 5%. Os efeitos da altura, da época de realização da leitura e do período para operação do sensor foram comparados pelo teste de Tukey a 5%. As análises estatísticas foram realizadas por meio do software R.

4.3.2 Experimento 2: Influência do estágio de desenvolvimento da cultura do milho nas leituras de refletância espectral

Para avaliar a influência do estágio de desenvolvimento da cultura do milho nas leituras do sensor, foi realizado um experimento na Fazenda Dona Matilde, no município de Palmeira ($25^{\circ} 17' \text{ S}$, $50^{\circ} 04' \text{ W}$), pertencente à região dos Campos Gerais do Paraná. O clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cfb, com verões amenos e geadas frequentes durante o inverno. A altitude média é de 815 m. A precipitação pluvial média anual é de cerca de 1.800 mm. O experimento foi realizado em um Latossolo Vermelho textura argilosa sob plantio direto. Análises químicas do solo, na camada de 0–20 cm, realizadas antes da instalação do experimento, revelaram os seguintes resultados: pH (CaCl_2) de 5,0; acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$) de $62,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; teores de Ca, Mg e K trocáveis de 44, 8,0 e $3,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente; P (Mehlich-1) de $15,3 \text{ mg dm}^{-3}$; carbono orgânico de 30 g dm^{-3} ; capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0 de 117,10

$\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; e saturação por bases (V) de 47%. A área experimental recebeu aplicações de $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário dolomítico e 2 t ha^{-1} de gesso sobre a superfície do solo.

O milho (*Zea mayz* L.), híbrido DKB-290, foi semeado em 8 de outubro de 2013, com uma população de 78 mil plantas por hectare e espaçamento de 0,50 m entre as linhas. Por ocasião da semeadura foi realizada a aplicação de 140 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 140 kg ha^{-1} de K_2O . No estágio de cinco folhas completamente expandidas (V_5) foi realizada a aplicação via foliar de 200 g ha^{-1} de Cu, 200 g ha^{-1} de Mn e 150 g ha^{-1} de Zn.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com 12 repetições. Nas parcelas ($6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$), foram aplicadas quatro doses de N-ureia na semeadura ($0, 20, 40$ e 60 kg ha^{-1}) e, as subparcelas foram representadas pelos estádios nos quais foram realizadas as leituras de refletância: V_2 (duas folhas completamente expandidas), V_3 (três folhas completamente expandidas), V_4 (quatro folhas completamente expandidas), V_5 (cinco folhas completamente expandidas), V_6 (seis folhas completamente expandidas) e V_7 (sete folhas completamente expandidas).

Para a realização das leituras com o sensor GreenSeeker foi delimitada uma área de 3 m^2 ($3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) na região central de cada parcela. O sensor foi posicionado a 0,90 m do dossel das plantas. As leituras obtidas foram convertidas para o índice NDVI.

Os dados de precipitação pluvial ocorrida durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho são apresentados na Figura 6.

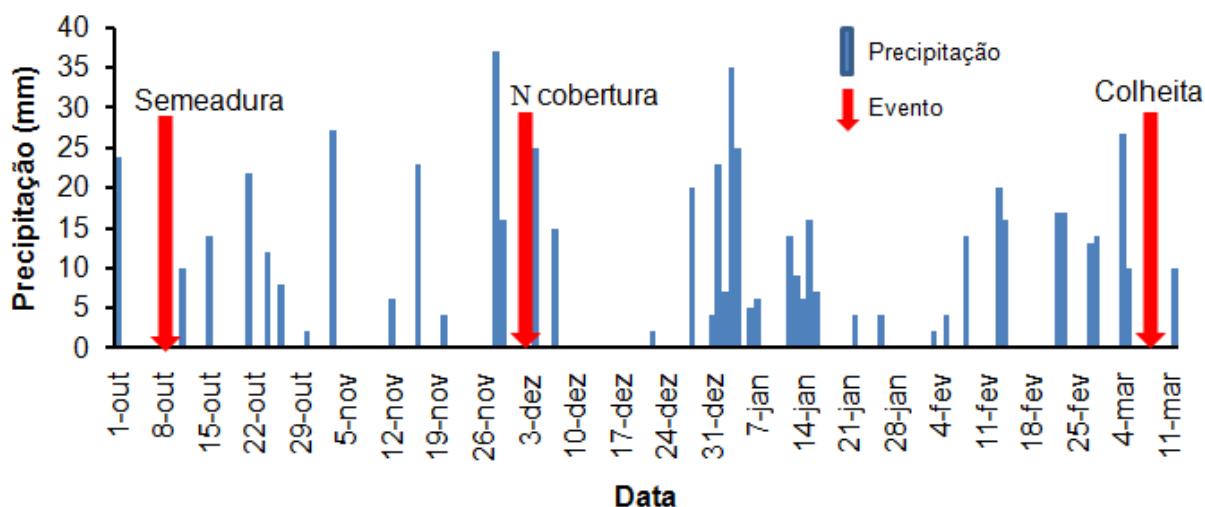


Figura 6: Precipitação pluvial ocorrida durante a realização do experimento da cultura do milho na Fazenda Dona Matilde, em Palmeira (PR).

Os resultados obtidos foram submetidos às análises de variância e de regressão. Os efeitos das doses de N na semeadura nos valores de NDVI foram comparados por meio de análises de regressão. Adotou-se como critério para escolha do modelo, a magnitude dos coeficientes de determinação significativos a 5%. As leituras realizadas nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura do milho foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%. As análises estatísticas foram realizadas por meio do software R.

4.3.3 Experimento 3: Influência da população de plantas de milho e da cobertura do solo nas leituras de refletância espectral

Para avaliar a influência da população de plantas de milho e da cobertura do solo nas leituras do sensor, foi realizado um experimento na Fazenda Escola do CESCAGE, no município de Ponta Grossa (25° 10' S, 50° 06' W), pertencente à região dos Campos Gerais do Paraná. O clima, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cfb, com verões amenos e geadas frequentes durante o inverno. A altitude média é de 830 m. A precipitação pluvial média anual é de cerca de 1.550 mm. O experimento foi realizado em um Latossolo Vermelho textura média sob plantio direto. Análises químicas do solo, na camada de 0–20 cm, realizadas antes da instalação do experimento, revelaram os seguintes resultados: pH (CaCl_2) de 5,1; acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$) de 29 mmolc dm^{-3} ; teores de Ca, Mg e K trocáveis de 46, 7 e $2,3 \text{ mmolc dm}^{-3}$, respectivamente; P (Mehlich-1) de $9,2 \text{ mg dm}^{-3}$; carbono orgânico de 25 g dm^{-3} ; capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0 de $84,3 \text{ mmolc dm}^{-3}$; e saturação por bases (V) de 66%.

O milho, híbrido 30F53YH, foi semeado em 16 de setembro de 2014 no espaçamento de 0,50 m entre as linhas. A adubação empregada na semeadura foi de 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 , 120 kg ha^{-1} de K_2O e 45 kg ha^{-1} de N. A área experimental foi cultivada com soja no ano anterior (2013–14) ao cultivo de milho. A adubação nitrogenada de cobertura na cultura do milho foi realizada por meio da aplicação de 160 kg ha^{-1} de N, na forma de ureia, no estádio V_7 (sete folhas completamente expandidas).

Os dados de precipitação pluvial ocorrida durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho são apresentados na figura 7.

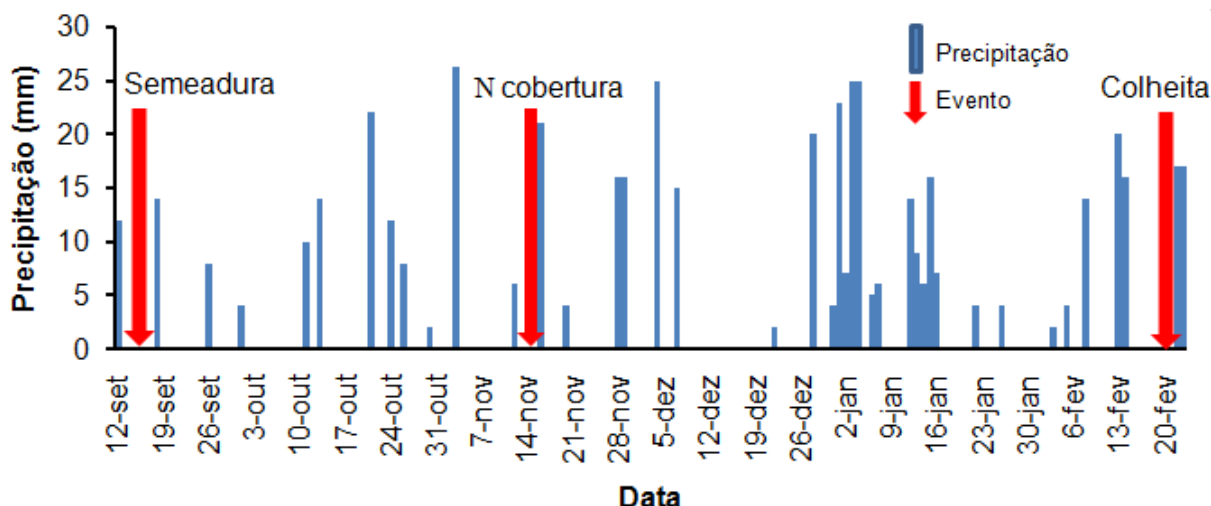


Figura 7: Precipitação pluvial ocorrida durante a realização do experimento da cultura do milho na Fazenda Escola do CESCAGE.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. Nas parcelas (24 m × 6 m), foram aplicados os tratamentos de cobertura do solo: (i) solo descoberto, sendo as plantas daninhas e a soja rebrotada dessecados antes da semeadura e retirados com rastelo; (ii) pousio, sendo as plantas daninhas e a soja rebrotada dessecados antes da semeadura; e (iii) solo coberto com aveia preta, sendo a aveia preta semeada após o cultivo da soja e dessecada antes da instalação do experimento. Nas subparcelas, utilizaram-se cinco populações de milho (40, 60, 80, 100, 120 mil plantas por hectare).

As leituras com o sensor GreenSeeker foram realizadas nos estádios V_5 e V_7 de desenvolvimento da cultura. Para a realização das leituras, foi delimitada uma área de 3 m² (3 m × 1 m) na região central de cada subparcela. O sensor foi posicionado a uma altura de aproximadamente 90 cm do dossel das plantas. As leituras do sensor foram convertidas em NDVI.

Os resultados obtidos foram submetidos às análises de variância e de regressão. As leituras de refletância realizadas nos diferentes tratamentos de cobertura do solo foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% e aquelas referentes às populações de plantas foram analisadas por regressão. O critério adotado para a escolha dos modelos foi a magnitude dos coeficientes de determinação significativos a 5%. As análises estatísticas foram realizadas por meio do software R.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.4.1 Produtividade de matéria seca da parte aérea e de grãos de trigo influenciadas pela aplicação de nitrogênio

A produtividade de matéria seca da parte aérea e de grãos de trigo não foi influenciada significativamente pelas doses de N na semeadura e pela interação entre doses de N na semeadura $\times$ doses de N em cobertura (Tabelas 5 e 6).

Tabela 5: Análise de variância para os efeitos de doses de N na semeadura e em cobertura na produtividade de matéria seca da parte aérea de trigo.

	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F	Pr > Fc
Blocos	2	3.468.618,00	1.734.309,00	2,96	0,127962
N semeadura (a)	3	1.861.812,00	620.604,00	1,06	0,434054
Erro a	6	3.523.411,00	587.235,00		
N cobertura (b)	3	12.529.148,00	4.176.383,00	9,55	0,000247 ***
N semeadura x N cobertura	9	3.182.473,00	353.608,00	0,81	0,613211
Erro b	24	10.498.562,00	437.440,00		
Total	47	35.064.023,00			

***: $P < 0,001$.

Tabela 6: Análise de variância para os efeitos de doses de N na semeadura e em cobertura na produtividade de grãos de trigo.

	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F	Pr > Fc
Blocos	2	801.505,00	400.753,00	1,47	0,30
N semeadura (a)	3	2.743.674,00	914.558,00	3,37	0,10
Erro a	6	1.626.516,00	271.086,00		
N cobertura (b)	3	8.183.747,00	2.727.916,00	7,75	0,00086 ***
N semeadura x N cobertura	9	2.995.414,00	332.824,00	0,95	0,51
Erro b	24	8.438.827,00	351.618,00		
Total	47	24.789.683,00			

***: $P < 0,001$.

As doses de N em cobertura aumentaram ($P < 0,01$) a produtividade de matéria seca da parte aérea, conforme o modelo linear (Figura 8), e a produtividade de grãos de trigo, de acordo com o modelo quadrático (Figura 9). De acordo com a equação de regressão ajustada, a máxima produtividade de grãos de trigo (4.280 kg ha^{-1}) seria obtida com a aplicação de 65 kg N ha^{-1} em cobertura.

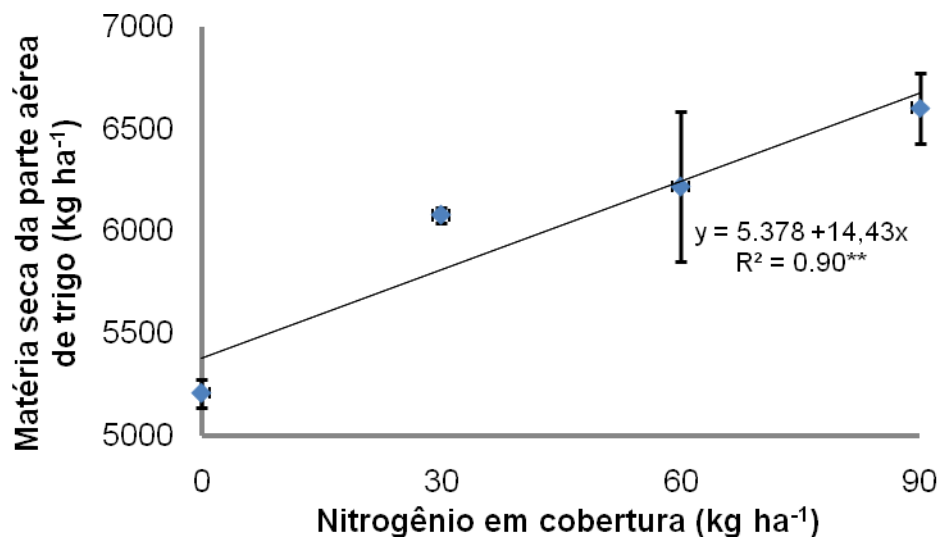


Figura 8: Matéria seca da parte aérea da cultura do trigo em função das doses de nitrogênio aplicadas em cobertura. **: $P < 0,01$. As barras verticais indicam o desvio padrão da média.

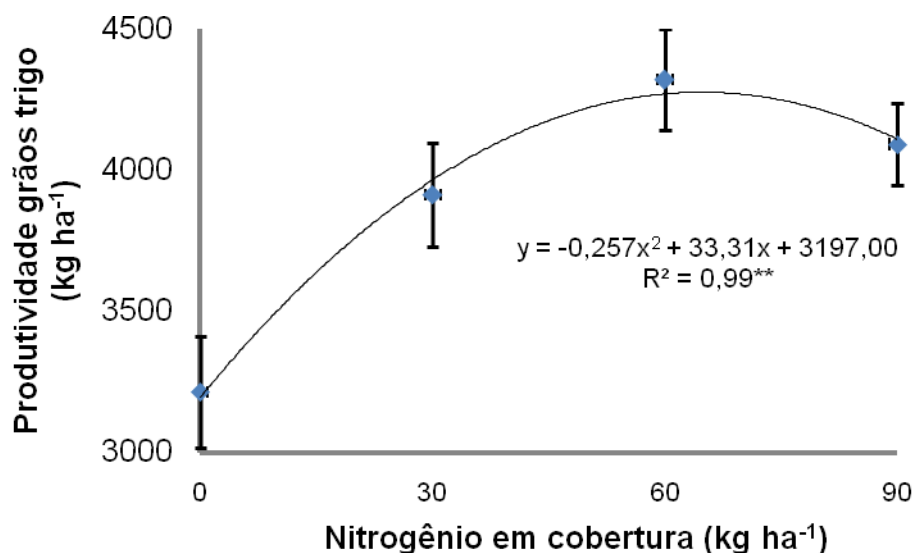


Figura 9: Produtividade de grãos de trigo em função das doses de nitrogênio aplicadas em cobertura. **: $P < 0,01$. As barras verticais indicam o desvio padrão da média.

É frequente a ocorrência de efeito positivo da adubação nitrogenada na cultura do trigo (TRINDADE *et al.* 2006; ZAGONEL *et al.* 2002; KAPP JUNIOR, CAIRES e GUIMARÃES, 2014). Isso é devido à essencialidade dos compostos nitrogenados para as plantas (MALAVOLTA e MORAES, 2007) e pelo fato de a disponibilidade de N no solo ser controlada, principalmente, pela decomposição de matéria orgânica, por reações do N no solo e pela adubação nitrogenada (SILVA *et al.*, 2006).

4.4.2 Interferência da altura de trabalho do sensor nas leituras de refletância espectral da cultura do trigo

Os valores de NDVI, obtidos a partir das leituras de refletância espectral, não foram influenciados significativamente pela interação entre a altura de posicionamento do sensor × doses de N aplicadas em semeadura na cultura do trigo.

Os valores de NDVI calculados pelas leituras de refletância realizadas por ocasião da emissão do 4º perfilho (momento em que foi realizada aplicação de N em cobertura), correlacionaram-se linearmente ($P < 0,01$) com as doses de N aplicadas na semeadura (Figura 10). Em geral, os valores de NDVI se ajustam conforme o modelo linear ou quadrático em função das doses de N (POVH et al., 2008; KAPP JUNIOR, CAIRES e GUIMARÃES, 2014; ALI et al., 2015). Apesar de a produtividade de matéria seca da parte aérea do trigo na maturidade fisiológica e a produtividade de grãos não terem sido influenciadas pelas doses de N aplicadas na semeadura, os valores de NDVI demonstraram que as doses de N na semeadura favoreceram o crescimento inicial das plantas de trigo. Isso aconteceu mesmo com a área tendo sido cultivada com soja antes do trigo.

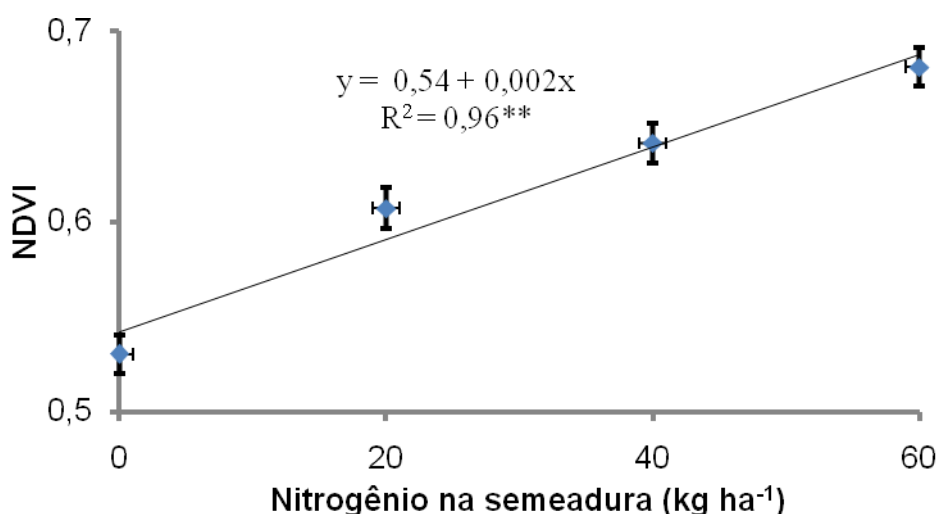


Figura 10: Valores de NDVI em função das doses de nitrogênio aplicadas na semeadura da cultura do trigo, no momento em que foi realizada aplicação de N em cobertura (Estádio D24 de ZADOCKS, CHANG e KONZAK, 1974). **: $P < 0,01$. As barras verticais indicam o desvio padrão da média.

Os valores de NDVI foram influenciados significativamente pela altura de posicionamento do sensor em relação ao dossel de plantas de trigo (Tabela 7).

Tabela 7: Médias de valores de NDVI em cada altura de posicionamento do sensor GreenSeeker em relação ao dossel de plantas de trigo.

Altura de posicionamento do sensor em relação ao dossel de plantas de trigo (cm)	NDVI do sensor GreenSeeker
10	0,82230 a
20	0,76896 a
30	0,59832 b
40	0,56001 b
50	0,56403 b
60	0,56711 b
70	0,57801 b
80	0,56843 b
90	0,57684 b
100	0,58966 b
110	0,59636 b
120	0,58652 b

Médias seguidas de letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Tukey (P=0,05).

É indicado que o sensor seja posicionado entre 80 e 120 cm do dossel das plantas (NTECH INDUSTRIES, 2007). Neste estudo, os posicionamentos mais próximos ao dossel das plantas resultaram em maiores valores de NDVI. A média das leituras de NDVI à 10 cm do dossel das plantas não apresentou diferença da média das leituras na altura de 20 cm; e essas médias foram maiores do que as médias obtidas entre 30 e 120 cm de altura do dossel das plantas. As médias de valores de NDVI não apresentaram diferenças significativas quando o sensor foi posicionado entre 30 e 120 cm do dossel das plantas. Isso permite uma margem de segurança para oscilações de altura de trabalho do aparelho. Por exemplo, se o sensor for instalado à 100 cm do dossel e ocorrerem oscilações de ± 20 cm (para cima ou para baixo) durante o deslocamento da máquina agrícola, a eficiência do sensor não seria prejudicada por oscilações nos valores de NDVI obtidos. Esses resultados foram próximos dos obtidos por Kipp, Mistele e Schmidhalter (2013), os quais encontraram o espaço entre 70 e 140 cm do dossel das plantas como os níveis de altura nos quais não houve oscilações de valores de NDVI.

4.4.3 Interferência do estágio de desenvolvimento da cultura do trigo nas leituras de refletância

Não houve interação significativa entre épocas de leitura de refletância espectral e doses de N aplicadas na semeadura do trigo, para as leituras realizadas antes da aplicação de N em cobertura. Porém, os valores de NDVI calculados a partir das leituras aumentaram na medida em que os estádios de desenvolvimento

da cultura foram avançando (Tabela 8) e também na medida em que houve aumento das doses de N aplicadas na sementeira (Figura 11).

Tabela 8: Valores de NDVI em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura do trigo, antes da aplicação de nitrogênio em cobertura.

Estádio de desenvolvimento da cultura do trigo (ZADOCKS, CHANG e KONZAK, 1974)	NDVI
D17 - sete folhas abertas	0,214 c
D20 - somente o colmo principal	0,331 b
D24 - colmo principal e quatro afilhos	0,553 a

Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P=0,05$).

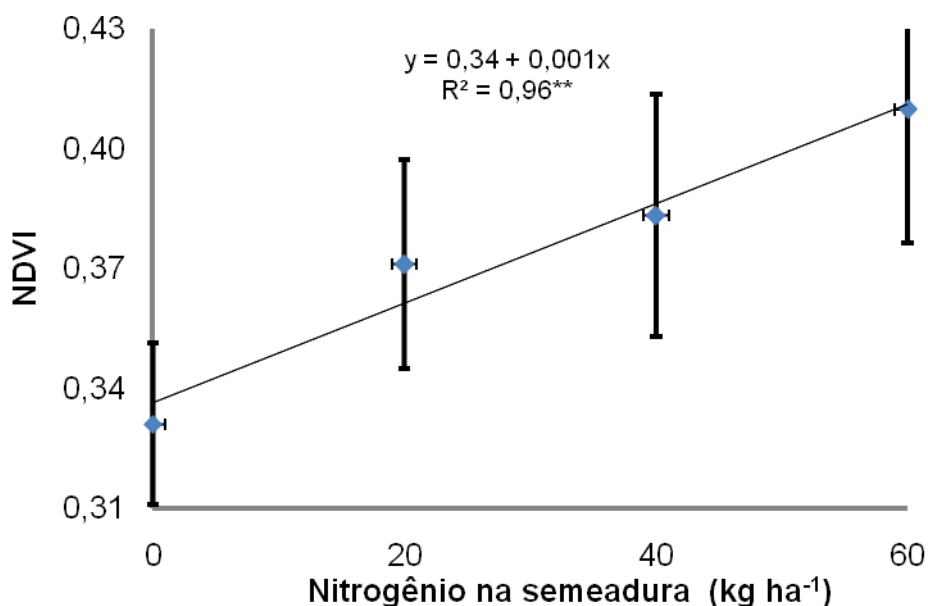


Figura 11: Valores médios de NDVI obtidos nos Estádios D17, D20 e D24 (ZADOCKS, CHANG e KONZAK, 1974), de acordo com as doses de nitrogênio aplicadas na sementeira da cultura do trigo. **: $P < 0,01$. As barras verticais indicam o desvio padrão da média.

As leituras de NDVI realizadas após aplicação de N em cobertura não foram influenciadas pelas interações entre os tratamentos. As doses de N na sementeira não ocasionaram alterações nas leituras de refletância espectral, após a aplicação de N em cobertura. As leituras de refletância espectral realizadas após a cobertura nitrogenada apresentaram diferenças significativas na medida em que foram avançando os estádios de desenvolvimento da cultura do trigo (Tabela 9). As doses de N em cobertura influenciaram os valores de NDVI ($p < 0,05$) obtidos após a aplicação de N em cobertura, conforme modelo quadrático (Figura 12).

Tabela 9: Valores de NDVI em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura do trigo, após a aplicação de nitrogênio em cobertura.

Estádio de desenvolvimento da cultura do trigo (ZADOCKS, CHANG e KONZAK, 1974)	NDVI
D31 - Alongamento – primeiro nó visível	0,718 b
D34 - Alongamento – quarto nó visível	0,734 b
D45 - Emborrachamento completo	0,782 a

Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P=0,05$).

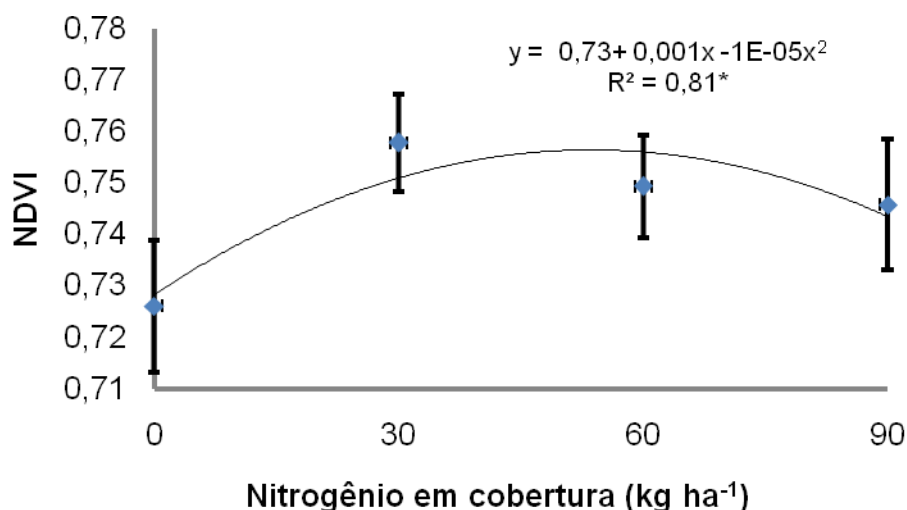


Figura 12: Valores médios de NDVI em função das doses de nitrogênio aplicadas em cobertura na cultura do trigo. *: $P < 0,05$. As barras verticais indicam o desvio padrão da média.

Resultados semelhantes aos observados no presente estudo com relação aos valores de NDVI, em função das doses de N e dos estádios de desenvolvimento, foram obtidos por Rissini, Kawakami e Genú (2015). Esses autores identificaram, ainda, a influência de cultivares na obtenção das leituras de NDVI.

4.4.4 Interferência do período do dia nas leituras de refletância da cultura do trigo

As doses de N em cobertura aumentaram linearmente ($p < 0,01$) os índices de leitura de refletância (NDVI), mensurados no estágio Decimal 50 (Primeira espiguetta da inflorescência recém visível) da escala fenológica decimal de Zadocks, Chang e Konzak (1974), (Figura 13).

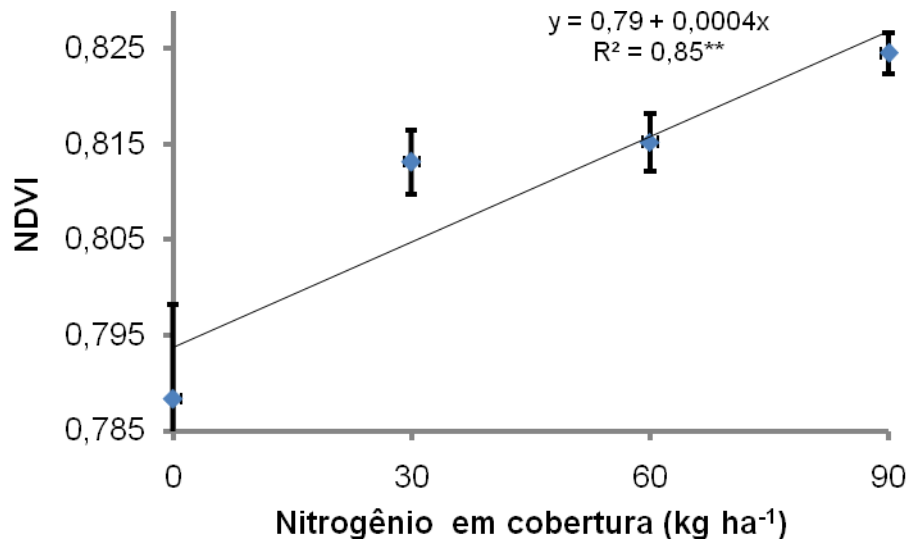


Figura 13: Valores de NDVI, mensurados no estágio Decimal 50 (Primeira espiguetta da inflorescência recém visível) da escala fenológica decimal de Zadocks, Chang e Konzak (1974), em função das doses de nitrogênio aplicadas em cobertura na cultura do trigo. $**P < 0,01$. As barras verticais indicam o desvio padrão da média.

As leituras de RFA no período da manhã aumentaram em cerca de $6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a cada minuto, saindo de $540 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no horário de 7:30 h e chegando a $900 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no horário próximo de 8:30 h (Figura 14).

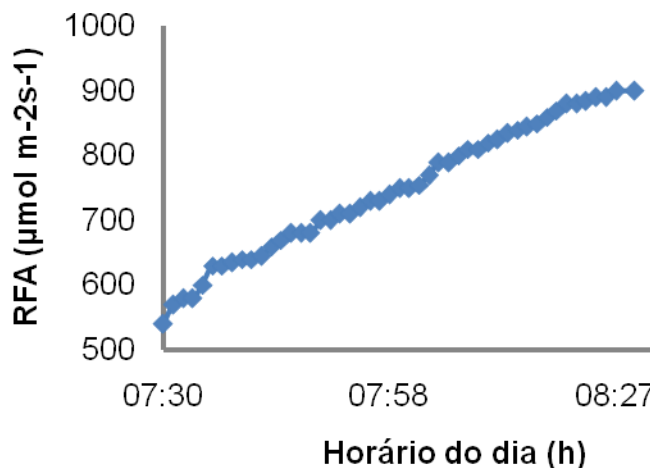


Figura 14: Valores de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) observados no período da manhã.

No período da tarde, as leituras foram realizadas em um momento em que a RFA já estava diminuindo aproximadamente $2,15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a cada minuto, saindo de $1750 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no horário de 13:00 h e chegando a $1620 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no horário próximo de 14:00 h (Figura 15).

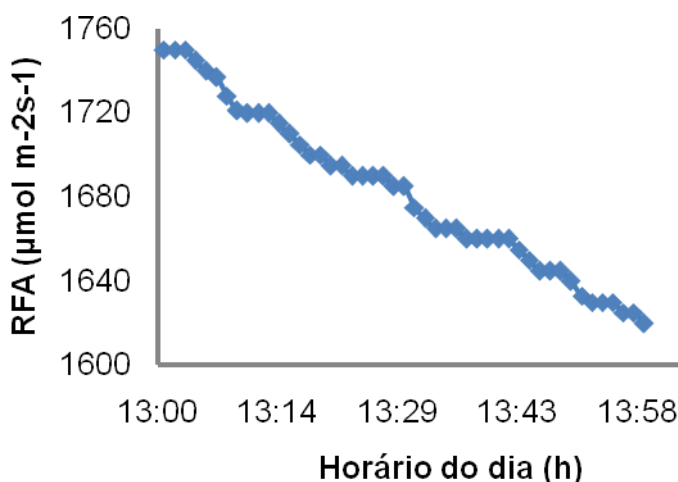


Figura 15: Valores de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) observados no período da tarde.

A irradiância da RFA em dia ensolarado pode atingir valores de aproximadamente $2.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sendo que valores maiores podem ser registrados em altitudes mais elevadas (TAIZ e ZAIGER, 2006). À noite não foi encontrada incidência de RFA.

Os valores médios de NDVI calculados a partir das leituras de refletância espectral apresentaram diferenças significativas nos diferentes períodos de leitura (Tabela 10). Os valores de NDVI seguiram a seguinte ordem: noite > manhã > tarde.

Tabela 10: Leituras de refletância espectral (NDVI) em períodos diferentes do dia em função das doses de nitrogênio em cobertura na cultura do trigo.

Período	Horário (h)	NDVI
Manhã	07:30 - 08:30	0,813 b
Tarde	13:00 - 14:00	0,788 a
Noite	19:00 - 20:00	0,830 c

Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P=0,05$).

Esses resultados indicam que no momento de maior RFA observou-se menor valor de NDVI. Um dos comportamentos que pode explicar estes resultados é a resposta típica das plantas quando exposta à luz azul (presente na RFA). As clorofilas absorvem luz principalmente das porções vermelho e azul do espectro. A refletância na região de 670 nm (vermelho) é cerca de 5% e, na região do infravermelho próximo, é da ordem de 40 a 60% (GITELSON, 2004). Sob menor incidência de luz azul, os cloroplastos acumulam-se paralelamente ao plano da folha, de modo que se alinham perpendicularmente à luz incidente. Essa posição maximiza a absorção de luz, diminuindo a refletância. Sob maior incidência de luz

azul, os cloroplastos se movem para as paredes laterais, reduzindo a exposição à luz e, assim, minimizando sua absorção e maximizando a refletância (TAIZ e ZAIGER, 2006). Destaca-se que os maiores valores de NIR e VIS, mensurados pelo sensor GreenSeeker, foram obtidos nos momentos do dia em que houve maior incidência de RFA.

A RFA pode não ter influenciado diretamente as leituras pelo seu efeito nos valores de refletância (KIPP, MISTELE e SCMDHALTER, 2013). No entanto, a relação natural entre RFA e temperatura do ambiente (MARTIN, STORK e DOURADO NETO, 2007), faz com que indiretamente esse fator afete os valores de NDVI (RAHMAN, LAMB E STANLEY, 2015).

A produção de matéria seca da parte aérea do trigo correlacionou-se linearmente com os valores de NDVI calculados pelas leituras de refletância (Figura 16). Os coeficientes de determinação (R^2) foram de 0,99 ($P<0,01$) para as leituras realizadas no período da noite, 0,98 ($P<0,01$) para as leituras realizadas no período da manhã e 0,97 ($P<0,05$) para as leituras realizadas no período da tarde.

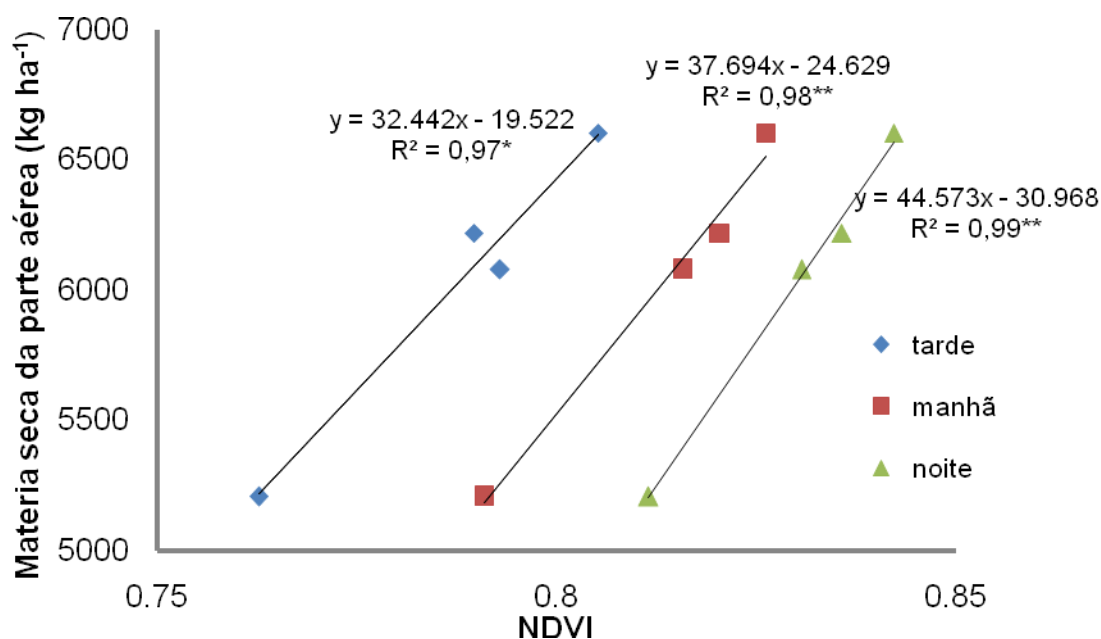


Figura 16: Matéria seca da parte aérea do trigo em função do NDVI. * $P<0,05$; ** $P<0,01$.

Como as leituras foram realizadas no mesmo local e na mesma altura do dossel, as diferenças nos valores foram, certamente, ocasionadas pela interferência do período em que as leituras foram realizadas. Dessa forma, observa-se a necessidade de controlar o período do dia no qual se está trabalhando com sensores ativos, pois uma distorção na leitura pode causar grande diferença em

situações práticas de utilização de tecnologias embarcadas. Por exemplo, se estes aparelhos forem utilizados para a prescrição de doses de N, como no trabalho de Holland e Schepers (2010), o descuido com itens que podem distorcer a leitura de refletância e, conseqüentemente, o valor de NDVI, pode acarretar em super ou subestimativa da dose ótima de N a ser aplicada na cultura do Trigo.

4.4.5 Interferência do estágio de desenvolvimento da cultura do milho nas leituras de refletância espectral

Os valores de NDVI do dossel de plantas de milho foram influenciados significativamente pela interação entre doses de N na semeadura × estádios de desenvolvimento da cultura do milho. As doses de N na semeadura correlacionaram-se linearmente ($p < 0,01$) com os valores de NDVI em quase todos os estádios de desenvolvimento da cultura do milho avaliados. A única exceção foi no estágio inicial (V_2), quando não houve diferenças nas medidas de NDVI obtidas em função das doses de N na semeadura (Figura 17).

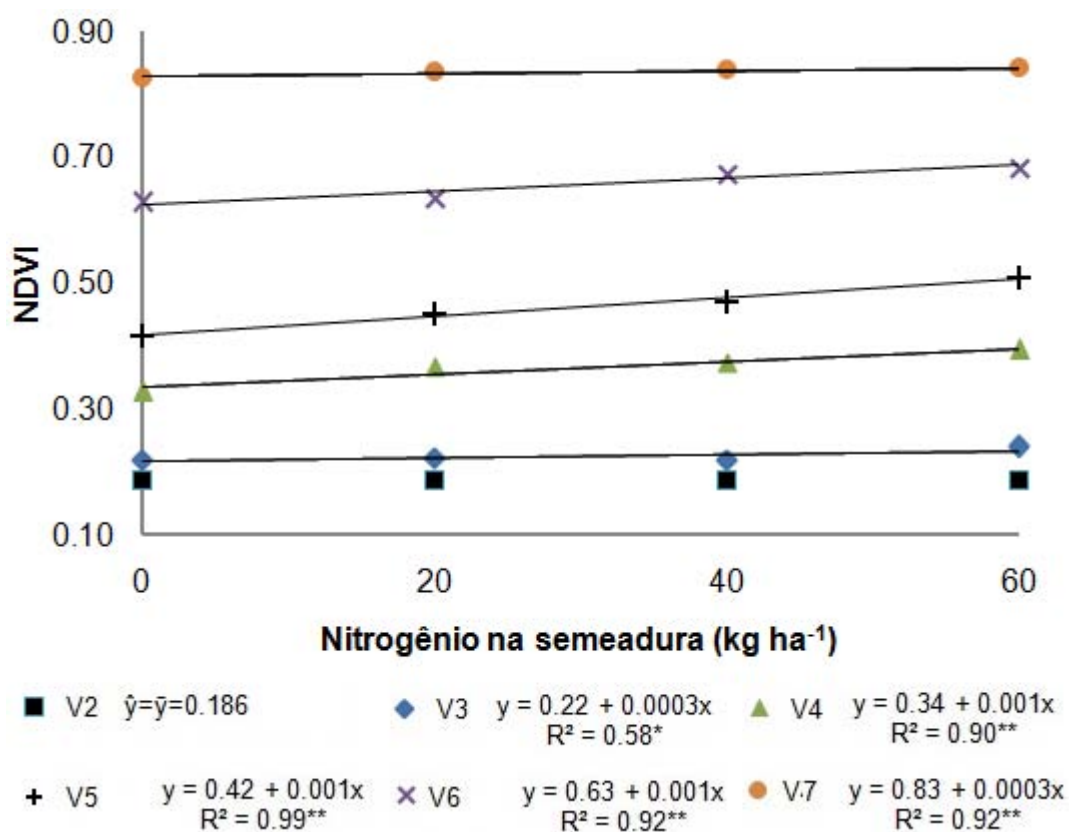


Figura 17: NDVI nos estádios V_2 , V_3 , V_4 , V_5 , V_6 e V_7 da cultura do milho em função das doses de N em semeadura. * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$.

Os valores de NDVI apresentaram diferenças significativas em todos os estádios de desenvolvimento da cultura do milho, para cada dose de N aplicada na semeadura (Tabela 11).

Tabela 11: Valores de NDVI para cada dose de nitrogênio na semeadura (N-sem), em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura do milho.

N-sem kg ha ⁻¹	Estádio					
	V2	V3	V4	V5	V6	V7
0	0,184 a	0,220 b	0,328 c	0,415 d	0,629 e	0,826 f
20	0,180 a	0,224 b	0,369 c	0,469 d	0,637 e	0,835 f
40	0,185 a	0,220 b	0,375 c	0,471 d	0,676 e	0,840 f
60	0,194 a	0,240 b	0,395 c	0,508 d	0,685 e	0,842 f

Médias seguidas por letras iguais nas linhas não diferem significativamente pelo teste de Tukey (P=0,05).

Nota-se que, em cada dose de N, o valor de NDVI aumentou com o avanço do desenvolvimento da cultura do milho. As produtividades de grãos e de biomassa da parte aérea de milho têm correlação mais estreita com o NDVI à medida que a cultura do milho vai se desenvolvendo (MARTIN, *et al.* 2007). Porém, é possível que ocorra saturação do índice NDVI com leituras em estádios mais avançados, em que a quantidade de biomassa é maior (POVH e ANJOS, 2015).

Hatfield *et al.* (2008) demonstraram que saturação dos índices de refletância em culturas, com o aumento de doses de N e copas densas, pode ocorrer mais facilmente nos índices que utilizam parâmetros dependentes de luz vermelha. A alta produção de biomassa aumenta a refletância no infravermelho próximo, mas a normalização no cálculo do NDVI torna esse índice insensível a esta variação quando a refletância é muito maior que no vermelho (GITELSON, 2004 citado por Povh *et al.*, 2008). Para este caso, Povh *et al.* (2008) aconselham utilizar um comprimento de onda na banda do verde que possui refletância maior que a do vermelho e diminui esta diferença. No presente estudo, não foi possível realizar esta substituição porque o aparelho GreenSeeker não permite esta troca.

4.4.6 Interferência da população de plantas de milho e da cobertura do solo nas leituras de refletância espectral

Os valores de NDVI obtidos a partir das leituras do sensor no estágio V₅ não foram influenciados pela cobertura do solo e pela interação entre os tratamentos de cobertura do solo × população de plantas de milho. As leituras de NDVI aumentaram

de modo linear ($p < 0,01$) com o aumento da população de plantas de milho (Figura 18).

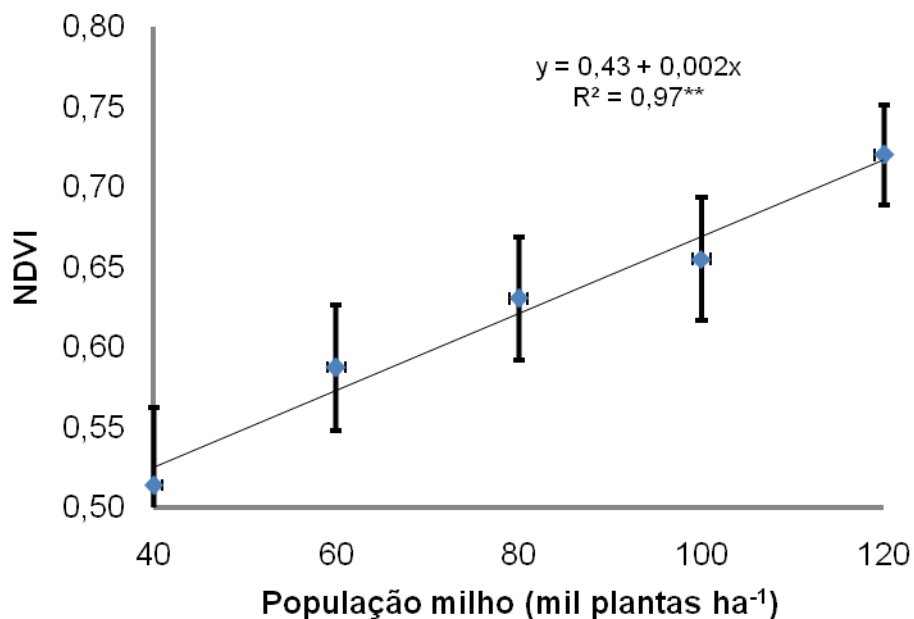


Figura 18: Valores de NDVI em função da população de plantas de milho no estágio V₅. ** $P < 0,01$. As barras verticais indicam o desvio padrão da média.

No estágio V₇ da cultura do milho, a cobertura do solo continuou não influenciando e não apresentando interação com população de plantas de milho para gerar valores de NDVI com as leituras de refletância. A população de plantas de milho, em V₇, também não influenciou os valores de NDVI, diferente do que foi observado em V₅. Em V₇ o maior crescimento da estrutura vegetal onde existia menor população de plantas, anulou o efeito observado anteriormente em função do nível populacional de plantas de milho.

Jones et al. (2015) observaram efeitos de resíduos culturais na avaliação de NDVI em milho, nos estádios iniciais (V₂ e V₃). Já, com leituras em estádios um pouco mais avançados (V₄ e V₅), tais diferenças poucas vezes foram observadas. No estágio V₆, os autores identificaram diferenças apenas em local onde não havia resíduos e em locais com resíduos culturais. Conforme explicam Govaerts *et al.* (2007), a cobertura do solo, influenciada pelo tipo de manejo adotado, pode alterar alguns atributos químicos, físicos e biológicos do solo, e isso pode afetar o desenvolvimento das culturas. Sendo assim, o NDVI pode ser influenciado pelo maior ou menor desenvolvimento da cultura em resposta a manejos diferenciados do solo. Neste caso, a adoção de uma faixa de referência (faixa rica), nas mesmas condições de manejo, já estaria controlando essas possibilidades de variações.

4.5 CONCLUSÕES

A adubação nitrogenada na semeadura não interferiu na produtividade de matéria seca da parte aérea e de grãos de trigo. Mesmo assim, as doses de nitrogênio na semeadura favoreceram o arranque inicial da cultura do trigo, o qual foi observado pelas leituras de refletância espectral. As doses de nitrogênio aplicadas em cobertura na cultura do trigo apresentaram estreita correlação com a produtividade de matéria seca da parte aérea e, conseqüentemente, com as leituras de NDVI realizadas com sensor ativo GreenSeeker.

Os valores de NDVI obtidos a partir das leituras com o sensor ativo Greenseeker apresentaram diferenças em relação à altura de operação do sensor. Essas diferenças foram estabilizadas entre 30 cm e 120 cm. Se respeitada a indicação do fabricante quanto à altura de trabalho do sensor, esse fator não ocasionará nenhuma distorção nos resultados obtidos com o equipamento.

O sensoriamento remoto pode ser utilizado para acompanhar o desenvolvimento das culturas de trigo e milho, pois as leituras de refletância espectral foram diferentes entre os estádios testados. No caso do trigo, isso aconteceu antes e após a aplicação e N em cobertura, e no caso do milho, antes da aplicação de N em cobertura.

A radiação fotossinteticamente ativa interfere indiretamente nos valores de NDVI obtidos pelas leituras com o sensor ativo GreenSeeker. Maiores valores de NDVI são obtidos em momentos do dia em que a radiação incidente é mais baixa. Apesar de ser possível realizar as leituras de NDVI em qualquer período (manhã, tarde ou noite), é importante considerar a interferência da radiação fotossinteticamente ativa no ajuste de modelos de prescrição de doses de nitrogênio, a partir de leituras de refletância espectral com sensores ópticos.

As coberturas do solo testadas neste capítulo não interferiram nas leituras de refletância espectral realizadas. A diferença populacional de plantas de milho pode ser observada pelas leituras de refletância espectral nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura.

5 MODELO PARA PRESCRIÇÃO DE DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA PARA A CULTURA DO MILHO COMBINANDO LEITURA DE REFLETÂNCIA ESPECTRAL COM EFICIÊNCIA AGRONÔMICA

RESUMO: O sensoriamento remoto é uma técnica que pode aprimorar a recomendação de adubação nitrogenada para os cereais. Esta técnica auxilia na identificação de doses adequadas de nitrogênio (N) em doses variáveis, de acordo com a demanda localizada, evitando prejuízos ambientais e financeiros. Este trabalho teve o objetivo de propor um modelo para a prescrição da necessidade de N para a cultura do milho, a partir de dados de leitura de refletância espectral. Para isso, foram realizados dois experimentos com a cultura do milho (*Zea mays* L.). O primeiro foi instalado no dia 8 de outubro de 2013 e o segundo no dia 8 de outubro de 2014. Para ambos os experimentos, o delineamento experimental empregado foi de blocos completos ao acaso em esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. Nas parcelas (24 m × 6 m), foram aplicadas quatro doses de N-ureia na semeadura (0, 20, 40 e 60 kg ha⁻¹) e, nas subparcelas (6 m × 6 m), foram empregadas quatro doses de N-ureia em cobertura (0, 80, 160 e 240 kg ha⁻¹) no estágio de desenvolvimento V₇ (sete folhas completamente expandidas). Foi proposto um modelo para prescrição de doses de N em cobertura para a cultura do milho combinando leitura de refletância espectral com eficiência agronômica. Observou-se uma relação quadrática entre o ganho na produtividade de milho com a adição de N e a eficiência agronômica do N em cobertura. Esta relação foi utilizada para propor um modelo de prescrição de N em cobertura a partir de leituras de refletância espectral. Os resultados mostraram, para aos anos agrícolas estudados, que o modelo (i) indicou produtividades próximas aos máximos rendimentos de grãos obtidos pela equação de regressão, (ii) revelou resultado econômico próximo àquele obtido com a dose econômica e (iii) respeitou a limitação de produtividade encontrada pela situação de campo. Concluiu-se que o sensoriamento remoto apresentou grande potencial para melhorar a eficiência de aplicação de fertilizantes nitrogenados. A eficiência agronômica do N em cobertura foi um indicador importante para ser utilizado em modelos para prescrição de adubação nitrogenada visando aumentar a eficiência desta tecnologia. Destaca-se que esta tecnologia é mais um instrumento e que a combinação com outros estudos e tecnologias pode contribuir para aumentar a eficiência no uso dos fertilizantes nitrogenados na agricultura.

Palavras-chave: Leitura de refletância espectral, adubação nitrogenada, taxa variável, modelo de prescrição.

5 MODEL FOR PRESCRIPTION OF TOPDRESS NITROGEN FOR MAIZE CULTURE COMBINING SPECTRAL REFLECTANCE MEASUREMENT WITH AGRONOMIC EFFICIENCY

ABSTRACT: Remote sensing is a technique that can improve the recommendation of nitrogen fertilization for cereals. This technique assists in the identification of adequate doses of nitrogen (N) in variable rates, according to the localized demand, avoiding environmental and financial damages. This chapter aimed to propose a model for the prescription of the necessity of N for the maize (*Zea mays* L.) crop, from data of spectral reflectance measurement. For this, two experiments were carried out with maize. The first was installed on October 8, 2013 and the second on October 8, 2014. For both experiments, the experimental design was a complete randomized block, in a subdivided plot scheme, design with three replications. In the plots (24 m × 6 m), four doses of N-urea were applied at sowing (0, 20, 40 and 60 kg ha⁻¹) and, in the subplots (6 m × 6 m), four N-urea in topdress (0, 80, 160 e 240 kg ha⁻¹) at the V₇ development stage (seven fully expanded leaves). It was proposed a model for prescription N rates in topdressing for maize combining spectral reflectance measure with Agronomic Efficiency of Nitrogen in Topdress (EANT). It was identified a quadratic relation between maize productivity gain with N topdress and EANT. This relationship was used to propose the model of prescription of N in coverage from spectral reflectance measurement. The results of the proposed model showed: (i) productivity close to the maximum indicated by the regression equation; (ii) economic result close to that obtained with the economic dose; (ii) respected the productivity limitation found by the field situation. It was concluded that remote sensing presents potential to improve the efficiency of application of nitrogen fertilizers in cereals. The agronomic efficiency of topdress N was an important indicator to be used in models for prescription of nitrogen fertilization in order to increase the efficiency of this technology. It should be noted that this technology is another instrument and that the combination with other studies and technologies can contribute to increase the efficiency in the use of nitrogen fertilizers in agriculture.

Keywords: Spectral reflectance reading, nitrogen fertilization, variable rate, prescription model.

5.1 INTRODUÇÃO

A sincronia da disponibilidade de nitrogênio (N) com a necessidade das culturas é complexa, pois o N no solo é dinâmico e está sujeito a processos de mineralização, imobilização, volatilização, nitrificação, desnitrificação e lixiviação. Estas transformações são afetadas por diversos fatores como temperatura, umidade (MARTHA JUNIOR, *et al.* 2004), textura do solo (BUSO E KLIEMANN, 2003), época de aplicação, fonte do fertilizante nitrogenado (LARA CABEZAS E COUTO, 2007), cultura antecessora (FONTOURA E BAYER, 2009) e sistema de cultivo (FARINELLI E LEMOS, 2012).

A dinâmica do N faz com que ocorram demandas variáveis por N em uma mesma área agrícola. Na maioria das situações, é difícil prever a quantidade de N disponível no solo para absorção pelas plantas (KOCH *et al.*, 2004). Tanto o excesso quanto a falta de N podem ser prejudiciais, respectivamente para o ambiente e para os resultados financeiros da propriedade (LAMBERT, LOWENBERG-DEBOER e MALZER, 2006; HONG *et al.*, 2007), o que justifica o desenvolvimento de estudos para aplicação de N em taxa variável.

A literatura tem abordado o desenvolvimento de modelos para a conversão dos índices obtidos por sensores de refletância em doses de fertilizante nitrogenado (RAUN *et al.*, 2002; POVH *et al.*, 2008; HOLLAND E SCHEPERS, 2010; SOLIE, *et al.* 2012). No entanto, esta modelagem é complexa, pois além da dinâmica do ciclo do N no sistema solo-planta (KERBAUY, 2004), fatores relacionados com solo, planta, condições de operação do sensor e edafoclimáticas podem interferir nos índices gerados pelo sensoriamento remoto (MADEIRA, GILLESPIE E DUKE, 2001; BREUNING *et al.*, 2013; KIPP, MISTELE E SCHMIDHALTER, 2013; RISSINI, KAWAKAMI E GENÚ, 2015).

A aplicação de N em excesso pode diminuir a eficiência agronômica (FAGERIA e BALIGAR, 2005), trazendo piores resultados econômicos ao produtor, além de passivos ambientais como eutrofização de corpos d'água e emissão de formas gasosas com alto impacto no efeito estufa (GARCIA, CARDOSO E SANTOS, 2013).

Em alguns trabalhos, a eficiência agronômica (EA) com a aplicação de N em taxa variável por meio de modelos que utilizam o sensoriamento remoto demonstraram bons resultados (BRAGAGNOLO *et al.* 2013; BRAGAGNOLO *et al.*

2016). Considerar a EA do N como um fator a ser modelado na indicação de doses de N em cobertura, a partir de leituras de refletância espectral, poderia aumentar a eficiência da utilização do sensoriamento remoto para esse fim.

5.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste capítulo foram (i) avaliar os efeitos da adubação nitrogenada na produção de matéria seca da parte aérea, na produtividade de grãos de milho e nos valores de NDVI em plantas de milho; (ii) adicionar a EA na modelagem e propor um modelo para prescrição de doses de N a partir de leituras de refletância espectral; (iii) verificar os resultados obtidos com a aplicação do modelo; e (iv) comparar a EA e financeira das doses de N propostas pelo modelo.

5.3 MATERIAL E MÉTODOS

Para construção do modelo para prescrição de doses de N foram realizados dois experimentos com a cultura do milho (*Zea mays* L.). O primeiro foi instalado no dia 8 de outubro de 2013 e o segundo no dia 8 de outubro de 2014, ambos na fazenda Dona Matilde localizada no município de Palmeira – PR (25° 17' S, 50° 04' W), pertencente à região dos Campos Gerais do Paraná.. Os experimentos foram realizados em um Latossolo Vermelho textura média sob plantio direto, em talhões diferentes. O clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cfb, com verões amenos e geadas frequentes durante o inverno. A altitude média é de 815 m. A precipitação pluvial média anual é de cerca de 1.800 mm.

O híbrido de milho utilizado, nos dois experimentos, foi o DKB-290. Análises químicas do solo, na camada de 0–20 cm, realizadas antes da instalação do experimento no ano agrícola 2013-14, revelaram os seguintes resultados: pH (CaCl₂) de 5,0; acidez potencial (H + Al) de 62,1 mmol_c dm⁻³; teores de Ca, Mg e K trocáveis de 44, 8,0 e 3,0 mmol_c dm⁻³, respectivamente; P (Mehlich-1) de 15,3 mg dm⁻³; carbono orgânico de 30 g dm⁻³; capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0 de 117,10 mmol_c dm⁻³; e saturação por bases (V) de 47%. Antes da instalação do experimento, realizou-se a aplicação de 2,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico e 2 t ha⁻¹ de gesso. Por ocasião da semeadura do milho, realizou-se a aplicação de 140 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 140 kg ha⁻¹ de K₂O. No estágio V₅ (cinco folhas completamente expandidas) foi realizada a aplicação de 200 g ha⁻¹ de Cu, 200 g ha⁻¹ de Mn e 150 g ha⁻¹ de Zn, via foliar.

Análises químicas do solo, na camada de 0–20 cm, realizadas antes da instalação do experimento no ano agrícola 2014-15, revelaram os seguintes resultados: pH (CaCl₂) de 4,7; acidez potencial (H + Al) de 72 mmol_c dm⁻³; teores de Ca, Mg e K trocáveis de 31, 9 e 1,6 mmol_c dm⁻³, respectivamente; P (Mehlich-1) de 9,0 mg dm⁻³; carbono orgânico de 22 g dm⁻³; capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0 de 113,60 mmol_c dm⁻³; e saturação por bases (V) de 37%. Antes da instalação do experimento, realizou-se a aplicação de 4 t ha⁻¹ de calcário dolomítico. Por ocasião da semeadura, realizou-se a aplicação de 145 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 250 kg ha⁻¹ de K₂O. No estágio V₅ (cinco folhas completamente expandidas) foi realizada a aplicação de 300 g ha⁻¹ de Cu e 300 g ha⁻¹ de Mn, via foliar. Ainda, foi aplicado Zn

foliar na dose de 300 g ha^{-1} , em duas aplicações entre os estádios V_4 e V_6 de desenvolvimento da cultura do milho.

Os dados de precipitação pluvial ocorrida durante os anos agrícolas de 2013-14 e 2014-15 podem ser visualizados nas Figuras 19a e 19b, respectivamente.

Para ambos os experimentos, o delineamento empregado foi de blocos completos ao acaso em parcelas subdivididas, com três repetições. Nas parcelas ($24 \text{ m} \times 6 \text{ m}$), foram aplicadas quatro doses de N-ureia na semeadura (0, 20, 40 e 60 kg ha^{-1}) e, nas subparcelas ($6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$), foram empregadas quatro doses de N-ureia em cobertura (0, 80, 160 e 240 kg ha^{-1}) no estágio de desenvolvimento V_7 (sete folhas completamente expandidas).

As leituras de refletância espectral foram realizadas por meio do sensor GreenSeeker no momento da aplicação de N-ureia em cobertura, o qual ocorreu aos 56 e 52 dias após a semeadura (DAS) para os experimentos instalados em 2013 e 2014, respectivamente.

A produtividade de matéria seca da parte aérea foi avaliada na maturidade fisiológica da cultura do milho. Depois disso, avaliou-se a produtividade de grãos por meio de colheita manual e trilhagem em máquina debulhadora estacionária, corrigindo-se a umidade dos grãos para 130 g kg^{-1} .

Os efeitos das doses de N, na semeadura e em cobertura, sobre os parâmetros avaliados foram comparados por meio de análises de regressão. Adotou-se como critério para escolha do modelo a magnitude dos coeficientes de determinação significativos a 5%. As análises estatísticas foram realizadas por meio do software R.

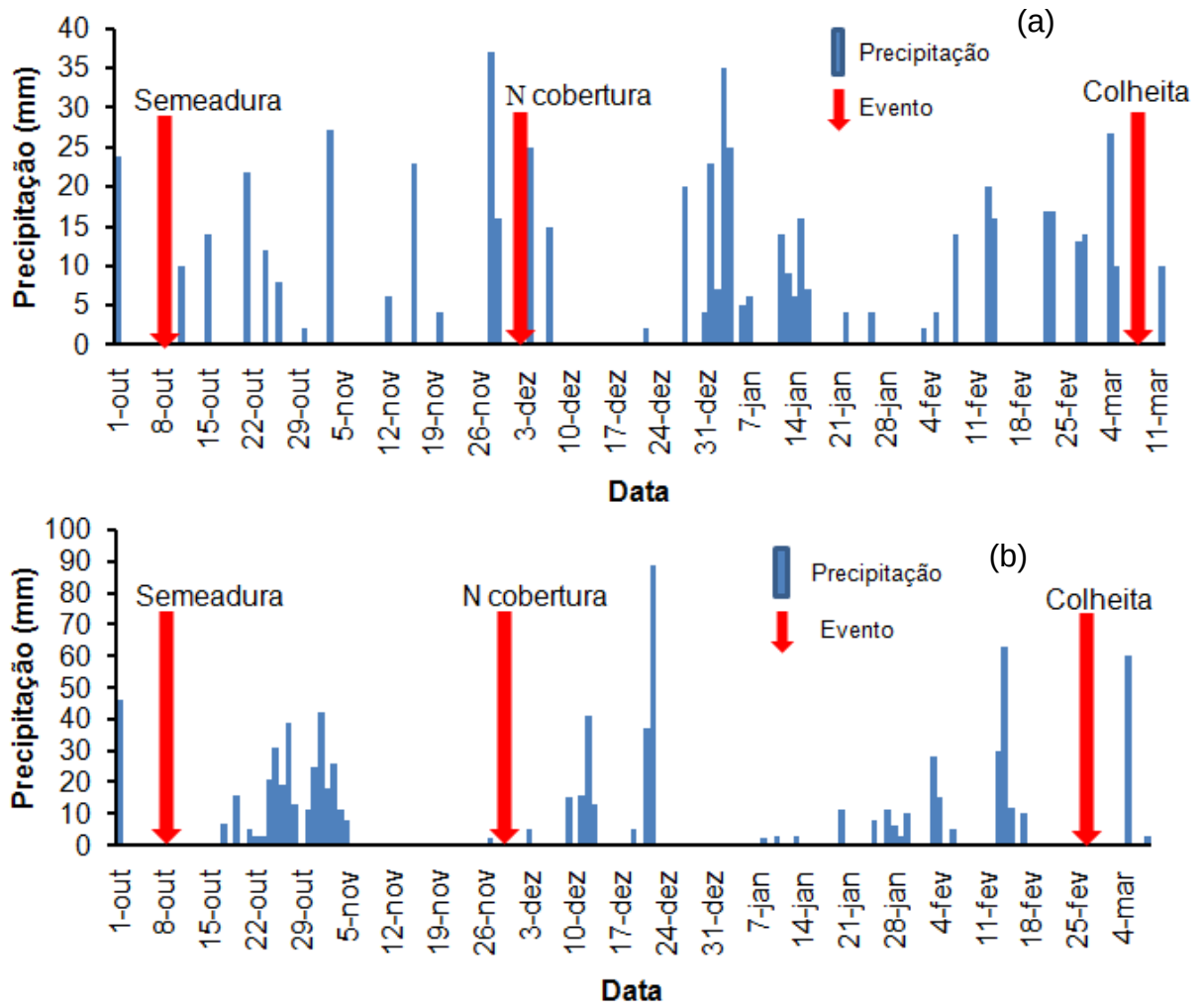


Figura 19: Precipitação pluvial (mm) e eventos ocorridos durante os anos agrícolas 2013-14 (a) e 2014-15(b) da cultura do milho.

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.4.1 Desenvolvimento do modelo para prescrição da adubação nitrogenada

O modelo proposto para prescrição das doses de N em cobertura em função das leituras de refletância espectral foi baseado no incremento do rendimento de grãos da cultura com a adição de fertilizante nitrogenado em cobertura. Para quantificar o incremento na produtividade de grãos tornou-se necessário identificar a produtividade mínima ($P_{mín}$ – obtida sem adição de N em cobertura) e a produtividade máxima ($P_{máx}$ – aquela que poderia ser obtida com a adição de N em cobertura).

A produtividade mínima ($P_{mín}$) foi obtida em função RI - Índice de Resposta de Raun et al. (2002) conforme a Equação 17. A produtividade utilizada para gerar esta equação foi obtida em parcelas sem adição de N em cobertura.

$$P_{mín} = a \times RI + b \quad \text{Equação 17}$$

onde, a e b = coeficientes da equação 17.

Como o RI representa o quociente entre a refletância na faixa rica com a refletância apresentada em campo, quanto maior o NDVI observado em campo, menor é o valor do RI e, teoricamente, melhor é o estado nutricional da planta apontado por esta leitura. Portanto, espera-se que quanto maior for a produtividade que se pode obter sem a adição de N em cobertura, identificada pela leitura de refletância, menor será o RI.

A produtividade máxima ($P_{máx}$) foi obtida pela Equação 18, de forma semelhante ao processo adotado no trabalho de Raun et al (2005).

$$P_{máx} = a \times e^{b \times INSEY} \quad \text{Equação 18}$$

onde, a e b = coeficientes da equação 18.

Com o resultado da subtração dos valores obtidos nas equações 17 e 18, obteve-se a possibilidade de ganho na produtividade que a cultura poderia apresentar por meio do acréscimo de fertilizante nitrogenado em cobertura (GP).

O próximo passo foi descobrir a quantidade de N a ser aplicada para cada gradiente de resposta. Solari (2006) recomenda utilizar 24,9 kg de N para cada tonelada de milho que se espera produzir. No entanto, o potencial produtivo pode variar para cada local de produção e em diferentes anos agrícolas de acordo, por

exemplo, com condições edafoclimáticas e de manejo. Raun et al. (2011) demonstraram que os tratamentos de maior produtividade nem sempre corresponderam aos tratamentos que receberam a maior dose de N. Portanto, apesar de a quantidade de grãos a ser produzida ser influenciada pela quantidade de N aplicada, essas variáveis são independentes e precisam ser determinadas em fases separadas. Até esta etapa, a produtividade de grãos já foi estimada por meio da leitura de refletância espectral. Propõe-se, agora, estimar a quantidade de N a ser aplicada em cobertura utilizando-se, para isso, a EA estimada para a previsão da produtividade obtida.

O cálculo da EA com a aplicação de N em cobertura (EAc) (Equação 19) foi adaptado de Fageria e Baligar (2005):

$$EAc = GP / Nc \quad \text{Equação 19}$$

onde: GP = ganho na produtividade (kg ha^{-1}) com adição de N em cobertura, obtido pela diferença entre P_{máx} e P_{mín}.
Nc = total de N (kg ha^{-1}) aplicado em cobertura.

Essa adaptação foi realizada para possibilitar a indicação de doses de N em cobertura diferenciadas para respostas de produtividade diferentes que podem ser encontradas nas condições de desenvolvimento da cultura em cada ano. A EAc foi obtida em função do ganho de produtividade esperado, conforme equação 20.

$$EAc = a \times GP^2 + b \times GP + c \quad \text{Equação 20}$$

onde, GP = ganho na produtividade (kg ha^{-1}) com adição de N em cobertura, obtido pela diferença entre P_{máx} e P_{mín}.
a, b e c = coeficientes da equação 20.

Como essas informações, indicou-se a quantidade de N (kg ha^{-1}) a ser aplicada em cobertura (NC) de acordo com a Equação 21.

$$NC = \frac{GP}{EAc} \quad \text{Equação 21}$$

onde, GP = PROD_{nc} - PROD_{snc}
EAc = $a \times GP^2 + b \times GP + c$

Dessa maneira, a quantidade de N a ser aplicada em cobertura levou em consideração a EAc na indicação da dose.

5.4.2 Aplicação do modelo para prescrição de dose de N em cobertura na cultura do milho

As doses de N na semeadura não apresentaram interação com as doses de N aplicadas em cobertura e também não influenciaram a produtividade de matéria seca da parte aérea e de grãos de milho, nos anos agrícolas de 2013-14 e 2014-15 (Tabelas 12, 13, 14 e 15).

Tabela 12: Análise de variância para os efeitos de doses de N na semeadura e em cobertura na produtividade de matéria seca da parte aérea de milho no ano agrícola 2013-14.

	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F	Pr > Fc
Blocos	2	15.778.611,00	7.889.306,00	1,86	0,23486
N semeadura (a)	3	20.271.996,00	6.757.332,00	1,60	0,28633
Erro a	6	25.416.642,00	4.236.107,00		
N cobertura (b)	3	18.852.283,00	6.284.094,00	4,00	0,01917 *
N semeadura x N cobertura	9	12.925.875,00	1.436.208,00	0,91	0,52897
Erro b	24	37.676.816,00	1.569.867,00		
Total	47	130.922.225,00			

*: $P < 0,05$.

Tabela 13: Análise de variância para os efeitos de doses de N na semeadura e em cobertura na produtividade de grãos de milho no ano agrícola 2013-14.

	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F	Pr > Fc
Blocos	2	7.226.066,00	3.613.033,00	0,64	0,56
N semeadura (a)	3	37.406.237,00	12.468.746,00	2,23	0,19
Erro a	6	3.619.116,00	5.603.186,00		
N cobertura (b)	3	277.727.070,00	92.575.690,00	17,28	3e-06 ***
N semeadura x N cobertura	9	53.791.121,00	5.976.791,00	1,12	0,39
Erro b	24	128.560.998,00	5.356.708,00		
Total	47	538.330.607,00			

***: $P < 0,001$.

Tabela 14: Análise de variância para os efeitos de doses de N na semeadura e em cobertura na produtividade de matéria seca da parte aérea de milho no ano agrícola 2014-15.

	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados médios	F	Pr > Fc
Blocos	2	2.763.049,00	1.381.524,00	0,21	0,82
N semeadura (a)	3	13.379.333,00	4.459.778,00	0,67	0,60
Erro a	6	40.268.307,00	6.711.384,00		
N cobertura (b)	3	467.312.671,00	155.770.890,00	33,95	<2e-16 ***
N semeadura x N cobertura	9	71.590.338,00	7.954.482,00	1,73	0,14
Erro b	24	110.128.820,00	4.588.701,00		
Total	47	705.442.517,00			

***: $P < 0,001$

Tabela 15: Análise de variância para os efeitos de doses de N na semeadura e em cobertura na produtividade de grãos de milho no ano agrícola 2014-15.

	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F	Pr > Fc
Bloco	2	2.428.183,00	1.214.092,00	2,61	0.1533
N semeadura (a)	3	3.605.338,00	1.201.779,00	2,58	0.1492
Erro a	6	2.795.617,00	465.936,00		
N cobertura (b)	3	140.534.780,00	46.844.927,00	38,55	<2e-16 ***
N semeadura x N cobertura	9	18.210.107,00	2.023.345,00	1,67	0.1530
Erro b	24	29.160.981,00	1.215.041,00		
Total	47	196.735.006,00			

***: $P < 0,001$

As doses de N em cobertura aumentaram linearmente ($P < 0,01$) a produtividade de matéria seca da parte aérea da cultura do milho para o ano agrícola 2013-14 (Figura 20). Já, para o ano 2014-15, a produtividade de matéria seca da parte aérea de milho aumentou de acordo com o modelo quadrático ($p < 0,01$), em função das doses de N aplicadas em cobertura (Figura 20).

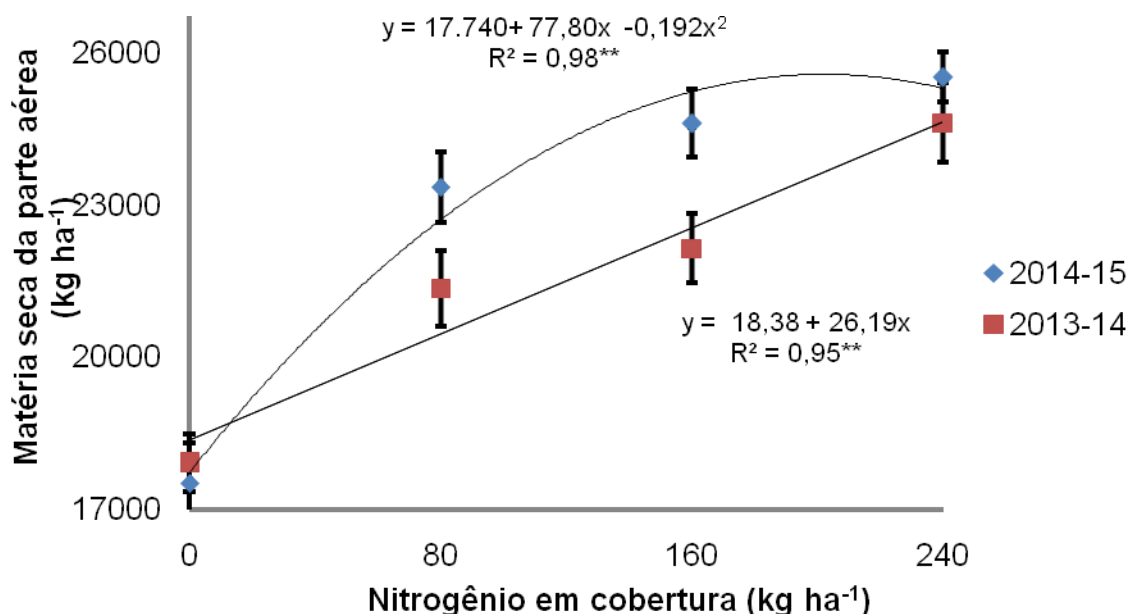


Figura 20: Produtividade de matéria seca da parte aérea da cultura do milho, em 2013-14 e 2014-15, em função das doses de nitrogênio em cobertura. ** $P < 0,01$. As barras verticais indicam o erro padrão da média.

A produtividade de grãos da cultura do milho nos anos agrícolas 2013-14 e 2014-15 aumentou ($p < 0,05$) com as doses de N aplicadas em cobertura, conforme os modelos quadráticos (Figura 21).

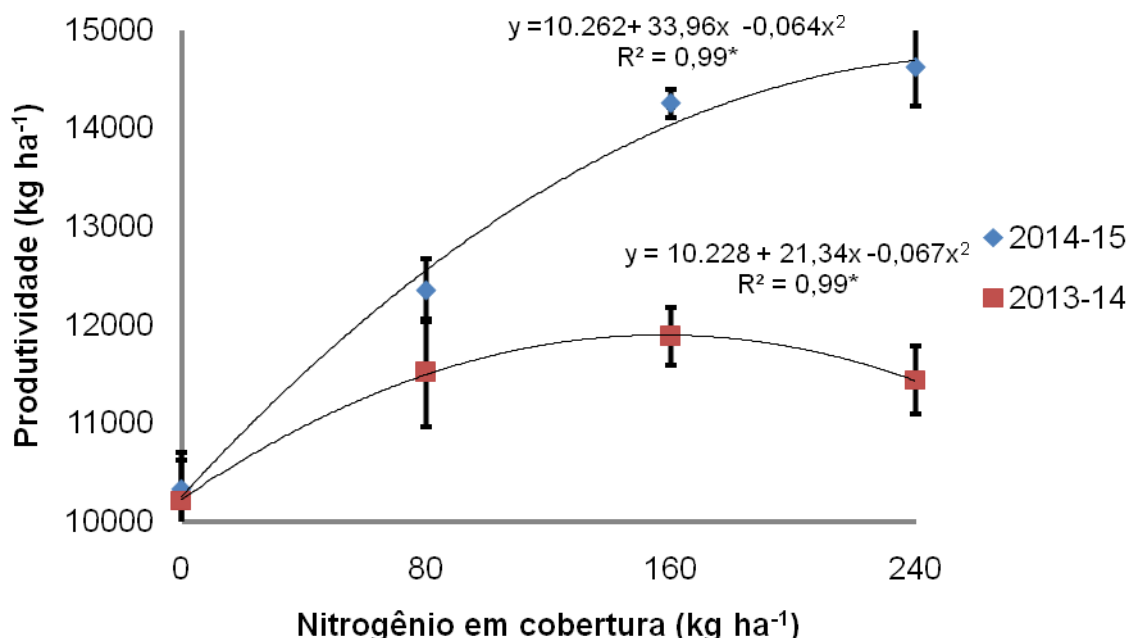


Figura 21: Produtividade da grãos de milho, em 2013-14 e 2014-15 em função das doses de nitrogênio em cobertura. * $P < 0,05$. As barras verticais indicam o erro padrão da média.

As doses de N na semeadura, apesar de não terem apresentado efeito na produtividade de matéria seca da parte aérea e de grãos de milho, aumentaram

linearmente ($p < 0,01$) os valores leituras de NDVI no estágio V_7 , no momento da aplicação de N em cobertura nos anos agrícolas 2013-14 e 2014-15 (Figura 22).

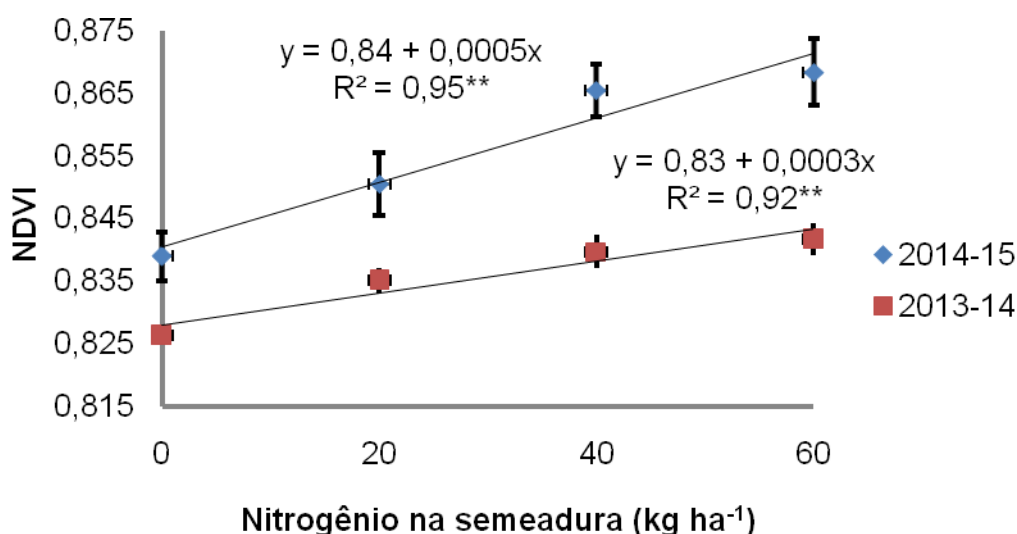


Figura 22: Valores de NDVI obtidos na cultura do milho, em 2013-14, em função das doses de nitrogênio na semeadura. ** $P < 0,01$. As barras verticais indicam o erro padrão da média.

O regime hídrico não foi limitante para o desenvolvimento da cultura de milho nos anos agrícolas 2013-14 e 2014-15. É comum observar efeito de aplicação de fertilizante nitrogenado na cultura do milho (DA ROS *et al.* 2003; GOMES *et al.*, 2007; SORATTO *et al.* 2010) devido às funções que esse nutriente exerce nas plantas (MALAVOLTA E MORAES, 2007). Provavelmente, o suprimento de N por resíduos culturais diminuiu a influência da adição de N na semeadura no desenvolvimento da cultura. Da Ros *et al.* (2003) observaram que a aplicação de N em pré-semeadura ou semeadura em um Latossolo Vermelho argiloso aumentou a disponibilidade de N nas fases iniciais de desenvolvimento das culturas de trigo e milho, porém não influenciou a produtividade de matéria seca da parte aérea e de grãos.

Embora os tratamentos culturais tenham sido os mesmos nos dois anos de cultivo, observa-se que os patamares de produtividade de grãos de milho em 2014–15 foram maiores do que aqueles obtidos em 2013–14 (Figura 21). Raun *et al.* (2005) observaram, durante 30 anos, que as respostas à aplicação de N na cultura do trigo apresentaram grandes variações de um ano para o outro. Johnson e Raun (2003) também obtiveram respostas diferentes para os mesmos tratamentos de N, tanto na cultura do trigo quanto na cultura de milho, em anos agrícolas diferentes. De acordo com esses autores, essas diferenças nas respostas ao N podem ter sido

decorrentes, principalmente, da mineralização do N disponível na matéria orgânica do solo e do N₂ atmosférico disponibilizado de diferentes maneiras para as culturas.

Apesar de a produtividade média de grãos de milho ter sido maior em 2014–15 do que em 2013–14, as diferenças encontradas no rendimento de grãos de milho, nos dois anos, foram muito pequenas nos tratamentos que não receberam N em cobertura. Isso demonstra que o suprimento natural de N foi semelhante nas duas safras e não foi o fator que ocasionou as diferenças de produtividade, como indicado no trabalho de Johnson e Raun (2003). Houve alguma limitação para o desenvolvimento da cultura do milho em 2013–14 de modo que a aplicação de N em cobertura não ocasionou incrementos tão expressivos no rendimento de grãos como na safra seguinte (2014–15).

Os motivos que levaram a esta limitação são desconhecidos. Um dos principais motivos pode estar relacionado aos Graus-Dia Acumulados (GDD), porém nestes experimentos não foram coletados dados referentes a esta informação. Dados coletados pela Fundação ABC em uma propriedade localizada na mesma cidade (a uma distância do experimento de aproximadamente 17 km em linha reta) demonstraram que os GDD desde a data da semeadura até o dia da leitura de refletância espectral, com temperatura basal de 10⁰ C, foi de: 505,42 °C e 576 °C para os anos agrícolas 2013–14 (56 DAS) e 2014–15 (52 DAS), respectivamente. Se este comportamento foi semelhante no local do experimento, um valor maior de GDD pode ter afetado o desenvolvimento das plantas de milho (BENOIT, OLNESS e VANSICKLE, 1990; GUISCHEM et al. 2001). Nas horas mais frias, o metabolismo da planta de milho é reduzido, e pode chegar a ser paralisado quando atingida a temperatura basal. As alterações estão ligadas à perda de permeabilidade das membranas, alterações na respiração celular, difusão de CO₂ nos tecidos, atividade da enzima PEP-carboxilase, sistemas ATPases e funções dos cloroplastos (VIEIRA JR, 1999). Temperaturas noturnas abaixo de 5⁰C fazem com que a planta necessite de 48 h para voltar ao nível original de fotossíntese (MUNDSTOCK 1995, citado por VIEIRA JR, 1999).

Mesmo não havendo controle dos motivos, os valores de NDVI obtidos no momento da adubação de N em cobertura foram menores em 2013–14 quando comparados com os de 2014–15. Isso pode estar sinalizando que as plantas poderiam não apresentar respostas semelhantes à adubação nitrogenada em

cobertura. Como o NDVI sinalizou a possibilidade de ocorrer respostas diferentes para a adubação nitrogenada, a refletância espectral poderia, então, ser utilizada para auxiliar no manejo do N. Presume-se que quanto maior o NDVI encontrado na ausência de limitação de N, menos condições limitantes a cultura obteve, e maiores seriam as possibilidades da cultura responder positivamente às doses de N em cobertura. Sendo assim, estratégias que possam identificar a necessidade de N de acordo com a possibilidade de resposta da cultura devem, certamente, aumentar a eficiência de uso do N (EUN).

O primeiro passo para estimar com eficiência a dose de N em cobertura, seria identificar o incremento possível no rendimento de grãos com aplicação de N em cobertura, calculando-se o GP conforme indicado no modelo proposto.

A Figura 23 apresenta a relação entre o RI e a produtividade sem adição de N em cobertura, gerada conforme equação 17 do modelo. Para calcular o RI, o valor INSEY sem limitação de N, de cada ano agrícola, foi representado pela média dos valores observados com a aplicação de 60 kg N ha⁻¹ na semeadura. Já, o INSEY em campo foi representado pela média de produtividade obtida, sem adição de N em cobertura, em cada nível de NDVI mensurado no dia da aplicação de N em cobertura.

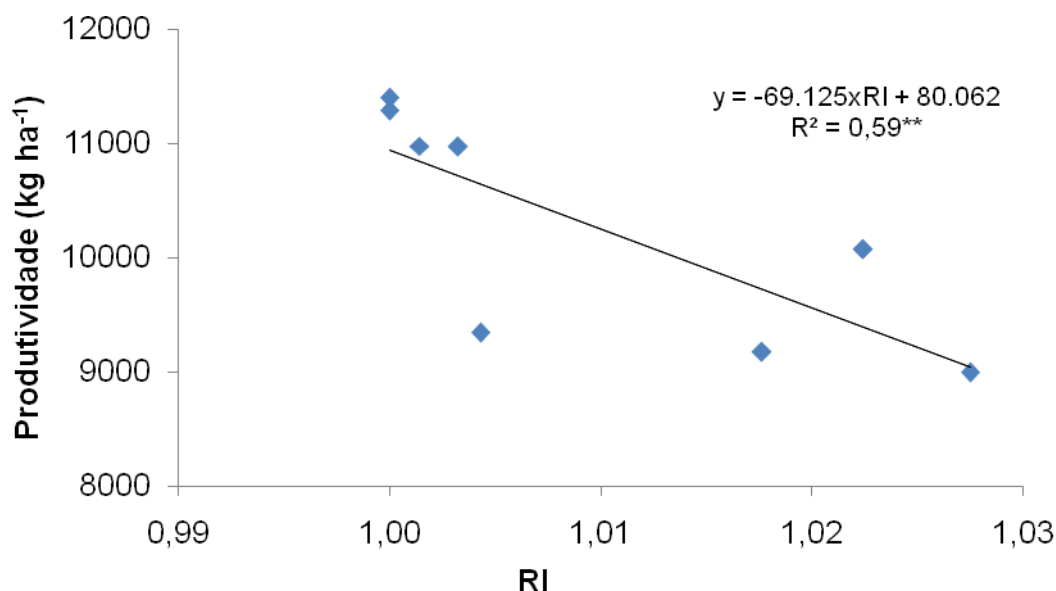


Figura 23: Produtividade de grãos de milho nos anos de 2013–14 e 2014–15, em função do RI obtido sem aplicação de nitrogênio em cobertura. ** $P < 0.01$.

A Equação 22 indica a produtividade mínima ($PMín$) esperada em função da leitura de refletância obtida em campo no dia da aplicação de N em cobertura.

$$PMín = (-69.125 \times RI) + 80.062$$

Equação 22

onde, $RI = INSEY \text{ faixa rica} / INSEY \text{ em campo}$.

Como o RI é a divisão do INSEY na faixa rica (maior valor por estar na melhor condição) pelo INSEY obtido em campo, menores valores desse índice indicariam que a condição de campo está mais próxima do valor da faixa rica e, logo, se poderiam esperar maiores produtividades se comparadas com o INSEY maior. Já, o INSEY mais alto indicaria que a condição de campo estaria mais longe do valor da faixa rica, logo, indicaria piores condições de desenvolvimento e se esperaria produtividade menor se comparada com valores mais baixos deste índice. Outra metodologia que poderia ser utilizada para encontrar o $PMín$ seria por meio da divisão da $PMáx$ pelo RI, conforme realizado por Povh (2007).

A Figura 24 apresenta a relação entre a produtividade média máxima obtida para cada nível de NDVI, mensurado no dia da aplicação de N em cobertura, e o respectivo INSEY (foi utilizado como temperatura basal 10°C).

A Equação 23, gerada conforme a Equação 18 do modelo, indicaria a produtividade máxima ($PMáx$) esperada em função da leitura de refletância obtida em campo no dia da aplicação de N em cobertura.

$$Pmáx = 1870e^{126,6 \times INSEY}$$

Equação 23

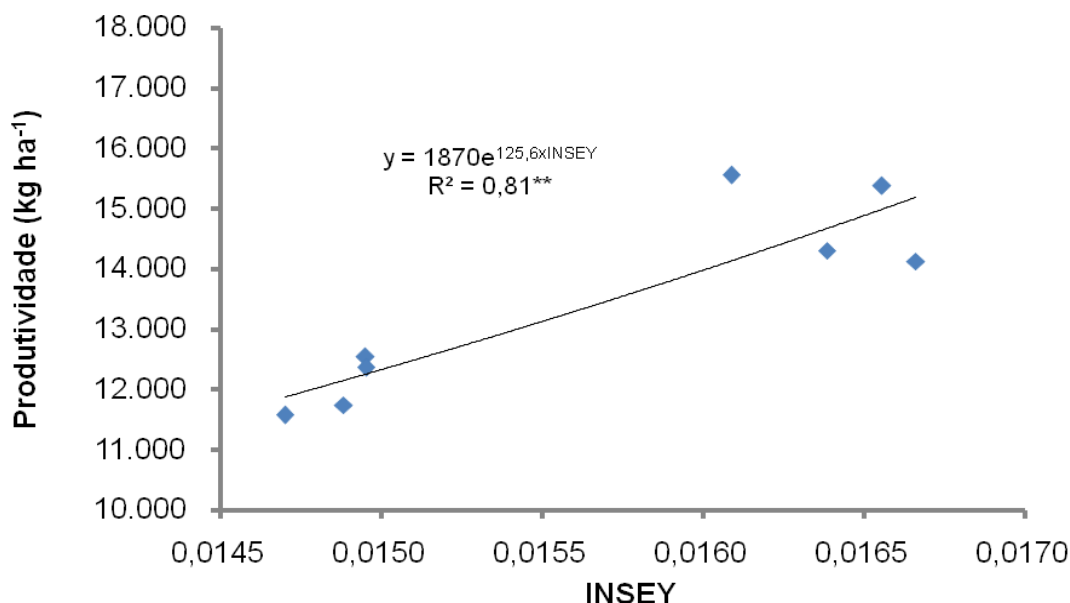


Figura 24: Produtividade média máxima de grãos de milho nos anos de 2013–14 e 2014–15, em função do INSEY obtido sem aplicação de nitrogênio em cobertura. $**P < 0,01$.

No presente estudo foram analisados apenas dois anos agrícolas com a cultura do milho. Seria importante adicionar dados de mais safras nesta equação para tornar o modelo mais robusto. Em outros trabalhos também encontrou-se

relação exponencial entre a produtividade máxima de grãos e o INSEY para as culturas de trigo (RAUN *et al.* 2001.; POVH *et al.* 2008) e milho (INMAN, KOSLHA e MAYFIELD, 2005).

Após realizar a previsão das produtividades mínima e máxima variando as doses de N, pode-se realizar o cálculo do GP que se pode obter adicionando N em cobertura. Seria necessário agora descobrir qual a quantidade de N a ser aplicada em cobertura em função do GP.

A Figura 25 mostra a relação obtida entre a resposta de aumento na produtividade com a aplicação de N em cobertura e a EAc obtida no experimento, gerada conforme a Equação 19 do modelo.

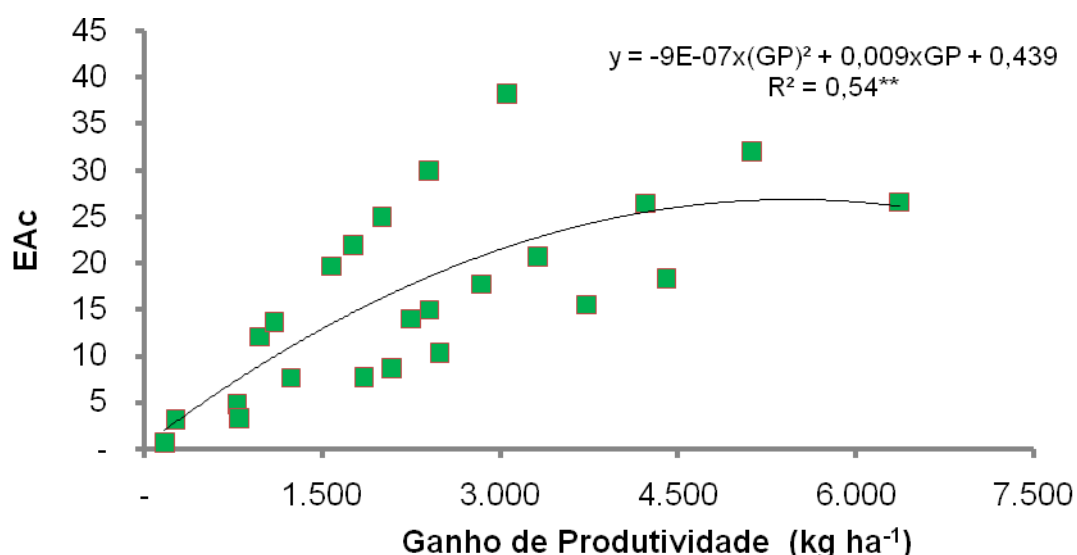


Figura 25: Valores de eficiência agrônômica do nitrogênio aplicado em cobertura (EAc) em função do ganho de produtividade (GP, kg ha⁻¹) obtido no experimento.** $P < 0,01$.

A Equação 24 indica a EAc em função do GP esperado na cultura do milho.

$$EAc = -9E-07 \times GP^2 + 0,009 \times GP + 0,439 \quad \text{Equação 24}$$

Com estas informações, foi possível indicar a quantidade de N (kg ha⁻¹) a ser aplicada em cobertura (NC) de acordo com a Equação 21 do modelo proposto.

Conforme a Equação 24, o ganho na produtividade (GP) que apresentaria a maior eficiência agrônômica para o nitrogênio em cobertura (EAc), de 22,94 kg de grãos de milho por kg de N aplicado, seria de 5.000 kg ha⁻¹.

A quantidade ideal de N a ser aplicada por ganho esperado na produtividade de milho é dependente da EAc. A Equação 24 indica que a EAc, por sua vez, depende do GP que é mensurado por meio da leitura de RE. Sendo assim, variações no GP (que podem ser mensuradas pela RE) poderiam indicar variações

na EAc, calculada pela Equação 21, para indicar a dose de N a ser aplicada em cobertura.

Utilizar a mesma quantidade de N para GP diferentes com a aplicação do fertilizante nitrogenado poderia continuar sub ou superestimando as demandas da cultura por N.

5.4.3 Análise das doses obtidas pelo modelo

Nesta seção foram realizadas comparações das doses indicadas pelo modelo com a dose econômica calculada de acordo com os procedimentos descritos por Alvarez V. (1994). As produtividades para as respectivas doses foram previstas conforme equações quadráticas geradas para os anos agrícolas de 2013–14 e 2014–15 (Figura 21).

A Tabela 16 apresenta o confronto entre as doses de cobertura que apresentaram a maior produtividade e a maior eficiência econômica com as doses indicadas pelo modelo (em cada NDVI inicial encontrado) para o ano agrícola de 2013–14, e as respectivas produtividades obtidas.

Para o milho cultivado em 2013–14, a dose de N em cobertura que proporcionou a maior produtividade de grãos foi de 159 kg N ha⁻¹, enquanto que a dose de máxima eficiência econômica foi de 101 kg N ha⁻¹. Essas doses de N em cobertura resultariam em produtividades de 11.927 e 11.700 kg ha⁻¹ de grãos, respectivamente. O modelo recomendou doses diferentes para cada valor de NDVI encontrado no dia da aplicação de N em cobertura.

Tabela 16: Valores de NDVI e confronto entre as doses de N que proporcionaram a maior produtividade e a maior eficiência econômica com a dose de N indicada pelo modelo, e as respectivas produtividades de grãos de milho em 2013–14.

NDVI	Dose de N			Produtividade			
	Modelo	Econômica	Produtividade máxima	Dose do modelo	Dose econômica	Dose máxima produtividade	Sem N em cobertura
	----- kg ha ⁻¹ -----						
0.826	140			11.902			
0.835	131			11.873			
0.840	126	101	159	11.854	11.700	11.927	10.228
0.842	124			11.846			

As doses de N indicadas pelo modelo foram de 124 kg N ha⁻¹ para o maior valor de NDVI, obtendo produtividade de 11.846 kg ha⁻¹ de grãos, as quais foram

aumentando até 140 kg N ha⁻¹ para o valor mais baixo de NDVI, obtendo produtividade de 11.902 kg ha⁻¹ de grãos. Sem aplicação de N em cobertura, a produtividade de grãos, 2013–14, foi de 10.228 kg ha⁻¹ de milho.

A Tabela 17 apresenta o confronto entre as doses de cobertura que apresentaram a maior produtividade e a maior eficiência econômica com as doses indicadas pelo modelo (em cada NDVI inicial encontrado) para o ano agrícola de 2014–15, e as respectivas produtividades obtidas.

Tabela 17: Valores de NDVI e confronto entre as doses de N que proporcionaram a maior produtividade e a maior eficiência econômica com a dose de N indicada pelo modelo, e as respectivas produtividades de grãos de milho em 2014–15.

NDVI	Dose de N			Produtividade			
	Modelo	Econômica	Produtividade máxima	Dose do modelo	Dose econômica	Dose máxima produtividade	Sem N em cobertura
	----- kg ha ⁻¹ -----						
0.839	251			14.755			
0.851	222			14.649			
0.865	195	204	265	14.453	14.529	14.767	10.262
0.868	191			14.413			

Para o milho cultivado em 2014–15, a dose de N em cobertura que proporcionou a maior produtividade de grãos foi de 265 kg N ha⁻¹, enquanto que a dose máxima eficiência econômica foi de 204 kg N ha⁻¹. Essas doses de N em cobertura resultariam em produtividades de 14.767 e 14.529 kg ha⁻¹ de grãos, respectivamente. O modelo recomendou doses diferentes para cada valor de NDVI encontrado no dia da aplicação de N em cobertura. As doses de N indicadas pelo modelo foram de 191 kg N ha⁻¹ para o maior valor de NDVI, obtendo produtividade de 14.413 kg ha⁻¹ de grãos, as quais foram aumentando até 251 kg N ha⁻¹ para o valor mais baixo de NDVI, obtendo produtividade de 14.755 kg ha⁻¹ de grãos. Sem aplicação de N em cobertura, a produtividade de grãos, em 2014–15, foi de 10.262 kg ha⁻¹ de milho.

A Tabela 18 apresenta os valores de EAc obtidos para as doses de maior produtividade, de máxima eficiência econômica e as indicadas pelo modelo, para cada valor de NDVI obtido antes da adubação nitrogenada em cobertura.

Tabela 18: Eficiência agrônômica de nitrogênio em cobertura (kg milho kg N⁻¹) na cultura do milho nos anos agrícolas de 2013–14 e 2014–15.

2013–14				2014–15			
NDVI	Modelo	Econômica	Produtividade Máxima	NDVI	Modelo	Econômica	Produtividade Máxima
0,826	11,96	14,58	10,67	0,839	17,86	20,89	16,98
0,835	12,58			0,851	19,72		
0,840	12,88			0,865	21,46		
0,842	13,00			0,868	21,74		

Nos dois anos agrícolas (2013–14 e 2014–15), os valores de EAc obtidos com as doses de N em cobertura indicadas pelo modelo foram superiores aos obtidos para a dose de máxima produtividade e inferiores àqueles obtidos para a dose de máxima eficiência econômica, com exceção dos valores de NDVI de 0,865 e 0,868 no ano agrícola de 2014–15, nos quais os valores de EAc do modelo foram superiores ao da máxima eficiência econômica.

A Tabela 19 apresenta uma comparação financeira dos valores das tabelas 10 e 11 para uma área de 1 ha. Os valores utilizados para o cálculo foram de R\$ 338,20 para a tonelada de grãos de milho e R\$ 2.640,00 para a tonelada de N-ureia, conforme cotações realizadas em março de 2016 em empresas localizadas na região dos Campos Gerais do Paraná.

As doses indicadas pelo modelo obtiveram resultados econômicos próximos àqueles obtidos pelas doses de máxima eficiência econômica, nos dois anos de cultivo de milho. As maiores diferenças foram obtidas para os valores de NDVI mais baixos na ocasião de aplicação de N em cobertura. É importante observar que valores de NDVI mais baixos, nesse momento, indicam que a planta pode ter menor eficiência agrônômica com a aplicação de N em cobertura. Isso pode limitar a possibilidade de melhores resultados financeiros.

Os resultados mostraram que o modelo indicou produtividades de milho próximas às máximas que seriam obtidas e resultado econômico próximo àquele obtido com a dose de máxima eficiência econômica, respeitando a limitação de produtividade encontrada pela situação de campo. É importante destacar que as equações propostas para a aplicação do modelo foram geradas a partir de apenas duas safras de milho, utilizando-se um único híbrido com alto potencial produtivo. Seria importante adicionar informações de novas safras, em diferentes condições edafoclimáticas e de genótipo, para tornar o modelo mais robusto e eficiente.

Tabela 19: Comparativo de resultado econômico entre as doses de nitrogênio indicadas.

Dose	Ganho na produtividade (kg ha ⁻¹)	Receita (R\$ ha ⁻¹)	Custo do N (R\$ ha ⁻¹)	Resultado (R\$ ha ⁻¹)
Dose Econômica 2013-14	1.471,64	497,71	266,56	231,15
Produtividade máxima 2013-14	1.699,24	574,68	420,42	154,26
NDVI 0.826	1.674,46	566,30	369,67	196,64
NDVI 0.835	1.644,74	556,25	345,14	211,11
NDVI 0.840	1.626,31	550,02	333,33	216,69
NDVI 0.842	1.617,90	547,17	328,44	218,73
Dose Econômica 2014-15	4.266,74	1.443,01	539,34	903,67
Produtividade Máxima 2014-15	4.505,01	1.523,59	700,43	823,17
NDVI 0.839	4.492,80	1.519,46	663,96	855,50
NDVI 0.851	4.387,41	1.483,82	587,26	896,56
NDVI 0.865	4.190,83	1.417,34	515,46	901,88
NDVI 0.868	4.151,12	1.403,91	504,11	899,80

5.5 CONCLUSÕES

A adubação nitrogenada realizada por ocasião da semeadura do milho não influenciou a produtividade de matéria seca e de grãos de milho. No entanto, os valores de NDVI obtidos a partir de leituras realizadas por ocasião da adubação nitrogenada em cobertura, no estágio V₇, possibilitaram identificar um arranque inicial diferenciado das plantas adubadas com diferentes doses de nitrogênio na semeadura. As doses de nitrogênio aplicadas em cobertura, no estágio V₇, aumentaram a produtividade de matéria seca da parte aérea e de grãos de milho.

Existe relação do ganho na produtividade de grãos de milho com a adição de nitrogênio em cobertura e a eficiência agronômica do nitrogênio aplicado em cobertura (EAc). A dose de nitrogênio a ser aplicada em cobertura na cultura do milho pode ser indicada com base na EAc, sendo que a não consideração desse fato pode acabar super ou subestimando a dose de nitrogênio aplicada.

O modelo proposto indicou doses de nitrogênio em cobertura que resultariam em produtividades de milho próximas ao máximo rendimento de grãos obtido e resultados econômicos próximos àqueles obtidos com a dose de máxima eficiência econômica.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Fatores que interferem na leitura de refletância espectral devem ser considerados para não prejudicar as prescrições de fertilizante nitrogenado em doses variáveis a partir do sensoriamento remoto.

A altura de operação pode influenciar os resultados, porém, se respeitada a indicação do fabricante do sensor quanto à altura de trabalho, esse fator não ocasionará prejuízos com a utilização do equipamento.

A radiação fotossinteticamente ativa interferiu indiretamente nos valores de NDVI determinados com o sensor ativo GreenSeeker, obtendo-se maiores valores de NDVI em momentos do dia em que a radiação incidente foi mais baixa. Apesar de ser possível realizar as leituras de NDVI em qualquer período (manhã, tarde ou noite), é importante considerar a interferência da radiação fotossinteticamente ativa no ajuste de modelos de prescrição de doses ótimas de nitrogênio a partir de leituras de refletância espectral com sensores ópticos.

A cobertura do solo não interferiu nas leituras de refletância espectral realizadas neste estudo. A diferença populacional da cultura do milho pode ser observada pelas leituras de refletância espectral nos estádios iniciais de desenvolvimento das plantas. Com o avanço do crescimento das plantas, o sensoriamento remoto não conseguiu mais diferenciar os níveis populacionais de plantas de milho.

O sensoriamento remoto pode ser utilizado para acompanhar o desenvolvimento das culturas de trigo e milho, pois as leituras de refletância espectral foram diferentes entre os estádios testados, tanto antes quanto após a aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do trigo, e foram diferentes entre os estádios testados antes da aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho.

A adubação nitrogenada na semeadura não interferiu na produtividade de matéria seca da parte aérea e de grãos de trigo. Mesmo assim, as doses de nitrogênio na semeadura favoreceram o arranque inicial da cultura do trigo que foi observado pelas leituras de refletância espectral. As doses de nitrogênio aplicadas em cobertura na cultura do trigo apresentam estreita correlação com a produtividade de matéria seca da parte aérea e, consequentemente, com os valores de NDVI obtidos a partir de leituras com o sensor ativo GreenSeeker.

O sensoriamento remoto apresenta grande potencial para melhorar a eficiência de aplicação de fertilizantes nitrogenados. O modelo proposto neste trabalho considera que as doses de nitrogênio apresentam diferenças na eficiência agrônômica do nitrogênio aplicado em cobertura (EAc). As doses indicadas pelo modelo resultaram em produtividades próximas das máximas obtidas e proporcionaram resultados econômicos próximos àqueles obtidos com a dose de máxima eficiência econômica.

É importante destacar que esta tecnologia é mais um instrumento e que a combinação com outros estudos e tecnologias pode aumentar a eficiência de uso dos fertilizantes nitrogenados. Um sistema eficiente para indicação de nitrogênio deve levar em consideração um conjunto de fatores como (i) expectativa de rendimento de grãos e potencial de absorção de nitrogênio pelas culturas, (ii) quantidade e qualidade de resíduos de cobertura do solo, (iii) teor de matéria orgânica do solo, (iv) clima, (v) fonte do fertilizante, (vi) forma de aplicação e (vii) condições físicas e químicas do perfil do solo.

7 REFERÊNCIAS

- AITA, C. Dinâmica do nitrogênio no solo durante a decomposição de plantas de cobertura: efeito sobre a disponibilidade de nitrogênio para a cultura em sucessão. In: FRIES, M.R.; DALMOLIN, R.S.D., eds. Atualização em recomendação de adubação e calagem: ênfase em Plantio Direto. Santa Maria, UFSM/Departamento de Solos, p. 76-111, 1997.
- ALBUQUERQUE, A. W.; SANTOS, J. R.; MOURA FILHO, G.; REIS, L. S. Plantas de cobertura e adubação nitrogenada na produção de milho em sistema de plantio direto. Rev. bras. eng. agríc. ambient. v.17, n.7, p.721-726, 2013.
- ALI, A. M.; THIND, H. S.; VARINDERPAL-SINGH.; BIJAY-SINGH. A framework for refining nitrogen management in dry direct-seeded rice in using GreenSeeker optical sensor. Computers and electronics in agriculture, v.110, p.114-120, 2015.
- ALVAREZ V., V. H. Avaliação da fertilidade do solo (superfície de resposta – modelos aproximativos para expressar a relação fator-resposta). 3. ed. Viçosa: UFV. 1994.
- ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. The success of BNF in soybean in Brazil. Plant and Soil, v.252, p.1-9, 2003.
- ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; FERNANDES, F. M.; HECKLER, J. C.; MACEDO, R. A. T.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S. Fixação biológica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão. Pesq. agropec. bras. v.41, n.3, p.449-456, 2006.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J. Estimativa da adubação nitrogenada para o milho em sistemas de manejo e culturas de cobertura do solo. Revista Brasileira de Ciência de Solo, v.24, p.553-560, 2000.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, 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 plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.26, n.1, p.241-248, 2002.
- AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P. Sensor óptico no auxílio à recomendação de adubação nitrogenada em cana-de-acucar. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v.46, n.12, p.1633-1642, 2011.
- AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P.; SCHEPERS, J. S. Algorithm for Variable-Rate Nitrogen Application in Sugarcane Based on Active Crop Canopy Sensor. Agronomy Journal, v. 107, n.4, p.1513-1523, 2015.
- ANDA. Sistema de plantio direto: base para o manejo da fertilidade do solo. Boletim técnico. Disponível em: <http://www.anda.org.br/multimidia/lt_spd.pdf>. Acesso em: 09 out, 2013.
- ANDRADE, A. P.; MAFRA, A. L.; PICOLLA, C. D.; ALBUQUERQUE, J. A.; BERTOL, I. Atributos químicos de um Cambissolo Húmico após 12 anos sob preparo

convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas. *Ciência Rural*, v.42, n.5, p. 814-821, 2012.

BAWHEY, C. I.; GRANT, R. H.; GAO, W. Digital measurement of heliotropic leaf response in soybean cultivars and leaf exposure to solar UVB radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.120, n.1-4, p.161-175, 2003.

BARROS, F. M. Dinâmica do nitrogênio e do fósforo e estado trófico nas águas do rio Turvo Sujo. Tese, Programa de pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, Viçosa, v.21, p.105-112, 1997.

BEARE, M.; CABRERA, M.; HENDRIX, P.; COLEMAN, D. Aggregate protected and unprotected organic matter pools in conventional and no-tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:787-795, 1994.

BENOIT, G.R., OINESS, A., VANSICKLE, K.A. Daynight temperamre effects on leaf expansion and height of field-grown com. 1990. *Agronomy Journal*, Madison, v. 82. p. 690-695, 1990.

BINOTTI, F. F. S.; ARF, O.; SÁ, M. E.; ALVAREZ, A. C. C.; KAMIMURA, K. M. Fontes, doses e modo de aplicação de nitrogênio em feijoeiro no sistema plantio direto. *Bragantia*, v.68, n.2, p.473-481, Campinas 2009.

BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S.; VARVEL, G.E.; SHEA, E.A.W. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. *Agronomy Journal*, v.88, p. 1-5, 1996

BLAYLOCK, A. O futuro dos fertilizantes nitrogenados de liberação controlada. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n. 120, p. 8-10, dez. 2007.

BOSCHINI, A. P M.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S.; OLIVEIRA JUNIOR, M. P.; MIRANDA, M. Z.; FAGIOLI, M. Aspectos quantitativos e qualitativos do grão de trigo influenciados por nitrogênio e lâminas de água. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.15, n.5, p. 450-457, 2011.

BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. M.; CAIRES, E. F.; NAVARRO, J. F.; INAGAKI, T. S.; FERREIRA, A. O. Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio direto. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.47, n.7, p.1007-1014, 2012.

BRAGNOLO, J.; AMADO, T. J. C.; BORTOLOTO, R. P. Use efficiency of variable rate of nitrogen prescribed by optical sensor in corn. *Revista Ceres*, v. 63, n.1, p. 103-11, 2016.

BRAGNOLO, J.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. S.; SANTI, A. L.; FIORIN, J. E.; TABALDI, F. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: ii - indices of fertilizer efficiency and corn yield. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 1299-1309, 2013.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. *Ciência Rural*, v. 30, n. 2, p.365-372, 2000.

BREDEMEIER, C.; VARIANI, C.; ALMEIDA, D.; ROSA, A. T., 2013. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. *Ciência Rural*. 43 (7), 1147-1154, 2013.

BREUNING, F. M.; GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. Influência da geometria de aquisição de dados na resposta espectral da soja simulada pelo modelo prosail. *Engenharia Agrícola*, v.33, n.1, p.176-187, 2013.

BUSO, W. H. D.; KLIEMANN, H. J. Relações de carbono orgânico e de nitrogênio total e potencialmente mineralizável com o nitrogênio absorvido pelo milho. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.33, n.2, p.97-105, 2003.

CAIRES, E. F. Correção de acidez do solo em sistema de plantio direto. *International Plant Nutrition Institute: Informações agronômicas*, n. 141, p.1-13, 2013.

CAMPBELL, W. H. Nitrate reductase structure function and regulation on bridging to gap between biochemistry and physiology. *Annual Review Plant physiology Plant molecular biology*, v. 50, p.277-303, 1999.

CAMPBELL, J.B. (2002), *Introduction to Remote Sensing*, 3rd ed., The Guilford Press, New York, NY.

CAO, Q.; MIAO, Y.; WANG, H.; HUANG, S.; CHENG, S.; KHOSLA, R.; JIANG, R. Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. *Field Crops Research*, v.154, p.133–144, 2013.

GARCIA, G.; CARDOSO, A. A.; SANTOS, O. A. M. Da escassez ao estresse do planeta: um século de mudanças no ciclo do nitrogênio. *Quim. Nova*, v. 36, N. 9, p.1468-1476, 2013.

CASSOL, P. C.; COSTA, A. C.; CIPRANDI, O.; PANDOLFO, C. M.; ERNANI, P. R. Disponibilidade de macronutrientes e rendimento de milho em latossolo fertilizado com dejetos suínos. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.36, n.6, p.1911-1923, 2012.

CASTRO, O.M.; PRADO, H.; SEVEDO, A. C. R.; CARDOSO, E. J. B. N. Avaliação da atividade de microrganismos do solo em diferentes sistemas de manejo de soja. *Scientia Agrícola*, v.50, n.2, p.212-219, 1993.

COLLIER, L. S.; CASTRO, D. V.; DIAS NETO, J. J.; BRITO, D. R.; RIBEIRO, P. A. DE A. Manejo da adubação nitrogenada para o milho sob palhada de leguminosas em plantio direto em Gurupi, TO. *Ciência Rural*, v.36, p.1100-1105, 2006.

CORRIVEAU, J.; VAN BOCHOVE, E.; SAVARD, M. M.; CLUIS, D.; PARADIS, D. Occurrence of High In-Stream Nitrite Levels in a Temperate Region Agricultural Watershed. *Water, Air and Soil Pollution*, p1-13. 2009

COSER, T. R. Doses de Nitrogênio e seu efeito nos indicadores microbiológicos de qualidade de solo na cultura da cevada. *Dissertação (Mestrado em ciências agrárias)*, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

COSTA, F. Z.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciado por sistema de manejo no sul do Brasil. Ver. Bras. Ci. Solo, v. 32, p. 323-332, 2008.

CRAWFORD, N.M. Nitrate: nutrient and signal for plant growth. The Plant Cell, Rockville, v.7, p.859-868, 1995.

DA ROS, C. O.; SALET, R. L.; PORN, R. L.; MACHADO, J. N. C. Disponibilidade de nitrogênio e produtividade de milho e trigo com diferentes métodos de adubação nitrogenada no sistema plantio direto. Ciência Rural, v. 33, n. 5, p.799-804, 2003.

DAHNIKE, W.C.; JOHNSON, G.V. Testing soils for available nitrogen. In: Westerman, R.L., (ed). Soil testing and plant analysis. 3.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1990. p.120 – 140.

DONEDA, A.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; MIOLA, E. C. C.; GIACOMINI, D. A.; SCHIRMANN, J.; GONZATO, R. Fitomassa e decomposição de resíduos de plantas de cobertura puras e consorciadas. Revista Brasileira de Ciência de Solo, v.36 n.6, p.1714-1723, 2012.

ERDLE, K.; MISTELE, B.; SCHIMIDHALTER, U. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. Field Crops Research, v.124, p.74-84, 2011.

ERNANI, P. R. Disponibilidade de nitrogênio e adubação nitrogenada para a macieira. Lages: Graphel, 2003, 76 p.

ERNANI, P.R.; SANGOI, L.; LECH, V. A.; RAMPAZZO, C. A forma de aplicação da uréia e dos resíduos vegetais afeta a disponibilidade de nitrogênio. Ciência Rural, v.35, n.2, p. 360-365, 2005.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B. Manejo da fertilidade do solo. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. 250 p.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency. Journal of Plant Nutrition, v. 26, p.1315–1333, 2003.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. Advances in Agronomy, Newark, v. 88, p. 97-185, 2005.

FARINELLI, R.; LEMOS, L. B. Pesquisa. Nitrogênio em cobertura na cultura do milho em preparo convencional e plantio direto consolidados. Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, v. 42, n. 1, p. 63-70, 2012.

FERGUSON, S. J. Nitrogen cycle enzymology. Curr. Opin. Chem. Biol, v.2, p. 182-193, 1998.

FONTOURA, S.M.V. Adubação nitrogenada na cultura do milho em Entre Rios, Guarapuava, Paraná. Guarapuava, Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2005. 94p.

FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C. Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na região Centro-Sul do Paraná. Guarapuava, Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2008. 32p.

FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C. Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na região Centro-Sul do Paraná. R. Bras. Ci. Solo, v.33, p.1721-1732, 2009.

FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C. Ammonia volatilization in no-till system in the south-central region of the State of Paraná, Brazil. Rev. Bras. Ciênc. Solo v.34, n.5, p.1677-1648, 2010.

FREIRE, F.M.; VASCONCELLOS, C.A.; FRANÇA, G.E. de. Manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.22, n.208, p.49-62, 2000.

GALO, M. L. B. T.; VELINI, E. D.; TRINDADE, M. L. B.; SANTOS, S. C. A. Uso do sensoriamento remoto orbital no monitoramento da dispersão de macrófitas nos reservatórios do complexo Tietê. Planta Daninha, v.20, n.spe, p. 7-20, 2002.

GARCEZ NETO, A. F.; NASCIMENTO JUNIOR, D.; REGAZZI, A. J.; FONSECA, D. M.; MOSQUIM, P. R.; GOBBI, K. F. Respostas morfogênicas e estruturais de *Panicum maximum* cv. mombaça sob diferentes níveis de adubação nitrogenada e alturas de corte. Revista Brasileira de Zootecnia, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1890-1900, 2002.

GARCIA, C. M. P.; ANDREOTTI, M.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BUZETTI, S.; CELESTRINO, C. S.; LOPES, K. S. M. Desempenho agronômico da cultura do milho e espécies forrageiras em sistema de Integração Lavoura-Pecuária no Cerrado. Ciência Rural, Santa Maria, v.43, n.4, p.589-595, 2013.

GERLACH, G. A. X.; ARF, O.; CORSINI, D. C. D. C.; SILVA, J. C.; COLETTI, A. J. Análise econômica da produção de feijão em função de doses de nitrogênio e coberturas vegetais. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 43, n. 1, p. 42-49, 2013.

GITELSON, A.A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. Journal of Plant Physiology, v.161, p.165-173, 2004.

GITTI, D. C.; ARF, O.; PORTUGAL, J. R.; CORSINI, D. C. D. C.; RODRIGUES, R. A. F.; KANEKO, F. H. Coberturas vegetais, doses de nitrogênio e inoculação de sementes com *Azospirillum brasilense* em arroz de terras altas no sistema plantio direto. Bragantia, Campinas, v. 71, n. 4, p.509-517, 2012.

GOMES, R. F.; SILVA, A.G.; ASSIS, R. L.; PIRES, F. R. Efeito de doses e da época de aplicação de nitrogênio nos caracteres agronômicos da cultura do milho sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciência de Solo, v.31, p.931-938, 2007.

GOVAERTS, B.; VERHULST, N.; SAYRE, K. D.; CORTE, P.; GOUDESEUNE, B.; LICHTER, K.; CROSSA, J.; DECKERS, J.; DENDOOVEN, L. Evaluating spatial within plot crop variability for different management practices with an optical sensor?. Plant Soil, v.299, p.29-42, 2007.

GRAHAM, M. H.; HAYNES, R. J.; MEYER, J. H. Soil organic matter content and quality: effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long term sugarcane experiment in South Africa. *Soil Biology and Biochemistry*, v.34, p.93-102, 2002.

GROHS, D. S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M.; POLETTO, N. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. *Engenharia Agrícola*, v.29, n.1, p.101-112, 2009.

GROHS, D. S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M.; POLETTO, N. Validação de modelo para predição do potencial produtivo de trigo com sensor óptico ativo. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v.46, n.4, p.446-449, 2011.

GUISCHEM, J. M.; SANS, L. M. A.; NAKAGAWA, J.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; MATEUS, G. P. Crescimento e desenvolvimento da cultura do milho (*Zea mays*, L.) em semeadura tardia e sua relação com graus-dia e radiação solar global. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.9, n.2, p.251-260, 2001.

HALL, S. J., MATSON, P. A. & ROTH, P. NO_x emission from soil: implications for air quality modeling in agricultural regions. *Annu. Rev. Energy Environ*, v.21, p.311–346, 1996.

HART, S.C.; NASON, G.E.; MYROLD, D.D.; PERRY, D.A. Dynamics of gross nitrogen transformations in an old-growth forest: the carbon connection. *Ecology*, v.75, p.880-891, 1994.

HATFIELD, J.L.; GITELSON, A.A.; SCHEPERS, J.S.; WALTHALL, C.L. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agronomy Journal*, v.100, p.S-117–S-131, 2008.

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; DIDONET, A. D.; TRINDADE, M. G.; SOARES, B. B.; MOREIRA, J. A. A.; CÁNOVAS, A. D. Eficiência de uso da radiação solar na produtividade do trigo decorrente da adubação nitrogenada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.352-356, 2006.

HOLLAND, K. H.; SCHEPERS, J. S. Derivation of a Variable Rate Nitrogen Application Model for In-Season Fertilization of Corn. *Agronomy Journal*, v.102, n.5, 2010.

HOLLAND SCIENTIFIC. Disponível em: < <http://hollandscientific.com/> > . Acesso em: 29 jun, 2011.

HOLLAND, K.H., LAMB, D.W., SCHEPERS, J.S. Radiometry of proximal active optical sensors (AOS) for agricultural sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v.5, n.6, p.1793-1802, 2012.

HONG, S.; SCHEPERS, J.; FRANCIS, D. D.; SCHLEMMER, M. R. Comparison of ground-based remote sensors for evaluation of corn biomass affected by nitrogen stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.38, n.15, p.2209-2226, 2007.

HUE, N.V.; LICUDINE, D.L. Ameliorating of subsoil acidity through surface application of organic manures. *J. Environ. Qual.*, v.28, p.623-632, 1999.

HUETE, A.R., 1988. A SOIL-ADJUSTED VEGETATION INDEX (SAVI). REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT. 25, 295-309.

INMAN, D.; KHOSLA, R. On-the-go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. *Sensor Review*, v.25, n.3, p. 209-214, 2005.

INMAN, D.; KHOSLA, R.; MAYFIELD, T. On-the-go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. *Sensor Review*, v.25, n.3, p. 209-214, 2005.

IPCC.Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis. Disponível em: < https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html> Acesso em: 23 jul, 2016.

ITURRI, L. A.; BUSCHIAZZO, D. E.;DÍAZ-ZORITA, M. Evidencias de acidificación de suelos de la Región Central de la Argentina bajo siembra directa. *Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*, v. 29, n.1, pp 13-19, 2011.

JOHNSON, L. F.; BOSCH, D. F.; WILLIAMS, D. C.; LOBITZ, B. M. Remote sensing of vineyard management zones: implications for wine quality. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 17, n. 4, p. 557-560, 2001.

JOHNSON, G. V.; RAUN, W. R. Nitrogen Response Index as a Guide to Fertilizer Management. *Journal of Plant Nutrition*, v. 26, n.2, p.249-262, 2003.

JORDAN, C.F., 1969. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50, 633–666.

JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em Agricultura de Precisão. IN __: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Eds). Brasília: EMBRAPA, 2014, 596 p.

JONES, J. R.; FLEMING, C. S.; PAVULURI, K.; ALLEY, M. M.; REITER, M. S.; THOMASON, W. E. Influence of soil, crop residue, and sensor orientations on NDVI readings. *Precision Agriculture*, v.16, n6, p.690-704, 2015.

KAPP JUNIOR, C.; CAIRES, E. F.; GUIMARÃES, A. M. Discriminating Biomass and Nitrogen Status in Wheat Crop by Spectral Reflectance Using Artificial Neural Networks *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, v.5, n 2, p.38-49, 2014.

KERBAUY, G. B. *Fisiologia Vegetal*, 1 ed, Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004.

KIPP, S.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. The performance of active spectral reflectance sensors as influenced by measuring distance, device temperature and light intensity. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.100, p.24–33, 2014.

KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A.; DRUMMOND, S.T.; SCHARF, P.C.; PALM, H.L. ROBERTS, D.F.; VORIES, E.D. Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. *Agron. J*, v.102, p.71–84, 2010.

KOCH, B., KHOSLA, R.; FRASIER, M.; WESTFALL, D. G. Economic feasibility of variable rate nitrogen application utilizing site-specific management zones. *Agronomy Journal*, v.96, p.1572-1580, 2004.

LAMBERT, D.M.; LOWENBERG-DEBOER, J.; MALZER, G. L. Economic analysis of spatialtemporal patterns in corn and soybean response to nitrogen and phosphorus. *Agronomy Journal*, v.98, n.1, p.43-54, 2006.

LARA CABEZAS, W.A.R. Imobilização do nitrogênio na cultura do milho após a aplicação em pré e pós-semeadura da uréia e sulfato de amônio. *Revista Plantio Direto*, p.14-20, 2001.

LARA CABEZAS, W. A. R.; COUTO, P. A. Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.739-752, 2007.

LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; KORNODÔRF, G.H. & PEREIRA, S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro. *R. Bras. Ci. Solo*, 14:363-376, 2000.

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

LARGE, E. C. Growth stages in cereals. Illustration of the Feekes Scale. *Plant Pathology*, London, v. 3, p. 128-129, 1954.

LEAL, A. J. F.; LAZARINI, E.; RODRIGUES, L. R.; MARCANDALLI, L. H. Adubação nitrogenada para milho com o uso de plantas de cobertura e modos de aplicação de calcário. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.37, n.2, p.491-501, 2013.

LEITE, L. F. C; GALVÃO, S. R. S. Matéria orgânica do solo: funções interações e manejo em solo tropical. IN: ARAÚJO, A.S.F; LEITE, L. F. C; NUNES. L. A. P.L; CARNEIRO. R. F. V. (Ed) Matéria orgânica e organismos do solo. Teresina: EDUFIP, 2008. 19p.

LOURENZI, C.L.; CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; TRENTIN, G.; GIROTTO, E.; LORENSINI, F.; TIECHER, T.L.; BRUNETTO, G. Soil chemical properties related to acidity under successive pig slurry application. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.1827-1836, 2011.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, j.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.175-187, 2004.

LUKINA, E.V.; FREEMAN, K.W.; WYNN, K.J.; THOMASON, W.E.; MULLEN, R.W.; JOHNSON, G.V.; ELLIOTT, R.L.; STONE, M.L.; SOLIE, J.B.; RAUN, W.R. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake. *Journal of Plant Nutrition*, v.24, n.6, p.885-898, 2001.

MACEDO, C. F.; SIPAÚBA-TAVARES, L. H. Eutrofização e qualidade da água na piscicultura: Consequências e recomendações. *Bol. Inst. Pesca*, v.36, n.2, p.149-163, 2010.

MADEIRA, A.C.; GILLESPIE, T. J.; DUKE, C. L. Effect of wetness on turfgrass canopy reflectance. *Agriculture and Forest Meteorology*, v.107, p.117-130, 2001.

MALAVOLTA, E. Manual de Química Agrícola: *adubos e adubação*. 3. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 596 p.

MALAVOLTA, E.; MORAES, M. F. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral de plantas cultivadas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. (Eds). Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira. Piracicaba: IPNI, 2007, p.189-249.

MAJEROWICZ, N.; PEREIRA, J. M. S.; MEDICI, L. O.; BISON, O.; PEREIRA, M. B.; SANTOS JÚNIOR, U. M. Estudo da eficiência de uso do nitrogênio em variedades locais e melhoradas de milho. Revista Brasileira Botanica, V.25, n.2, p.129-136, 2002.

MARTHA JUNIOR, G. B.; VILELA, L.; BARONI, L. G.; SOUSA, D. M. G.; BARCELLOS, A. O. Manejo da adubação nitrogenada em pastagens. In: PEDREIRA, C. G. S.; MOURA, J. C.; FARIA, V. P. (Ed.). Fertilidade do solo para pastagens produtivas. Piracicaba: Esalq, 2004. p. 156-215.

MARTIN, T. N.; STORCK, L.; DOURADO NETO, D. Simulação estocástica da radiação fotossinteticamente ativa e da temperatura do ar por diferentes métodos. Pesquisa agropecuária brasileira, v.42, n.9, p.1211-1219, set. 2007

MATOS, A. T. Práticas de qualidade do meio físico e ambiental. Viçosa (Série caderno didático n 34): AEAGRI, 2004, 64 p.

MEDEIROS, F. A.; ALONÇO, A. S.; BALESTRA, M. R. G.; DIAS, V. O.; LANDERHAL JÚNIOR, M. L. Utilização de um veículo aéreo não-tripulado em atividades de imageamento georeferenciado. Ciência Rural, v.38, n.8, p. 2375-2378, 2008.

MENEZES, P. B.; ALMEIDA, T (Org). Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. Brasília: CNPq/UnB, 2012.

MENGEL, K. Turnover of organic nitrogen in soils and its availability to crops. Plant Soil, v.181, p.83-93, 1996.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F.F. & DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S. & ALVAREZ V., V.H. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v.3. p.209-248.

MOHOTTI, A.J.; LAWLER, D.W. Diurnal variation of photosynthesis and photoinhibition in tea: effects of irradiance and nitrogen supply during growth in the field. Journal of Experimental Botany, v.53, n.367, p.313–322, 2002.

MULLEN, R. W.; FREMAN, K.W.; RAUN, W. R.; JOHNSON, G. V.; STONE, M. L.; SOLIE, J.B. Identifying an In-Season Response Index and the Potencial to Increase wheat Yield with nitrogen. Agronomy Journal. 95 (2), 347-351, 2003.

MUNDSTOCK, C. M. Aspectos fisiológicos da tolerância do milho ao frio. In: Seminário sobre a cultura do milho “safrinha”, 3, anais. Assis, p.45-48, 1995.

NASCIMENTO, H. R.; ABREU, Y. V. Geotecnologias e planejamento da agricultura de energia. 1 ed. Málaga, Espanha: Eumed.Net, 2012, 145 p.

NTECH INDUSTRIES. Model 505 GreenSeeker Hand Held™ Optical Sensor Unit: operatin manual, (2007). Disponível em: <[http://nue.okstate.edu/Hand_Held/GS_HandHeld_Manual_rev_K\[1\].pdf](http://nue.okstate.edu/Hand_Held/GS_HandHeld_Manual_rev_K[1].pdf)>. Acesso em 16 jan, 2016.

NUNES, A.S.; SOUZA, L.C.F.; MERCANTE, F.M. Adubos verdes e adubação mineral nitrogenada em cobertura na cultura do trigo em plantio direto. Bragantia, v.70, p.432-438, 2011.

OKUMURA, R. S.; MARIANO, D. C. Aspectos agronômicos da ureia tratada com inibidor de urease. *Ambiência*, v.8, n.2, p. 403 – 414, 2012.

PITOL, C.; BROCH, L.D.; CARVALHO, A.M.; SPERA, T.S. Uso de adubos verdes nos sistemas de produção no Bioma Cerrado. In: Carvalho AM & Ambile RF (Eds.) Cerrado: adubação verde. Planaltina, Embrapa Cerrados. p.301-330, 2006.

PORTZ, G.; MOLIN, J. P.; JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. *Precision Agriculture*, v. 1 , p. 1-12, 2012.

POVH, F. P. Uso de sensor ótico ativo em cultura de cereais. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”-Piracicaba, 2007.

POVH, F. P.; ANJOS, W. P. G. Avaliação de sensor óptico para a adubação nitrogenada na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 10., Ponta Grossa, 2015.

POVH, F. P.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; SALVI, J. V. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v.43, n.8, p.1075-1083, 2008.

PRASAD, B., CARVER, B.F., STONE, M.L., BABAR, M.A., RAUN, W.R., KLATT, A.R. Potential use of spectral reflectance indices as a selection tool for grain yield in winter wheat under great plains conditions. *Crop Science*, v. 47, p.1426–1440, 2007.

RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. 1 ed. Piracicaba: IPNI, 2011. 420 p.

RAHMAN, M. M.; LAMB, D. W.; STANLEY, J. N. The impact of solar illumination angle when using active optical sensing of NDVI to infer fAPAR in a pasture canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.202, p.39-43, 2015.

RAMBO, L. ; SILVA, P.R.F. ; ARGENTA, G. ; SANGOI , L .Parâmetros de planta para aprimorar o manejo da adubação nitrogenada de cobertura em milho. *Ciência Rural*, v.34, p.1637-1645, 2004.

RAMIREZ, M.B. Monitoring Nitrogen Levels in the Cotton Canopy using Real-Time Active-Illumination Spectral Sensing. 2010.126 f. Dissertação. Master of Science Degree. The University of Tennessee, Knoxville. 2010.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; LUKINA, E.V.; THOMASON, W.E.; SCHEPERS, J.S. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal*, v.93, p.131-138, 2001.

RAUN, W. R.; SOLIE, J. B.; JOHNSON, G. B.; STONE, M. L.; MULLEN, R. W.; FREMAN, K. W.; THOMASON, W. E.; LUKINA, E. V., 2002. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agronomy Journal*. 94 (4), 815-820, 2002.

RAUN, W.; SOLIE, J.; STONE, M.; MARTIN, K.; FREEMAN, K.; MULLEN, R.; ZHANG, H.; SCHEPERS, J. S.; JOHNSON, G. V. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*, v.36, p.2759–2781, 2005.

RISSINI, A. L. L.; KAWAKAMI, J.; GENÚ, A. M. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada e Produtividade de Cultivares de Trigo Submetidas a Doses de Nitrogênio. *Revista Brasileira de Ciência de Solo*, v.39, p. 1703-1713, 2015.

ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, A.; CHAPIN, S.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T. M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H. J.; NYKVIST, B.; DE WIT, C. A.; HUGHES, T.; LEEUW, S. V. D.; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P. K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R. W.; FABRY, V. J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY, J. A. A safe operating space for humanity. *Nature*, v.461, p. 472-475, 2009.

ROUSE, J.W.J., HAAS, H.R., SCHELL, A.J., DEERING, W.D., 1974. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: *NASA Special Publication*. 1, 309-317.

ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S.; OLIVEIRA, R.H. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.38, p.301-309, 2003.

SÁ, J.C.M. Manejo de nitrogênio na cultura de milho no sistema plantio direto. *Passo Fundo: Aldeia Norte*, 1996. 23p.

SÁ, J. C. M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: Siqueira, J. O.; Moreira, F.M.S.; Lopes, A.S.; Guilherme, L. R. G.; Faquim, V.; Furtini Neto, A. E.; Carvalho, J. G. (Eds.). *Interrelação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas*. Lavras: SBCS, 1999, p.267-319.

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; LECH, V. A.; RAMPAZZO, C. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da ureia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastante. *Ciência Rural*, v.33, n.1, p. 65-70, 2003.

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; LECH, V. A.; RAMPAZZO, C. Volatilização de N-NH₃ em decorrência da forma de aplicação de uréia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. *Ciência Rural*, v.33, n.4, p. 687-692, 2003.

SAUSEN, T. M. Desastres naturais e geotecnologia: sensoriamento remoto. São José dos Campos: INPE. 2008, 40 p.

SCHARF, P.C.; LORY, J. A. Calibrating reflectance measurements to predict optimal sidedress nitrogen rate for corn. *Agronomy Journal*, v.101, p.615–625, 2009.

SCHIVITTARO, W. B.; GONÇALVES, D. R. N.; VALE, M. L. C.; RICORDI, V. G. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e resposta do arroz irrigado à aplicação de ureia tratada com o inibidor de urease NBPT. *Ciência Rural*, v.40, n.6, p.1283-1289, 2010.

SERRANO, L.; FILELA, I.; PENUELAS, J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science*, v.40, n.3, p.723-731, 2000.

SHEN, Q.R.; SHEN, Z.G. Effects of pig manure and wheat straw on growth of mung bean seedlings grown in aluminium toxicity soil. *Biores. Technol.*, v.76, p.235-240, 2001.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Adubação com nitrogênio. In: _____. *Cerrado: correção do solo e adubação*. 2.ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, p.129-145, 2004;

STANFORD, G.; SMITH, S. J. Estimating potentially mineralizable soil nitrogen from a chemical index of soil nitrogen availability. *Soil Science*, Baltimore, v.122, p.71-76, 1976.

SILVA, E. C.; FERREIRA, S. M.; SILVA, G. P.; ASSIS, R. L.; GUIMARÃES, G. L. Épocas e formas de aplicação de nitrogênio no milho sob plantio direto em solo de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29 n.5, p. 725-733, 2005.

SILVA, E. C.; MURAOKA, Y.; BUZETTI, S.; TRIVELIN, P. C. O. Manejo de nitrogênio no milho sob plantio direto com diferentes plantas de cobertura, em Latossolo Vermelho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 41, n. 3, p. 477-486, 2006.

SILVA, E. F.; LOURENTE, E. P. R.; MARCHETTI, M. E.; MERCANTE, F. M.; FERREIRA, A. K. T.; Fujii, G. C. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.46, n.10, p.1321-1331, 2011.

SILVA, I.R.; MENDONÇA, E.S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017p.

SMITH, V. H.; SCHINDLER, D. W. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution*, v.24, p.201-207, 2009.

SORATTO, R. P.; PEREIRA, M.; COSTA, T. A. M.; LAMPER, V. N. Fontes alternativas e doses de nitrogênio no milho safrinha em sucessão à soja. *Revista Ciência Agronômica*, v. 41, n. 4, p. 511-518, 2010.

SOLIE, J.B., A.D. MONROE, W.R. RAUN, AND M.L. STONE. Generalized algorithm for variable-rate nitrogen application in cereal grains. *Agronomy Journal*, v.104, p.378–387, 2012.

SOUZA, W. J. O.; MELO, W. J. Teores de nitrogênio no solo e nas frações da matéria orgânica sob diferentes sistemas de produção de milho. *Revista Brasileira de Ciência de Solo*, v.24, p.885-896, 2000.

STIPP, S. R.; POCHNOW, L. I. Maximização da eficiência e minimização dos impactos ambientais da adubação nitrogenada. *Internation Plant Nutrition Institute*, informações agronômicas, n. 128, p.1-7, 2008.

STONE, M.L.; SOILE, J.B.; RAUN, W.R.; WHITNEY, R.W.; TAYLOR, S.L.; RINGER, J.D. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. *Trans. ASAE*, v.39, p.1623-1631, 1996.

TAIZ, L.; ZEIGER, E; Trad. *Fisiologia Vegetal*. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

TENG, T. K. Introdução à Cromoterapia. Disponível em: <<http://somostodosum.ig.com.br/conteudo/conteudo.asp?id=01283>>. Acesso em: 15 nov, 2012.

THICKE, F. E.; RUSSELLE, M. P.; HETERMAN, O. P.; SHEAFFER, C. C. Soil nitrogen mineralization indexes and corn response in crop rotations. *Soil Science*, Baltimore, v.156, p.322-335, 1993.

TILMAN, D.; CASSMAN, K. G.; MATSON, P. A.; NAYLOR, R.; POLASKY, S. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, review article, v.418, p.671-677, 2002.

TORRES, J.L.R.; PEREIRA, M.G.; FABIAN, A.J. Produção de fitomassa por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v.43, p.421-428, 2008.

TRINDADE, M. G.; STONE, L. F.; HEINEMANN, A. B.; CÁNOVAS, A. D.; MOREIRA, J. A. A. Nitrogênio e água como fatores de produtividade do trigo no cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, v.10, n.1, p.24–29, 2006.

UHART, S. A.; ANDRADE, F. H. Nitrogen Defeciciency in Maize: I. Effects on Crop Growth, Development, Dry Matter Partitioning, and Kernel Set. *Crop science*, v. 35, n. 5, p. 1376-1383, 1995.

VARGAS, L.K.; SELBACH, P.A.; SÁ, E L, S. Imobilização de nitrogênio em solo cultivado com milho em sucessão à aveia preta nos sistemas plantio direto e convencional. *Ciência rural*, santa maria, v.35, n.1, p.76-83, 2005.

VARSA, E.C.; KELLER, K.E.; JEMISON, J.M.; OSBORN, M.W.; LEIS, A.K. & HNETKOVSKY, S.W. Nitrogen placement in no-till corn. In: *PROCEEDINGS OF NORTH CENTRAL EXTENSION-INDUSTRY SOIL FERTILITY CONFERENCE*, 24., St. Louis, Missouri, 1994. *Proceedings*. St. Louis, Missouri, Potash & Phosphate Institute, 1995. p.69-74.

VELLIDIS, G.; SAVELLE, H.; RITCHIE, R.G.; HARRIS, G.; HILL, R.; HENRY, H. NDVI response of cotton to nitrogen application rates in Georgia, USA. In: J.V. Stafford, editor, *Precision Agriculture 2011: Proceedings of the 8th European Conference on Precision Agriculture*, Prague, Czech Republic. 11–14 Jul 2011, Praga, p. 358–368, 2011.

VICTORIA, R.L; PICCOLO, M. C, VARGAS, A. A. T. O ciclo do nitrogênio. In: cardoso,e. J. B. N.; tsai, s. M.; neves,m. C. P. (ed.). Microbiologia do solo. Campinas: sociedade brasileira do solo, 1992. 360p.

VIEIRA JR, P. A. Milho. IN__ Ecofisiologia de Cultivos anuais: trigo, milho, soja, arroz, mandioca. Coord: CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A. Nobel: São Paulo, 1 ed, 1999, 126 p.

VIEIRO, F.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; MORAES, R. P. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers in no-till wheat and maize in southern brazil. Revista Brasileira de Ciência de Solo, v. 38, p.1515-1525, 2014.

VITOUSEK, P. M.; ABER, J. D.; HOWARTH, R. .; LIKENS, G. E.; MATSON, P. A.; SCHINDLER, D. .; SCHLESINGER, W. H.; TILMAN, D. G. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, v.7, p.737–750,1997

VIOLA, R.; BENIN, G.; CASSOL, L. C.; PINNOW, C.; FLORES, M. F.; BORNHOFEN, E. Adubação verde e nitrogenada na cultura do trigo em plantio direto. Bragantia, v.72, n.1,p.90-100, 2013.

WYNGAARD, N.; ECHEVERRÍA, H.E.; ROZAS, H.R.S.; E DIVITO, G.A. Fertilization and tillage effects on soil properties and maize yield in a southern pampas argiudoll. Soil tillage res., v.1, n.19, p.22-30, 2012.

XUE, L.. LI, G.; QIN, X.; YANG, L.; ZHANG,H. Topdressing nitrogen recommendation for early rice with an active sensor in South China. Precision Agriculture, v.15, p.95–110, 2014.

ZADOKS, I. C.; CHANG, T. T.; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. Weed Research, Oxford, v.14, p. 415-421, 1974.

ZAGONEL J.; VENÂNCIO, W. S.; KUNZ, R. P.; TANAMATI, H. Doses de nitrogênio e densidades de plantas com e sem regulador de crescimento afetando o trigo, Cultivar OR-1. Ciência Rural, v.32, n.1, p.25-29, 2002.

Zarco-Tejada, P.J.; Miller, J.R.; Mohammed, G.H.; Noland, T.L. Chlorophyll fluorescence effects on vegetation apparent reflectance: I. Leaf level measurements and model simulation. Remote sensing of environment, v. 74, n.2, p.582-595, 2000.

ZOTARELLI, L. Balanço de nitrogênio na rotação de culturas em sistemas de plantio direto e convencional na região de londrina-pr. 2000. 128p. Dissertação (mestrado) - universidade federal rural do rio de janeiro, seropédica.

Zhu, Y.; Li, Y.; Tian, W. F. Y.; Yao, X.; Cao, W. Monitoring leaf nitrogen in wheat using canopy reflectance spectra. Canadian Journal Plant Science, v.6, n.4, p.1037-1046, 2006.