

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

DESENVOLVIMENTO E ADAPTAÇÃO DE ALGORITMOS PARA A
ADUBAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA EM TAXA VARIÁVEIS EM
TRIGO E MILHO, UTILIZANDO SENSOR ÓPTICO DE DOSSEL

André Luis Vian
Mestre em Fitotecnia/UFRGS

Tese apresentada como um dos requisitos
à obtenção do Grau de Doutor em Fitotecnia
Área de Concentração Sistemas de Produção Vegetal

Porto Alegre (RS), Brasil
Março de 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Vian, André Luis

Desenvolvimento e adaptação de algoritmos para a adubação nitrogenada em cobertura em taxas variáveis em trigo e milho, utilizando sensor óptico de dossel / André Luis Vian. -- 2018.

131 f.

Orientador: Christian Bredemeier.

Coorientador: João Leonardo Fernandes Pires.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Taxa variada. 2. Greenseeker. 3. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada. 4. Sensor. 5. Algoritmo de adubação. I. Bredemeier, Christian, orient. II. Pires, João Leonardo Fernandes, coorient. III. Título.

ANDRE LUIS VIAN
Engenheiro Agrônomo - UFSM
Mestre em Fitotecnia - UFRGS

TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOCTOR EM FITOTECNIA

Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 16.03.2018
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 19.03.2018
Por

CHRISTIAN BREDEMEIER
Orientador - PPG Fitotecnia
UFRGS

CLAUDIMAR SIDNEI FIOR
Coordenador Substituto do
Programa de Pós-Graduação em
Fitotecnia

JOÃO LEONARDO FERNANDES PIRES
Coorientador - EMBRAPA TRIGO
PASSO FUNDO/RS

PAULO RÉGIS FERREIRA DA SILVA
PPG Fitotecnia/UFRGS

LUCIANO SHOZO SHIRATSUCHI
Louisiana State University/EUA

ANTÔNIO LUIS SANTI
CESNORS/UFSM
Campus Frederico Westphalen/RS

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade
de Agronomia

*"Nunca, jamais desanimeis, embora
venham ventos contrários"*

Santa Paulina

*"Muitos querem os perfumes das flores, mas poucos se
atrevem a sujar as mãos para cultivá-las"*

Augusto Cury

*"O saber a gente aprende com os mestres e com os
livros. A sabedoria se aprende com a vida e com
os humildes"*

Cora Coralina

Aos meus pais, Ary Luiz Vian (*in memoriam*) e Soeli Candaten Vian, a João Batista da Silva (Padrasto) e a Fernando Vian (Irmão), meus exemplos de vida, por sempre me motivarem, estimularem e possibilitar a realização de meus sonhos.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, grande criador do universo pelo dom da vida e poder admirar as belezas da criação.

A minha família, em especial aos meus pais e ao meu irmão, Fernando Vian, pelo ombro amigo, pelos ensinamentos, pelos incentivos e pela amizade. Ao meu padrasto, João Batista da Silva, pelos conselhos e incentivos, pelas conversas e amizade. Aos familiares da Família Vian e da Família Candaten, em especial aos meus avós, Matilde Bordin Candaten e Tranqüilo Luiz Vian (in memoriam) e aos meus tios e primos, que estiveram sempre presentes na minha vida e no decorrer da minha caminhada acadêmica, sempre me ajudaram, me aconselhando, me apoiando, me incentivando nos melhores e nos piores momentos, para que eu não desistisse do meu sonho. A minha namorada Franciane Lemes dos Santos, por cada segundo vivido junto, por todas as contribuições e auxílios durante o doutorado, momentos tristes, felizes e por fazer parte de todas as conquistas.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em especial a Faculdade de Agronomia, por ter proporcionado a realização do sonho de cursar a pós-graduação em uma Universidade de excelência e de grande reconhecimento nacional e internacional. Ao meu orientador, Prof. Christian

Bredemeier, pela orientação, confiança, amizade, ensinamentos, dedicação, ajuda, oportunidades, paciência e incentivos às atividades de pesquisas compartilhadas durante o período do doutorado. Aos demais professores do Programa de Pós-graduação em Fitotecnia e aos funcionários do Departamento de Plantas de Lavoura, pela contribuição na minha formação pessoal e profissional. Aos meus colegas do grupo de pesquisa (“família de pesquisa”), Danielle Almeida, Cecília P. da S. Giordano, Marcos Turra, Carolina Trentin, João P. Vanin, Jhonatan A. da Silva e Maicon Andreo Drum, pela amizade, apoio, incentivo e vários momentos de descontração. Aos colegas e amigos que fiz durante esta caminhada, Alexandre, Andrew, Antônio Santi, Aldemir, Catarine, Cristiano, Everton (in memoriam), Elizandro, Francisco, Fátima, Giliardi, Henrique, Itacir, Lisandra, Luan, Lorenzo, Moacir, Ravena, Silmara, Tiago, Vanderson, Victor e aos demais colegas do Departamento de Plantas de Lavoura e os ingressantes na Pós-Graduação em Fitotecnia em 2015, pela simplicidade de cada momento vivido junto, pelos ensinamentos, pelo incentivo, pela amizade e pelos momentos de descontrações em jantas e almoços acompanhados sempre de uma boa cerveja. Às demais pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para que eu vencesse mais uma etapa de minha caminhada. Em especial ao meu eterno colega, Guilherme Trevisol (in memoriam), pelos seus ensinamentos, pela sua amizade e pelo seu amor para com a Agronomia.

Ao meu Co-orientador Dr. João Leonardo Fernandes Pires, ao seu grupo de pesquisa, e à Embrapa trigo, pela colaboração, pronta disponibilidade em auxiliar no desenvolvimento da pesquisa e nas discussões técnicas do trabalho, que foram fundamentais na realização deste trabalho. Ao Professor Marcos

Carrafa e a SETREM por toda disponibilidade e auxílio na realização dos experimentos. Aos Professores Antônio Luis Santi, Luciano Shozo Shiratsuchi e Paulo Regis Ferreira da Silva, pela participação na banca de defesa deste trabalho e pelas contribuições relevantes ao trabalho.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pela concessão de bolsa durante o doutorado, permitindo dedicação integral às atividades acadêmicas. À Fundação de Pesquisa Agrisus por financiar parte do projeto de pesquisa desenvolvido, por meio do Projeto 2222/17 intitulado “Algoritmo para a adubação nitrogenada sustentável em sistema plantio direto”.

Muito obrigado a todos!

DESENVOLVIMENTO E ADAPTAÇÃO DE ALGORITMOS PARA A ADUBAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA EM TAXAS VARIÁVEIS EM TRIGO E MILHO, UTILIZANDO SENSOR ÓPTICO DE DOSSEL¹

Autor: André Luis Vian

Orientador: Christian Bredemeier

Co-orientador: João Leonardo Fernandes Pires

RESUMO

As culturas de milho e trigo apresentam grande importância socioeconômica no Rio Grande do Sul e no Brasil. Nos aspectos ambiental e agrônomo, procura-se, nos recentes trabalhos envolvendo a adubação nitrogenada, a maximização da eficiência no uso do nitrogênio (N), com o objetivo de aumentar o rendimento de grãos das culturas e reduzir as perdas do N. Diante deste cenário, o entendimento da variabilidade da lavoura permitiu gerenciá-la, por meio de algoritmos de aplicação de insumos à taxa variada, utilizando sensores de vegetação. O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver algoritmos para adubação nitrogenada sustentável, eficiente e a taxa variável para as culturas de milho e de trigo para o sul do Brasil, utilizando sensores de vegetação. Os trabalhos a campo foram executados em três locais, na EAA/UFRGS (Eldorado do Sul/RS), Embrapa Trigo (Coxilha/RS) e SETREM (Três de Maio/RS), nas safras agrícolas de 2016 e 2017 para a cultura do trigo e na EAA/UFRGS na safra agrícola 2016/2017 para a cultura do milho. Foram utilizados tratamentos com diferentes doses de nitrogênio na semeadura, com o objetivo de gerar a variabilidade inicial no desenvolvimento das plantas, para posteriormente realizar a correção dessa variabilidade pela aplicação de N em cobertura. Essa variabilidade foi corrigida com dois métodos de adubação, o recomendado denominado PADRÃO e o algoritmo desenvolvido, para ambas as culturas. A forma de empregar a campo o algoritmo foi por meio de sensores de vegetação, o qual fornecem valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), sendo que os mesmos foram utilizados na prescrição de doses de nitrogênio em cobertura. As variáveis analisadas foram, rendimento de grãos, uso do N e Eficiência de uso do N (EUN), onde os mesmos apresentaram diferenças significativas quando comparado ao método PADRÃO. Os resultados encontrados neste trabalho permitem a implementação dos algoritmos de adubação nitrogenada em cobertura em taxa variada nas culturas do milho e do trigo no sul do Brasil, maximizando a eficiência do uso do N, contribuindo para um melhor manejo da adubação nitrogenada.

¹ Tese de Doutorado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (131f.) Março, 2018.

DEVELOPMENT AND ADAPTATION OF ALGORITHMS FOR NITROGEN TOPDRESSING FERTILIZATION IN VARIABLE RATES IN WHEAT AND CORN USING OPTICAL CANOPY SENSOR¹

Author: André Luis Vian

Advisor: Christian Bredemeier

Co-advisor: João Leonardo Fernandes Pires

ABSTRACT

Corn and wheat crops have great socioeconomic importance in the state of Rio Grande do Sul and in Brazil. Considering environmental and agronomic issues, it is sought the increased of nitrogen (N) use efficiency, in order to increase grain yield to reduce N losses. In this scenario, the understanding of the variability of the crop allowed to manage it by the use of algorithms for variable rate nitrogen fertilization using vegetation sensors. The general objective of this work was to develop a new algorithm for sustainable, efficient and variable rate nitrogen fertilization for corn and wheat in southern Brazil using vegetation sensors. Field experiments were carried out in three locations, in EEA/UFRGS (Eldorado do Sul/RS), Embrapa Trigo (Coxilha/RS) and SETREM (Três de Maio/RS), in the growing seasons 2016 and 2017 for wheat and in EEA/UFRGS in the growing season 2016/2017 for corn. Different nitrogen rates at sowing were applied with the objective to generate initial development variability of plants, in order to later correct this variability by variable nitrogen topdressing fertilization. This variability was corrected by two fertilization methods the fertilization, the recommended rate ("PADRÃO") and the developed algorithm. The way to use the algorithm in the field was by means of vegetation sensors, which provide the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for the prescription of topdressing nitrogen rates. The analyzed variable were grain yield, N use and nitrogen use efficiency (NUE), which presented significant differences when compared to the recommended rate by standar method. The results found in this work allow the implementation of topdressing nitrogen fertilization algorithms in variable rate for corn and wheat in Southern Brazil, maximizing N use efficiency and contributing to a better management of nitrogen fertilization.

¹ Doctoral thesis in Plant Science, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (131p.) March, 2018.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Hipótese.....	5
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivo geral.....	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Aspectos gerais da cultura do milho.....	7
2.2 Aspectos gerais da cultura do trigo.....	8
2.3 Importância do nitrogênio (N) para as culturas.....	8
2.4 Sensores de vegetação como ferramenta para a adubação nitrogenada à taxa variada.....	11
2.5 Desenvolvimento de algoritmos para a adubação nitrogenada à taxa variada e em tempo real.....	14
2.6 Referências Bibliográficas.....	19
3 CAPÍTULO I - VALIDAÇÃO DE ALGORITMO PARA A ADUBAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA A TAXA VARIADA EM TRIGO PELO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI).....	27
3.1 INTRODUÇÃO.....	28
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.2.1 Caracterização dos locais de execução dos experimentos.....	30

	Página
3.2.2 Avaliação do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).....	33
3.2.3 Procedimentos de adubação.....	34
3.2.4 Avaliações.....	37
3.2.4.1 Rendimento de biomassa na parte aérea.....	37
3.2.4.2 Rendimento de grãos.....	37
3.2.4.3 Eficiência de uso do nitrogênio.....	37
3.2.4.4 Análise estatística.....	38
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
3.3.1 Biomassa seca da parte aérea.....	38
3.3.2 Rendimento de grãos.....	44
3.4 CONCLUSÃO.....	52
3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
4 CAPÍTULO II - DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO PARA A ADUBAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA À TAXA VARIADA EM MILHO UTILIZANDO SENSORES DE VEGETAÇÃO.....	59
4.1 INTRODUÇÃO.....	60
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	62
4.2.1 Caracterização do local de execução dos experimentos.....	62
4.2.2 Metodologia para o desenvolvimento do algoritmo para a safra agrícola 2016/2017.....	63
4.2.3 Avaliação com os sensores de vegetação.....	66
4.2.4 Análise estatística.....	68
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
4.3.1 Biomassa seca da parte aérea, teor de N na folha e quantidade de N acumulado na parte aérea.....	71
4.3.2 Rendimento de grãos e eficiência do uso do nitrogênio (EUN).....	75

	Página
4.4 APRIMORAMENTO DO ALGORITMO PARA A SAFRA AGRÍCOLA 2017/2018.....	78
4.5 CONCLUSÃO.....	81
4.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
5 CAPÍTULO III - MODELO PARA RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA NA CULTURA DO TRIGO UTILIZANDO SENSOR DE VEGETAÇÃO.....	89
5.1 INTRODUÇÃO.....	90
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	91
5.2.1 Desenvolvimento do algoritmo.....	94
5.2.2 Análise estatística.....	97
5.3 RESULTADO E DISCUSSÕES.....	98
5.4 CONCLUSÃO.....	106
5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	112
7 VITA.....	114

RELAÇÃO DE TABELAS

Página

CAPÍTULO I

1.	Tipo de solo e região homogênea de adaptação de cultivares de trigo (RHACT) nos diferentes locais de condução dos experimentos.....	30
2.	Características físicas e químicas das amostras de solo retiradas das áreas experimentais antes da instalação dos experimentos. EEA - UFRGS 2015; Embrapa Trigo 2017 e SETREM 2017.....	32
3.	Descrição das cultivares de trigo utilizadas nos experimentos conduzidos a campo.....	33
4.	Valores de NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) no estágio de seis folhas completamente expandidas, para as cultivares de trigo BRS Parrudo e TBIO Sossego, para os diferentes procedimentos de adubação em cobertura.....	43
5.	Rendimento de grãos, dose de N total, uso do nitrogênio e eficiência do uso do N (EUN) de cultivares de trigo nos diferentes procedimentos de adubação em cobertura na EEA – UFRGS.....	45
6.	Rendimento de grãos, dose de N total, uso do nitrogênio e eficiência do uso do N (EUN) de cultivares de trigo nos diferentes procedimentos de adubação em cobertura na SETREM.....	47
7.	Rendimento de grãos, dose de N total, uso do nitrogênio e eficiência do uso do N (EUN) para produção de grãos de cultivares de trigo nos diferentes procedimentos de adubação em cobertura na Embrapa Trigo.....	49

CAPÍTULO II

1. Características físicas e químicas das amostras de solo das áreas experimentais antes da instalação dos experimentos. EEA/UFRGS, no ano 2015..... 62
2. Lista de tratamentos com as diferentes doses de N aplicados na base (V3), doses de N em cobertura e dose de N total, utilizados no experimento conduzido na EEA - UFRGS. Safra agrícola 2016/2017..... 64
3. Classes de suficiência de nitrogênio em milho entre as relações de NDVI das parcelas tratamentos com a faixa rica, em condição de irrigação..... 65
4. Tratamentos de N aplicados na base e doses aplicadas em cobertura e sua relação com o rendimento de grãos de milho e o uso eficiente do N..... 77

CAPÍTULO III

1. Características físicas e químicas das amostras de solo retiradas da área experimental antes da instalação do experimento..... 92
2. Descrição das cultivares de trigo utilizadas..... 93
3. Tabela de recomendação da dose de nitrogênio para a cultura do trigo..... 102

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
1. Curva típica de reflectância da vegetação. Adaptado de Rizzi (2004).....	14
2. Exemplo comparativo entre o desenvolvimento de plantas sem (esquerda) e com (direita) deficiência ou disponibilidade de nitrogênio.....	17
CAPÍTULO I	
1. Orientação nadir de leitura dos sensores de vegetação.....	34
2. Algoritmo de aplicação de nitrogênio na cultura do trigo, proposto por Turra (2016).....	36
3. Biomassa da parte aérea no estágio de seis folhas expandidas (A), (C) e (E) e no florescimento (B), (D) e (F), na EEA-UFRGS, Embrapa Trigo e SETREM, respectivamente. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada cultivar pelo teste de Tukey, a $p < 0,10$ de probabilidade. * Significativo a $p < 0,10$; ** Significativo a $p < 0,01$	41
CAPÍTULO II	
1. Orientação nadir de leitura dos índices de vegetação, obtidos pelos sensores Greenseeker e Crop Circle.....	66
2. Resposta do índice de suficiência de N (ISN) em relação às doses de N aplicadas no estágio V3 na cultura do milho, utilizando o NDRE (Crop Circle) (A) e NDVI (Greenseeker) (B). FR=Faixa rica. ** Significativo a $p < 0,01$	69
3. Algoritmo utilizado na safra agrícola de 2016/2017 para aplicação de nitrogênio (N) em cobertura na cultura do milho, por meio de índices de suficiência de N (ISN), com definição de dose máxima, média e mínima.....	70

	Página
4. Biomassa seca na parte aérea no estágio V9 do milho, em relação às doses de N aplicadas no estágio V3. FR = Faixa rica. ** Significativo a $p < 0,01$	72
5. Teor de N (%) na parte aérea no estágio vegetativo V9 do milho, em relação às doses de N aplicadas no estágio V3. FR = Faixa rica. ** Significativo a $p < 0,01$	73
6. Quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea no estágio V9 do milho, em relação às doses de N aplicadas no estágio V3. FR = Faixa rica. ** Significativo a $p < 0,01$	74
7. Algoritmo de recomendação de nitrogênio em cobertura, adaptado para a cultura do milho para a safra agrícola 2017/2018.....	79
8. Comparação entre os diferentes algoritmos de recomendação de nitrogênio em cobertura desenvolvidos para a cultura do milho cultivada nos Estados Unidos (Solari, 2010 e Holland, 2010) e no Brasil (Shiratsuchi, 2014 e Algoritmo proposto por Vian 2017).....	81
 CAPÍTULO III	
1. Curva de absorção de nitrogênio pela cultura do trigo, adaptada de Wiethölter (2011).....	94
2. Orientação NADIR de leitura do índice de vegetação, obtidos por meio do Greenseeker.....	97
3. Relação entre os valores do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e a quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea do trigo (média de todos os tratamentos). Embrapa Trigo, 2016. ** Significativo a $p < 0,01$	99
4. Demanda de nitrogênio em função dos valores de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). Embrapa Trigo, 2016. ** Significativo a $p < 0,01$	100
5. Algoritmo de adubação nitrogenada em cobertura no estágio de seis folhas completamente expandidas em função do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). Embrapa Trigo, 2016. ** Significativo a $p < 0,01$	103
6. Algoritmo de adubação nitrogenada em cobertura de trigo no estágio de seis folhas completamente expandidas pelo Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).....	105

1 INTRODUÇÃO

As culturas de milho e trigo apresentam grande importância socioeconômica no Rio Grande do Sul e no Brasil. Nos aspectos ambiental e agrônomo, procura-se, nos recentes trabalhos envolvendo a adubação nitrogenada, a maximização da eficiência no uso do nitrogênio (N), com o objetivo de aumentar o rendimento de grãos das culturas e reduzir as perdas do N. Os nutrientes com maior demanda pelas plantas de milho e trigo são o fósforo, o potássio e o nitrogênio, sendo o N, o nutriente extraído em maior quantidade (Silva *et al.*, 2005). Estudos mostram que, para cada tonelada de grãos produzidos, o milho acumula, aproximadamente, 28 kg de N na parte aérea para produzir 1 t de grãos e exporta nos grãos em torno de 60% deste valor, ou seja, 17 kg de N ha⁻¹ (Cantarella, 2007) e o trigo acumula cerca de 22 kg de N ha⁻¹ na parte aérea para produzir 1 t de grãos (De Bona *et al.*, 2016).

O N tem relação direta com o crescimento e o desenvolvimento das plantas, desempenhando importantes funções bioquímicas e fisiológicas no metabolismo vegetal. O efeito desta relação é influenciado pelas formas nas quais o N está disponível no solo (amônio - NH₄⁺ ou nitrato - NO₃⁻). Essa variação na absorção sofre influência das condições meteorológicas (temperatura, pH do solo, umidade, tipo de solo e atividade microbiana) e do sistema de preparo do solo, as quais influenciam a mineralização da matéria orgânica para NH₄⁺ e,

posteriormente, a nitrificação para NO_3^- (Zhu *et al.*, 2015). Contudo, a eficiência na absorção destas formas minerais é baixa, sendo que a absorção do N aplicado varia entre 50 a 70% do total disponibilizado pela adubação (Saiz-Fernández *et al.*, 2015).

Apesar da sua importância fisiológica, em regiões tropicais e subtropicais, devido ao grande número de reações que o N sofre no ambiente e à sua mobilidade no solo sob Sistema Plantio Direto (SPD) e na planta, reduzindo a sua eficiência, o N é um dos nutrientes mais difíceis de serem manejados eficientemente na agricultura (Ernani, 2003; Amaral *et al.*, 2015). Devido a isso, a adubação nitrogenada necessita ser manejada da maneira mais eficiente e sustentável do que verificado atualmente em muitas situações de lavoura, pela utilização de doses condizentes com as reais necessidades da planta no momento da aplicação. O uso de fontes adequadas deste nutriente, pela aplicação nos estádios de desenvolvimento das plantas com maior necessidade ou resposta ao fertilizante e no local correto, podendo ser variada a quantidade de fertilizante nitrogenado ofertado de acordo com a necessidade das plantas (adubação em dose variada) (Fixen, 2010; Bredemeier *et al.*, 2016).

A recomendação de nitrogênio para as culturas do milho e do trigo para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, é determinada a partir de três fatores: teor de matéria orgânica no solo, cultura antecessora (Gramíneas, leguminosas ou brassicáceas) e a expectativa de rendimento esperada para a cultura. Os principais problemas encontrados por essa metodologia de recomendação, é que a dose a ser recomendada é definida no escritório, sem levar em consideração a variabilidade espacial de solo existente na área. Além disso, as ferramentas de sensoriamento remoto possibilitam avaliar a

variabilidade espacial do crescimento das plantas ao longo do ciclo de desenvolvimento. Desta forma, os sensores de vegetação possibilitam avaliar a demanda nutricional ao longo do ciclo.

A agricultura tradicionalmente realizada no Brasil possui entendimento que uma lavoura ou talhão apresenta comportamento homogêneo, sendo seu manejo realizado em função da necessidade média para a aplicação dos insumos (fertilizantes na semeadura e nas aplicações em cobertura, defensivos agrícolas, água, calcário), fazendo com que a mesma formulação e/ou quantidade do insumo seja utilizada em toda a área, desconsiderando as necessidades específicas das subáreas (zonas) da lavoura que apresentam características diferentes e possibilidade de resposta diferente à aplicação de N.

Diante deste cenário, na tentativa de manejar a variabilidade e aumentar a eficiência do uso dos fertilizantes de maneira sustentável, surgiu a Agricultura de Precisão (AP). O entendimento da variabilidade da lavoura permitiu gerenciá-la, ou seja, por meio do aumento da coleta de informações da área foi possível ter maior precisão na tomada de decisão sobre as intervenções a serem realizadas. Um dos principais conceitos da AP pode ser explicado como a aplicação de insumos no local correto, nas quantidades necessárias e nos momentos adequados, em áreas cada vez menores e mais homogêneas, ou seja, em sítios específicos (Pierce & Sadler, 1997).

Dentre as ferramentas utilizadas, destacam-se as que utilizam os sensores de vegetação para estimativa do potencial produtivo das culturas e realização de aplicações de fertilizantes nitrogenados a taxa variada. Dessa forma, é possível estimar o estado nutricional das plantas durante o ciclo de desenvolvimento e realizar a aplicação, variando a dose de N em tempo real,

possibilitando maior eficiência do uso do fertilizante e aumento do potencial produtivo das culturas (Schmidt *et al.*, 2011).

Por meio desses sensores iniciaram-se os estudos que possibilitaram o entendimento das necessidades nutricionais das plantas em tempo real e a aplicação de N a taxa variável nas lavouras, levando em consideração a variabilidade espacial. Os sensores de vegetação estão tornando-se uma realidade na agricultura, porém são questionados em relação a sua real utilidade a campo, uma vez que a falta de ajuste para as condições locais está fazendo com que esta tecnologia venha perdendo potencial de expansão. Um dos principais questionamentos sobre o uso de sensores e dos respectivos índices de vegetação é que o uso destes, em algumas situações, não resulta em ganhos produtivos e/ou econômicos. Essa falta de resposta com o uso dos sensores deve-se, entre outras coisas, aos algoritmos (relações matemáticas baseadas nas leituras realizadas nas plantas para a definição da dose de N a ser aplicada em cada parte da lavoura) usados nestes sensores, pois os mesmos não apresentam ajustes e validação para as condições edafo-climáticas diferentes das regiões onde foram desenvolvidos (geralmente Estados Unidos e Europa).

Nesse intuito, o desenvolvimento de novos algoritmos para tais condições faz-se necessário, para que as adubações nitrogenadas em cobertura, em tempo real e a taxa variável para as culturas do milho e do trigo, resultem em elevação do rendimento de grãos e incremento na eficiência de uso do N. O desenvolvimento de algoritmos para a adubação nitrogenada em cobertura em cereais torna-se uma necessidade devido a todas as interações do fertilizante nitrogenado com o sistema de manejo do solo, culturas antecessoras e o

ambiente, dificultando a estimativa do potencial produtivo das culturas (Vian, 2015).

1.1 Hipótese

A hipótese do presente trabalho é que o uso de algoritmos de adubação nitrogenada em cobertura a taxa variada nas culturas de milho e trigo, baseados em índices de vegetação avaliados por sensores de vegetação, são capazes de reduzir as quantidades de nitrogênio aplicado, mantendo e até incrementando o rendimento de grãos, assim como promovem aumento na eficiência do uso de N por estas culturas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Os objetivos do presente trabalho são desenvolver e adaptar algoritmos para adubação nitrogenada em cobertura em taxa variada, utilizando sensores ópticos de dossel, para as culturas de trigo e milho.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são: - Desenvolver e adaptar algoritmos para a adubação nitrogenada em milho e trigo, utilizando sensores ópticos de dossel, considerando as condições edafo-climáticas do sul do Brasil. - Maximizar o potencial produtivo de grãos, aplicando a taxa correta de fertilizantes nitrogenados (taxa variada), levando em consideração a demanda nutricional das plantas. - Reduzir as doses de nitrogênio utilizadas para as culturas de trigo e de milho, proporcionando potencializar o rendimento de grãos por meio dos

algoritmos desenvolvidos. - Melhorar a eficiência no uso do nitrogênio nos sistemas agrícolas, minimizando os impactos ambientais negativos provenientes de perdas de nitrogênio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais da cultura do milho

A produção mundial de grãos de milho atualmente está em ascensão, devido ao desenvolvimento de novos híbridos com maior capacidade produtiva, à ampla adoção de cultivares transgênicas, ao aprimoramento na habilidade de suportar, com maior eficiência, a deficiência hídrica e a melhorias na eficiência de uso do N.

Além dos investimentos em melhoramento genético e manejo da cultura, houve aumento mundial na área cultivada deste cereal entre os anos de 1991 e 2017 de, aproximadamente, 40 milhões de hectares, em função da abertura de novas fronteiras agrícolas em países como Brasil e China (CONAB, 2016).

A previsão é de aproximadamente 18 milhões de hectares destinados ao cultivo de milho no Brasil na safra 2017/18. Entre as regiões no país com maior rendimento médio de grãos, destacam-se a Região Sul e a Região Centro-oeste (CONAB, 2018). A produção no Brasil deverá ultrapassar a marca de 95 milhões de toneladas de grãos, com rendimento médio de grãos de aproximadamente 5,3 t ha⁻¹ (CONAB, 2018).

No Estado do Rio Grande do Sul (RS), a área destinada à produção de milho na safra 2017/18 foi de, aproximadamente, 728,4 mil ha, sendo que, em relação às safras anteriores, houve diminuição da área cultivada com este cereal,

o que pode ser explicado pelo aumento da área cultivada com soja (CONAB, 2018).

O aumento do rendimento de grãos da cultura do milho deve-se a importantes mudanças tecnológicas ocorridas, destacando-se os avanços no melhoramento genético, no arranjo de plantas, no controle fitossanitário, na qualificação da adubação, principalmente a nitrogenada, e na sua eficiência de aplicação e absorção, na qualidade do uso e manejo do solo, na irrigação e no aprimoramento na gestão dos recursos agrícolas, pela adoção das ferramentas da agricultura de precisão (AP) (Santi, 2007).

2.2 Aspectos gerais da cultura do trigo

A União Europeia, China, Índia e Rússia destacam-se entre os maiores produtores mundiais de trigo. As estimativas para a safra 2018 é que a produção atinja 751,9 milhões de toneladas (USDA, 2018). Aproximadamente 1,9 milhão de hectares serão destinados ao cultivo de trigo no Brasil na safra 2018 (CONAB, 2018). A produção brasileira deverá ser aproximadamente de 4,6 milhões de toneladas, tendo rendimento médio projetado de grãos de $2,4 \text{ t ha}^{-1}$ (CONAB, 2018).

2.3 Importância do nitrogênio (N) para as culturas

Os nutrientes com maior demanda pelas plantas de milho e trigo são o fósforo, o potássio e o nitrogênio, sendo o N o nutriente extraído em maior quantidade (Silva *et al.*, 2005). Estudos mostram que, para cada tonelada de grãos produzidos, o milho acumula, aproximadamente, 28 kg N ha^{-1} na parte aérea e exporta nos grãos em torno de 60% deste valor, ou seja, 17 kg ha^{-1}

(Cantarella, 2007). Já o trigo acumula cerca de 22 kg N ha⁻¹ na parte aérea para cada tonelada de grãos produzidos (De Bona *et al.*, 2016). O N é nutriente fundamental para as plantas, pois é constituinte de paredes celulares, proteínas, ácidos nucleicos, aminoácidos, enzimas, alcalóides, hormônios e clorofila (Weligama *et al.*, 2010; Marschner & Marschner, 2012).

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

O crescimento e o desenvolvimento das plantas apresentam relação direta com a quantidade e a disponibilidade de N, pois o mesmo apresenta importantes funções bioquímicas e fisiológicas no metabolismo vegetal. As formas de N disponíveis no solo, as quais as plantas absorvem com maior facilidade, são o amônio (NH₄⁺) e o nitrato (NO₃⁻). Essa preferência na absorção sofre influência das condições meteorológicas e de solo (temperatura, pH do solo, umidade, tipo de solo e atividade microbiana), as quais influenciam a mineralização da matéria orgânica para NH₄⁺ e, posteriormente, a nitrificação para NO₃⁻ (Dharmakeerthi *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 2015). Contudo, a eficiência na absorção destas formas minerais é baixa, sendo que a absorção do N aplicado varia entre 50 a 70% do total disponibilizado pela adubação (Zhu *et al.*, 2009; Saiz-Fernández *et al.*, 2015). Reduções na eficiência da absorção do N mineral pelas plantas ocorrem a partir dos processos edafoclimáticos do ambiente de

produção, tais como imobilização de N pelos microorganismos, volatilização e lixiviação em função da elevada disponibilidade hídrica.

Apesar da sua importância fisiológica, em regiões tropicais e subtropicais, devido ao grande número de reações que o N sofre no ambiente e à sua mobilidade no solo e na planta, reduzindo a sua eficiência, o N é um dos nutrientes mais difíceis de serem manejados eficientemente na agricultura (Ernani, 2003; Amaral *et al.*, 2015). Devido a isso, a adubação nitrogenada necessita ser manejada da maneira mais eficiente possível, pela utilização de doses condizentes com as reais necessidades da planta, pelo uso de fontes adequadas deste nutriente, pela aplicação nos estádios de desenvolvimento das plantas com maior necessidade ou resposta ao fertilizante e no local correto, podendo ser variada a quantidade de fertilizante nitrogenado ofertado para as plantas de acordo com sua necessidade (adubação em dose variada) (Fixen, 2010).

A definição do potencial produtivo das culturas ocorre durante todo o seu ciclo, desde a emergência da plântula até a maturação fisiológica. Porém, nos estádios iniciais V4 a VT (pendoamento), para o milho (Ritchie *et al.*, 1993), e do estágio de três folhas completamente expandidas até o florescimento, para o trigo (Haun, 1973), ocorrem importantes processos fisiológicos nas plantas, como a diferenciação das inflorescências e a definição do número de óvulos na espiga. Por isso, o suprimento adequado de N para a planta nestes estádios é de fundamental importância para o desenvolvimento da cultura e para a definição de seu potencial produtivo (Saiz-Fernández *et al.*, 2015). Uma das maneiras para o aumento na eficiência do uso do N pelas plantas, além das condições meteorológicas adequadas no momento da aplicação de N na lavoura, é a

aplicação de doses condizentes com as reais necessidades da cultura, sendo este um desafio no manejo deste nutriente (Bredemeier, 1999).

2.4 Sensores de vegetação como ferramenta para a adubação nitrogenada a taxa variada

A agricultura tradicionalmente realizada no Brasil possui entendimento que uma lavoura ou talhão apresenta comportamento homogêneo, sendo seu manejo realizado em função da necessidade média para a aplicação dos insumos (fertilizantes na semeadura e nas aplicações em cobertura, defensivos agrícolas, água, calcário), fazendo com que a mesma formulação e/ou quantidade do insumo seja utilizada em toda a área, desconsiderando as necessidades específicas de cada zona da lavoura (Mulla & Schepers, 1997; Pierce & Nowak, 1999; McBratney *et al.*, 2005).

Diante deste cenário, na tentativa de manejar a variabilidade espacial e aumentar a eficiência do uso dos fertilizantes, surgiu a agricultura de precisão (AP). O entendimento da variabilidade da lavoura permite gerenciá-la pelo aumento da coleta de informações da área, resultando em maior precisão na tomada de decisão sobre as intervenções a serem realizadas. Com as ferramentas da AP, foram intensificados os estudos para o entendimento da variabilidade espacial existente em relação aos tipos de solo, de fertilidade, de diferentes potenciais produtivos e demais fatores que influenciam a produtividade, usando métodos adequados e diferenciados para o manejo destes (Larson & Robert, 1991; Salviano *et al.*, 1998; Silva *et al.*, 2003).

Um dos principais conceitos da AP pode ser explicado como a aplicação de insumos no local correto, nas quantidades necessárias e nos momentos

adequados, em áreas cada vez menores e mais homogêneas, ou seja, em sítios específicos (Sawyer, 1994; Pierce & Sadler, 1997). Segundo o ministério da agricultura, a AP é um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial e temporal da unidade produtiva e visa ao aumento de retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização do efeito ao ambiente (MAPA, 2013).

A utilização de ferramentas tecnológicas disponíveis, como o sensoriamento remoto e o do sistema de informações geográficas (SIG), permitiu melhorar o manejo do solo, dos insumos e das culturas, de modo adequado para as variações espaciais e temporais e em tempo real (Corá *et al.*, 2004; Durigon, 2007). Dentre as ferramentas utilizadas, destacam-se as que utilizam os sensores de vegetação para estimativa do potencial produtivo das culturas e realização de aplicações de fertilizantes nitrogenados à taxa variada. Dessa forma, é possível estimar o estado nutricional das plantas durante o ciclo de desenvolvimento e realizar a aplicação, variando a dose de N em tempo real, possibilitando maior eficiência do uso do fertilizante e aumento do potencial produtivo das culturas (Schmidt *et al.*, 2011; Cichota *et al.*, 2018; Colaço & Bramley, 2018; Frels *et al.*, 2018).

Atualmente, encontram-se no mercado uma série de sensores de vegetação, tais como Greenseeker[®], N-Sensor[®], Crop Circle[®], Clorofilômetros, entre outros. O emprego desses sensores apresenta a mesma finalidade, ou seja, quantificar um índice de vegetação específico para cada cultura (variação de ambiente / manejo) (Schmidt *et al.*, 2009; Erdle *et al.*, 2011).

O índice de vegetação "mensurado" por esses sensores de vegetação se dá a partir da quantificação de diferentes comprimentos de onda (específico de

cada sensor), obtidos da reflectância espectral das plantas. O índice de vegetação mais encontrado na literatura é o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada). O NDVI é obtido pela seguinte relação: $NDVI = (IVP - V)/(IVP + V)$, onde IVP e V se referem à reflectância do infravermelho próximo e vermelho, respectivamente. Este índice apresenta variação numérica de -1 a +1, sendo os valores positivos referentes ao vigor vegetativo da cultura, enquanto que os valores negativos indicam presença de água ou ausência de vegetação (Rouse *et al.*, 1973; Liu *et al.*, 2006).

Os sensores realizam, de maneira geral, leituras nas bandas de absorção da radiação visível pelas plantas, que estão situadas principalmente próximas a 480 e 680 nm, relacionadas à presença de clorofila, e no comprimento de onda entre 700 e 1.300 nm, que representa o infravermelho próximo, onde ocorre alta reflectância pela vegetação (Figura 1). Esta reflectância sofre influência da estrutura celular interna da folha, tamanho e formato da célula e ocorrência de espaços intercelulares (Campbell, 2002; Shanahan, 2008).

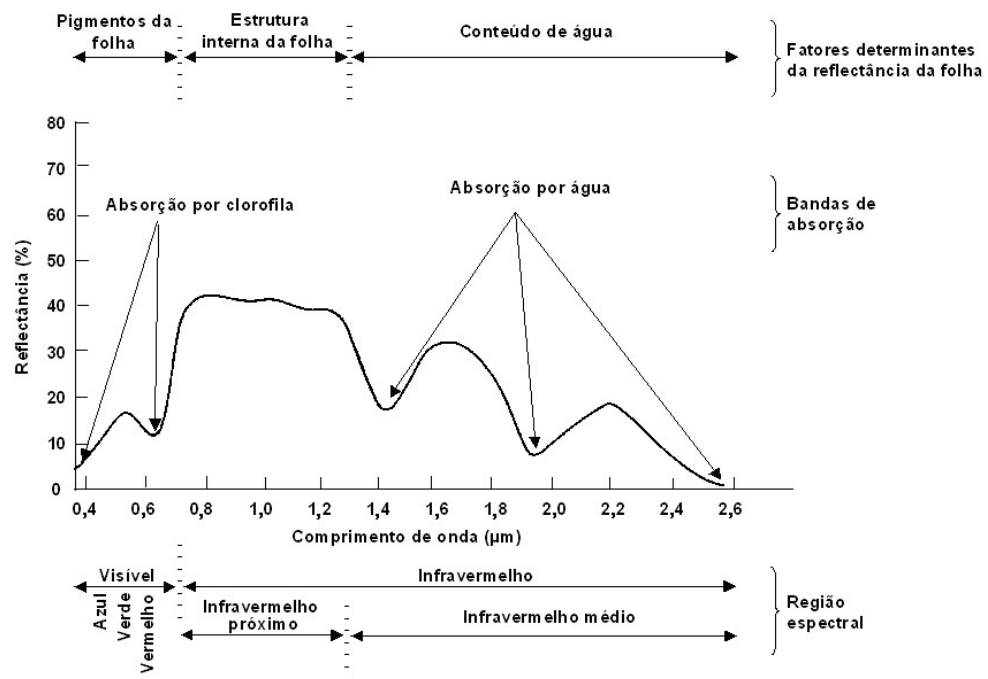


FIGURA 1. Curva típica de reflectância da vegetação. Adaptado de Rizzi (2004).

2.5 Desenvolvimento de algoritmos para a adubação nitrogenada à taxa variada e em tempo real

O desenvolvimento de sensores ópticos de vegetação, que permitem a realização do manejo *in situ* e em tempo real e com rápida interpretação dos resultados, tornou-se necessário na agricultura atual. Os primeiros algoritmos desenvolvidos basearam-se a partir dos clorofilômetros, sensores que necessitam de contato com as plantas e que apresentam pequena área de amostragem, dificultando a representação da variabilidade do dossel. Estes sensores estimam o conteúdo relativo de clorofila e, por meio dos valores de Índice de Suficiência de N (ISN), realizam a recomendação da dose de N em cobertura para diferentes culturas (Rambo *et al.*, 2007; Varvel *et al.*, 2007; Holland & Schepers, 2010; Dorante-Torres *et al.*, 2016). Porém, estes algoritmos

de recomendação de adubação nitrogenada foram desenvolvidos nestes países (Brasil, Estados Unidos da América e México), os quais apresentam calibrações e ajustes para cada cultura e para as suas condições edafoclimáticas.

O desenvolvimento de algoritmos para a adubação nitrogenada em cobertura e em tempo real ocorre em função da alta demanda de N em cobertura para os cereais, sendo que as doses variam de 250 a 350 kg N ha⁻¹ para a cultura do milho e de 80 a 110 kg N ha⁻¹ para a cultura do trigo. Desta forma, devido as inúmeras interações do fertilizante nitrogenado com o solo e ambiente, busca-se o desenvolvimento de ferramentas em tempo real para a melhor recomendação de N para as culturas e maior eficiência no seu uso pelas mesmas (Solie *et al.*, 2012; Xue *et al.*, 2014; Vian, 2015; Mcfadden *et al.*, 2017).

Os algoritmos para adubação nitrogenada das culturas foram desenvolvidos inicialmente em duas escolas: Oklahoma e Nebraska (Franzen *et al.* 2016). O algoritmo desenvolvido pela Universidade de Oklahoma (EUA) compreende vários parâmetros para compor o algoritmo de recomendação de N para as culturas (Raun *et al.* 2005; Teal *et al.* 2006). Os parâmetros analisados pelo algoritmo são dose de fertilizantes nitrogenado aplicado na semeadura, graus dias acumulado (da semeadura até o momento da leitura do NDVI), o NDVI da lavoura ou talhão no momento da adubação, o NDVI da faixa rica ou faixa de referência, sendo essa faixa um padrão de desenvolvimento das plantas, onde, teoricamente, não ocorre falta de N (Raun *et al.*, 2005; Teal *et al.*, 2006). Assim, O NDVI da “faixa rica” é comparado com o NDVI da lavoura, sendo determinado o chamado de Índice de Suficiência de N – ISN (Raun *et al.*, 2005; Teal *et al.*, 2006).

Outra abordagem para a construção de algoritmos foi desenvolvida pela Universidade de Nebraska (EUA). Tal algoritmo compreende poucas variáveis, sendo este algoritmo de construção mais simples (Schepers *et al.*, 1992; Holland & Schepers, 2010; Holland & Schepers, 2013; Shiratsuchi *et al.*, 2011). Nesse algoritmo, os fatores considerados são o estágio de desenvolvimento das plantas e o ISN. Por meio da leitura do NDVI no estágio de aplicação do N, realiza-se a construção de curvas de relação entre o rendimento de grãos com as leituras de NDVI. Desta maneira, são desenvolvidas curvas que irão prever a quantidade de fertilizante em tempo real e a taxa variada (Shiratsuchi *et al.*, 2011). Estes parâmetros já foram utilizados para o desenvolvimento de algoritmo para a adubação em cobertura da cultura do milho nas condições do cerrado brasileiro (Shiratsuchi *et al.*, 2014).

O ISN é largamente utilizado como forma de avaliar os efeitos de solo, diferença no crescimento de planta, condições hídricas e diferentes híbridos, pois o mesmo é conduzido em parcela ou faixa de referência dentro do mesmo talhão. Assim, o ISN é a melhor forma de considerar a demanda nutricional e de crescimento das plantas, para posterior recomendação de adubação nitrogenada em cobertura nos cereais.

O ISN é calculado pela divisão de um determinado índice de vegetação medido na lavoura ou em diferentes tratamentos utilizados pelo valor deste índice obtido na chamada faixa rica (faixa de referência - FR), ou seja, $ISN = (\text{Índice de vegetação parcela ou lavoura}) / (\text{índice de vegetação FR})$. Esse método que utiliza o ISN leva em consideração o máximo potencial de desenvolvimento das plantas (FR) em comparação as demais plantas que são

afetadas pela disponibilidade de N ou outra limitação do ambiente de produção, como pode ser observado na Figura 2.

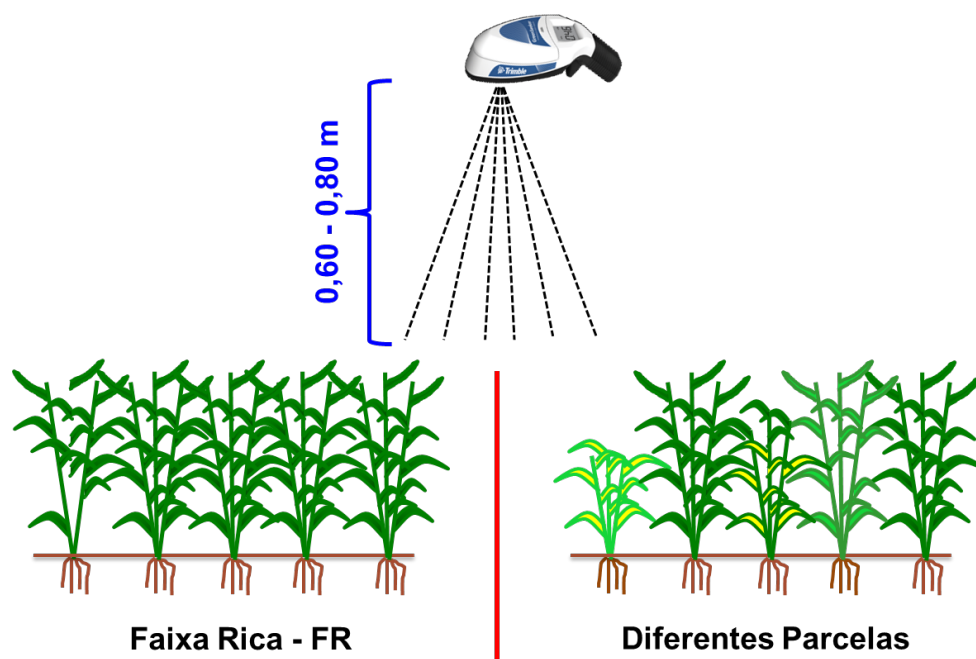


FIGURA 2. Exemplo comparativo entre o desenvolvimento de plantas sem (esquerda) e com (direita) deficiência ou disponibilidade de nitrogênio.

Posteriormente, outros algoritmos foram desenvolvidos pela Universidade do Missouri, os quais levam em consideração o ISN e a variabilidade espacial do solo na faixa de referência (Scharf & Lory, 2009). Outra escola que desenvolveu algoritmos para a cultura do milho foi a Universidade da Dakota do Norte, onde 60 campos foram avaliados com dois sensores de vegetação (Crop Circle e Greenseeker), baseando-se no índice de vegetação normalizado pelos graus dias (INSEY), utilizado nos algoritmos da escola de Oklahoma (Arnall *et al.*, 2006).

Com o passar dos anos, sensores ativos de vegetação foram implementados na agricultura, resultando no desenvolvimento de alguns algoritmos com maior robustez e com modelos matemáticos mais complexos para a realização de recomendação de N em cobertura e em taxa variada, como, por exemplo, na cultura da cana de açúcar (Amaral *et al.*, 2017). Para as culturas do arroz, trigo e milho, foram desenvolvidos algoritmos que levam em consideração o ISN como ferramenta para recomendar a dose de N (Solari *et al.*, 2010; Xue *et al.*, 2014; Thompson *et al.*, 2015; Dhital & Raun, 2016; Miller *et al.*, 2017; Mcfadden *et al.*, 2017). Trevisan (2016), desenvolveu algoritmo para a cultura do algodão, baseado na estimativa da quantidade de N acumulada nas plantas com o uso de índices de vegetação e na respectiva aplicação da quantidade de N necessária para atingir a quantidade “ideal” demandado pela cultura no momento da aplicação (Trevisan, 2016).

Atualmente no cenário brasileiro, existem poucos equipamentos trabalhando a campo que já utilizam essas tecnologias e ferramentas para realizar a adubação nitrogenada em tempo real. Porém ainda há espaço para melhorias quanto a forma de recomendação e no aumento da eficiência do uso dessa tecnologia, fatores esses primordiais para uma maior adesão no uso dessas tecnologias a campo.

2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, L.R.; TREVISAN, R.G.; MOLIN, J.P. Canopy sensor placement for variable-rate nitrogen application in sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.19, p.147-160, 2017.

AMARAL, T.A. et al. Nitrogen management strategies for smallholder maize production systems: yield and profitability variability. **International Journal of Plant Production**, Chicago, v.9, p.75-98, 2015.

ARNALL, D.B. et al. Relationship between coefficient of variation measured by spectral reflectance and plant density at early growth stages in winter wheat. **Journal of Plant Nutrition**, London, v.29, p.1983–1997, 2006.

BISSANI, C.B. et al. Nitrogênio e adubos nitrogenados. In: BISSANI, C.B. et al. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.145-166.

BREDEMEIER, C. **Predição da necessidade de nitrogênio em cobertura em trigo e aveia**. 1999. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BREDEMEIER, C.; VIAN, A.L.; PIRES, J.L.F. Aplicação de nitrogênio em tempo real: modelos e aplicações. In: SANTI, A. L. **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, RS: CESPOL, 2016. p.137-158.

CAMPBELL, J.B. **Introduction to remote sensing**. 3rd ed. New York: Guilford Press, 2002. 621 p.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 7, p. 375-470.

CICHOTA, R. et al. Performance of a fertilizer management algorithm to balance yield and nitrogen losses in dairy systems. **Agricultural Systems**, Essex, v.162, p.56-65, 2018.

COLAÇO, A.F.; BRAMLEY, R.G.V. Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? **Field Crops Research**, Amsterdam, v.218, p.126-140, 2018.

CONAB – COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. 2018. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/18_02_08_17_09_36_fevereiro_2018.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2018.

CORÁ, J.E. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.28, p.1013-1021, 2004.

DE BONA, F.D.; DE MORI, C.; WIETHÖLTER. S. Manejo nutricional da cultura do trigo. **Informações Agronômicas – IPNI**, Piracicaba, n.15, 2016.

DHARMAKEERTHI, R.S.; KAY, B.D.; BEAUCHAMP, E.G. Spatial variability of in season N uptake by corn across a variable landscape as affected by management. **Agronomy Journal**, Madison, v.98, p.255–264, 2006.

DORANTE-TORRES, L. et al. A methodology to develop algorithms that predict nitrogen fertilizer needs in maize based on chlorophyll measurements: a case study in Central Mexico. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.154, p.705-719, 2016.

DURIGON, R. **Aplicação de técnicas de manejo localizado na cultura do arroz irrigado (Oryza sativa L.)**. 2007. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

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

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

FIXEN, P.E. The four rights within a global fertilizer best management practices framework. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. p.1-22.

FRANZEN, D. et al. Algorithms for in-season nutrient management in cereals. **Agronomy Journal**, Madison, v.108, p. 1775-1781, 2016.

FRELS, K. et al. Evaluating canopy spectral reflectance vegetation indices to estimate nitrogen use traits in hard winter wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.217, p.82-92, 2018.

HAUN, J. R. Visual quantification of wheat development. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, p.116-119, 1973.

HOLLAND, K.H.; SCHEPERS, J.S. Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.102, p.1415–1424, 2010.

HOLLAND, K.H.; SCHEPERS, J.S. Use of a virtual-reference concept to interpret active crop canopy sensor data. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.14, p.71–85, 2013.

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

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

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Principais conceitos e expressões utilizados na agricultura de precisão - AP**. 2013. Disponível em :<<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/tecnologia-agropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/conceitos-relacionados-a-agricultura-de-precisao-1.pdf>>. Acesso em: 24 fev. 2018.

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

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

MCFADDEN, B.R.; BRORSEN, B.W.; RAUN, W.R. Nitrogen fertilizer recommendations based on plant sensing and Bayesian updating. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.19, p.79-92, 2017.

MULLA, D.J.; SCHEPERS, J.S. Key process and properties for site-specific soil and crop management. In: PIERCE, F.J.; SADLER, E.J. (Ed.). **The state of site specific management for agriculture**. Madison: ASA/ CSSA/ SSSA, 1997. p.1-18.

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

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

RAMBO, L. et al. Monitoramento do nitrogênio na planta e no solo para predição da adubação nitrogenada em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, p.407-417, 2007.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1993. 26 p. (Special Report, 48).

ROUSE, J.W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, D.C. **Proceedings...** Washington, D.C.: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973. v.1, p.309-317.

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

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

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

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

SCHEPERS, J.S. et al. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.23, p.2173-2187, 1992.

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

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

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

SHIRATSUCHI, L. S. et al. Desenvolvimento de um algoritmo baseado em sensores ativos de dossel para recomendação da adubação nitrogenada em taxas variáveis. In: INAMASU, R. Y. et al. **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: EMBRAPA Instrumentação, 2011a. p. 184-188.

SHIRATSUCHI, L.S. et al. Algoritmo para aplicação de doses variáveis de nitrogênio em tempo real para produção de milho safra e safrinha no cerrado. In: BERNARDI, A. C. de C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2014. p. 224-230.

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

SILVA, V.R. et al. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um argissolo vermelho - amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.27, p.1013-1020, 2003.

SOLIE, J.B. et al. Generalized algorithm for variable-rate nitrogen application in cereal grains. **Agronomy Journal**, Madison, v.104, p.378–387, 2012.

TREVISAN, R.G. **Sensores ativos de dossel na gestão da adubação nitrogenada e da aplicação de fitoreguladores no algodoeiro**. 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

USDA – Foreign Agriculture Service/Office of global analysis. **Wheat: world markets and trade**. 2016. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain-wheat.pdf>>. Acesso em: 24 fev. 2018.

VARVEL, G.E. et al. An algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index. **Agronomy Journal**, Madison, v.99, p.701–706, 2007.

VIAN, A.L. **Sensores de vegetação para estimativa in situ potencial produtivo na cultura do milho**. 2015. 81 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

WELIGAMA, C. et al. Application of nitrogen in NO₃- form increases rhizosphere alkalisation in the subsurface soil layers in an acid soil. **Plant and Soil**, Hague, v.333, p.403–416, 2010.

XUE, L. et al. Topdressing nitrogen recommendation for early rice with an active sensor in South China. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.15, p.95-110, 2014.

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

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

3 CAPÍTULO I

**VALIDAÇÃO DE ALGORITMO PARA A ADUBAÇÃO NITROGENADA
EM COBERTURA A TAXA VARIADA EM TRIGO PELO ÍNDICE DE
VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI)**

3.1 INTRODUÇÃO

A adequada disponibilidade de nitrogênio (N) em trigo é essencial para obtenção de elevado potencial produtivo, pois influencia o número de afilhos emitidos e sobreviventes, o número de grãos por espiga e o peso e teor de proteína dos grãos (Mantai *et al.*, 2016). Bredemeier *et al.* (2016) definiram o estágio de seis folhas completamente expandidas do colmo principal como o momento ideal para aplicação de N em cobertura em trigo, sendo a definição da dose a ser aplicada baseada no teor de matéria orgânica do solo, na cultura antecessora e na expectativa de produtividade (Reunião, 2017).

A utilização destes parâmetros é simples, porém incompleta, já que o N é um elemento dinâmico no solo e passa por diversos processos que modificam sua forma, como mineralização, imobilização e desnitrificação. Além disso, a absorção de N pela cultura é variável entre anos e entre áreas dentro de uma mesma lavoura (Chavarria *et al.*, 2015). Por isso, a aplicação de dose uniforme de N na lavoura, sem levar em consideração as diferenças espaciais no suprimento deste nutriente pelo solo, resulta em menor eficiência de uso deste nutriente (Inman *et al.*, 2005).

Assim, os agricultores tendem a aplicar nitrogênio em quantidade suficiente, a taxas uniformes, para atender às necessidades da cultura nas áreas mais exigentes no campo, resultando em maior risco de perda de N nas áreas que necessitam menores quantidades deste nutriente (Basso *et al.*, 2011). Como consequência, as reais necessidades da planta não são supridas em alguns locais na lavoura, levando à aplicação de doses acima ou abaixo da exigida.

O emprego de outras variáveis na recomendação da adubação nitrogenada, como a produção de biomassa e a quantidade de N acumulada na parte aérea, é limitado, em função da demora no procedimento de avaliação e por exigirem análise laboratorial (Bredemeier *et al.*, 2016), apesar de estas variáveis serem indicadores eficientes da resposta ao N aplicado em cobertura. Em contraste, a avaliação da reflectância do dossel pode estimar o estado nutricional das plantas em relação ao N, determinando sua variabilidade espacial em uma lavoura (Singh *et al.*, 2017).

Os sensores ópticos de reflectância montados em máquinas agrícolas, tais como Greenseeker[®], N-Sensor[®] e Crop Circle[®], permitem a realização de leituras de reflectância em tempo real e com elevada resolução espacial, permitindo a adubação nitrogenada a taxa variável (Mahajan *et al.*, 2014). Raun *et al.* (2002) mostraram que a utilização do sensor Greenseeker[®] na recomendação de adubação nitrogenada em trigo resultou em 15% de aumento na eficiência de uso do N. Entretanto, o emprego destes sensores como ferramenta no manejo de N passa pelo desenvolvimento de algoritmos que estimem a dose de N a ser aplicada a taxa variada em função dos índices de vegetação avaliados.

O objetivo deste trabalho foi validar o algoritmo para recomendação de adubação nitrogenada em cobertura a taxa variada em trigo, utilizando o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Caracterização dos locais de execução dos experimentos

Os trabalhos a campo foram realizados em 2017, sendo conduzidos em três locais, na Estação Experimental Agronômica da UFRGS (EEA/UFRGS), em Eldorado do Sul (RS), na Estação Experimental da Embrapa Trigo, em Coxilha (RS) e na Estação Experimental da Sociedade Educacional de Três de Maio (SETREM), em Três de Maio (RS) (Tabela 1).

TABELA 1. Tipo de solo e região homogênea de adaptação de cultivares de trigo (RHACT) nos diferentes locais de condução dos experimentos.

Local	Tipo de solo	RHACT ¹
Eldorado do Sul (RS) – UFRGS	Argissolo Vermelho Distrófico típico	2
Coxilha (RS) – Embrapa Trigo	Latossolo Vermelho Distrófico húmico	1
Três de Maio (RS) – SETREM	Latossolo Vermelho Distroférico típico	2

¹ RHACT = Região 1 – Fria e úmida; Região 2 – Moderadamente quente e úmida.

A EEA/UFRGS está localizada no município de Eldorado do Sul (RS), situado na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul (RS) e enquadrada na Região Homogênea de Adaptação de Cultivares 2 (Moderadamente quente e úmida). O clima é subtropical de verão úmido quente, do tipo Cfa, conforme a classificação de Koppen (IPAGRO, 1979), com altitude média de 46 metros acima do nível do mar.

A precipitação pluvial média anual em Eldorado do Sul é de 1.440 mm e a temperatura média mensal do ar varia entre 14 e 25°C, entre os meses mais

frios e mais quentes (Bergamaschi *et al.*, 2003). O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck *et al.*, 2008).

A Estação Experimental da Embrapa Trigo está localizada no município de Coxilha (RS), situada na região do Planalto Médio, sendo enquadrada na Região Homogênea de Adaptação de Cultivares 1 (Região fria e úmida). O clima é subtropical de verão úmido quente, do tipo Cfa, conforme a classificação de Koppen (INMET, 2016), com altitude média de 689 metros acima do nível do mar.

A precipitação pluvial média anual em Coxilha é de 1.788 mm e a temperatura média mensal do ar do mês mais quente é de 22°C e a média do mês mais frio é de 12,9°C (INMET, 2016). O solo predominante na região é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico húmico, caracterizado por possuir boa drenagem, ser profundo a muito profundo e com aptidão para cultivos anuais de grãos (Streck *et al.*, 2008).

A estação experimental da SETREM está localizada no município de Três de Maio (RS), na região do Alto Uruguai, sendo enquadrada na Região Homogênea de Adaptação de Cultivares 2 (Moderadamente quente e úmida). O clima da região é classificado como subtropical de verão úmido quente, do tipo Cfa, conforme a classificação de Koppen (INMET, 2016), com altitude média de 343 metros acima do nível do mar. A precipitação pluvial média anual na região é de 1.725 mm e a temperatura do ar média anual é de 20,8°C, no mês mais quente a temperatura média do ar é de 25,8°C e a temperatura média no mês mais frio é de 15°C (Wrege *et al.*, 2011). O solo predominante na região é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico, caracterizado por

possuir boa drenagem, ser profundo a muito profundo e com aptidão para cultivos anuais de grãos (Streck *et al.*, 2008).

Antes da instalação dos experimentos, foram retiradas amostras de solo nas áreas de estudo, na camada entre as profundidades de 0-20 cm. As amostras foram analisadas pelo Laboratório de Análises de Solos da UFRGS e os resultados são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2. Características físicas e químicas das amostras de solo retiradas das áreas experimentais antes da instalação dos experimentos. EEA - UFRGS 2015; Embrapa Trigo 2017 e SETREM 2017.

EEA/UFRGS – Eldorado do Sul, RS									
Ano	Argila %	pH H ₂ O	P ---- mg dm ⁻³	K - g kg ⁻¹	MO ¹ g kg ⁻¹	Al ³⁺ ----- cmol _c dm ⁻³	Ca ²⁺ ----- cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ ----- cmol _c dm ⁻³	V ² ----- %
2015	27	5,6	20	165	21	0	4,3	1,9	71
Embrapa Trigo – Coxilha, RS									
Ano	Argila %	pH H ₂ O	P ---- mg dm ⁻³	K - g kg ⁻¹	MO ¹ g kg ⁻¹	Al ³⁺ ----- cmol _c dm ⁻³	Ca ²⁺ ----- cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ ----- cmol _c dm ⁻³	V ² ----- %
2017	33	5,3	38,1	148	32	0,8	3,6	1,92	58
SETREM – Três de Maio, RS									
Ano	Argila %	pH H ₂ O	P ---- mg dm ⁻³	K - g kg ⁻¹	MO ¹ g kg ⁻¹	Al ³⁺ ----- cmol _c dm ⁻³	Ca ²⁺ ----- cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ ----- cmol _c dm ⁻³	V ² ----- %
2017	--	--	50	310	31	--	8,3	3,9	75

¹ MO=matéria orgânica; ² V=saturação de bases.

Em todos os locais, a cultura antecessora ao trigo foi a soja. A dessecação das áreas antes da implantação dos experimentos foi realizada com herbicida de ação total a base de glyphosato (3 L ha⁻¹ de produto comercial) (Reunião, 2017).

Nos experimentos realizados na safra agrícola de 2017, foram utilizadas as cultivares BRS Parrudo e TBIO Sossego, nos três locais. As cultivares utilizadas são indicadas para cultivo nas regiões homogêneas de adaptação de

cultivares 1 e 2, regiões nas quais se inserem os três locais. Na Tabela 3, são listadas algumas características das cultivares utilizadas nos experimentos.

TABELA 3. Descrição das cultivares de trigo utilizadas nos experimentos conduzidos a campo.

Cultivar	Ciclo¹	Porte	Hábito de crescimento	RHACT²	Classificação
BRS Parrudo	135	Médio	Ereto	RS 1 e 2	Pão/melhorador
TBIO Sossego	130	Médio	Semi-Ereto	RS 1 e 2, SC 1 e 2, PR 1, 2 e 3, SP 2 e 3, MS 3 e 4, MG4, GO4, DF4	Pão

¹Dias; ² Região homogênea de adaptação de cultivares de trigo (1, 2, 3 e 4) e Estados: RS (Rio Grande do Sul), SC (Santa Catarina), PR (Paraná), SP (São Paulo), MS (Mato Grosso do Sul), MG (Minas Gerais), GO (Goiás) e DF (Distrito Federal) (Reunião, 2017).

3.2.2 Avaliação do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

As medições da reflectância do dossel vegetativo foram realizadas com sensor óptico ativo Greenseeker® (EEA - UFRGS) e Crop Circle® (SETREM e Embrapa Trigo), sendo calculado o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index). As leituras foram realizadas com o equipamento posicionado paralelamente às linhas da cultura, com 0,6 a 0,8 m acima do dossel (Figura 1), sendo avaliadas as linhas centrais das parcelas.

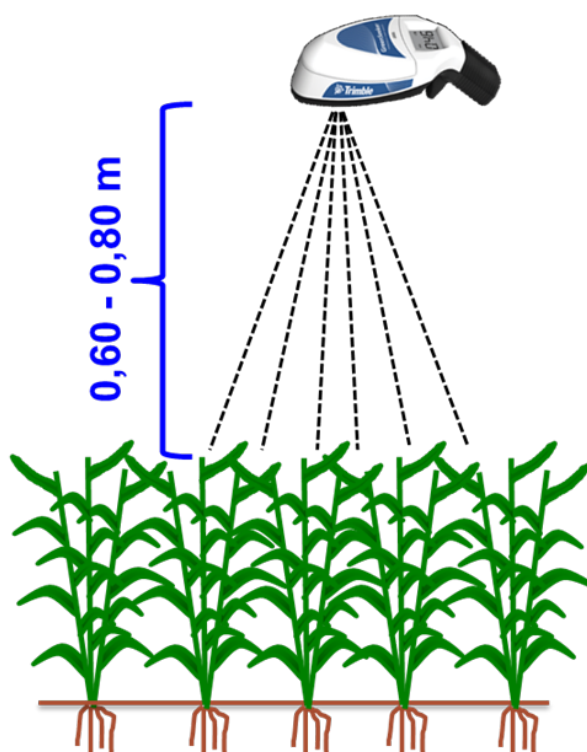


FIGURA 1. Orientação nadir de leitura dos sensores de vegetação.

O NDVI foi calculado utilizando a seguinte fórmula: $NDVI = (IVP - V) / (IVP + V)$. onde V refere-se à reflectância no vermelho (680 nm) e IVP refere-se ao infravermelho próximo (770 nm).

3.2.3 Procedimentos de adubação

Os tratamentos foram alocados no delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições. Foram utilizados tratamentos com diferentes doses de N na emergência das plantas, com o objetivo de criar variabilidade no desenvolvimento inicial das plantas, com o intuito de simular a realidade encontrada à campo, criando, assim, diferentes demandas potenciais de nitrogênio. Para isso, foram utilizadas as seguintes doses de nitrogênio aplicadas na emergência: 0, 15, 30, 45 e 60 kg ha⁻¹ de N.

A adubação de cobertura no estágio de sexta folha completamente expandida do colmo principal (Escala Haun) foi realizada utilizando dois procedimentos, denominadas “PADRÃO” e pelo emprego de algoritmo, com o objetivo de comparar os dois procedimentos. O procedimento “PADRÃO” seguiu a recomendação do Manual de Adubação e Calagem para o RS e SC. Foram aplicadas as doses recomendadas pelo Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC, considerando o teor de matéria orgânica do solo, a cultura antecessora e a expectativa de rendimento de 5000 kg ha^{-1} , a qual ficou definida em 30 kg ha^{-1} de N (base) + 80 kg ha^{-1} de N (cobertura) (Comissão..., 2016). Com o intuito de criar uma variabilidade inicial no crescimento das plantas, utilizou-se cinco doses de N na semeadura (0, 15, 30, 45 e 60 kg ha^{-1} de N) e no estágio da sexta folha foi aplicado uma dose fixa de 80 kg ha^{-1} de N, com o intuito de corrigir a variabilidade criada. Desta forma os tratamentos aplicados foram: 0+80; 15+80; 30+80; 45+80 e $60+80 \text{ kg N ha}^{-1}$.

O segundo procedimento utilizado foi denominado de “algoritmo”. Esse procedimento foi desenvolvido a partir da adaptação do modelo proposto por Turra (2016). Definiu-se também para esse procedimento aplicado por meio do algoritmo as mesmas doses de N citadas acima (30 kg ha^{-1} na base + 80 kg ha^{-1} em cobertura), assim a o tratamento que recebeu 30 kg N ha^{-1} na base foi adotado como o balizador para a aplicação de N no estágio da sexta folha via algoritmo. Esse mesmo tratamento recebeu a dose em cobertura de 80 kg N ha^{-1} (sexta folha), assim as doses menores e maiores que 30 kg N ha^{-1} (0, 15 e 45, 60 kg N ha^{-1}), respectivamente, foram adubadas em função do algoritmo.

A forma utilizada pelo algoritmo para definir a dose de N em cobertura a ser aplicada foi:

$$\text{Dose de N recomendada} = 132 * (\Delta \text{ NDVI}) + 80$$

Onde: 132 = é um coeficiente extraído da fórmula apresentada na Figura 2, Δ de NDVI = NDVI do tratamento balizador (30 kg N ha^{-1}) – NDVI das parcelas a serem aplicadas ($0, 15, 45$ e 60 kg N ha^{-1}) e 80 = dose padrão recomendada pelo Manual de Adubação e Calagem para o RS e SC (Comissão..., 2016).

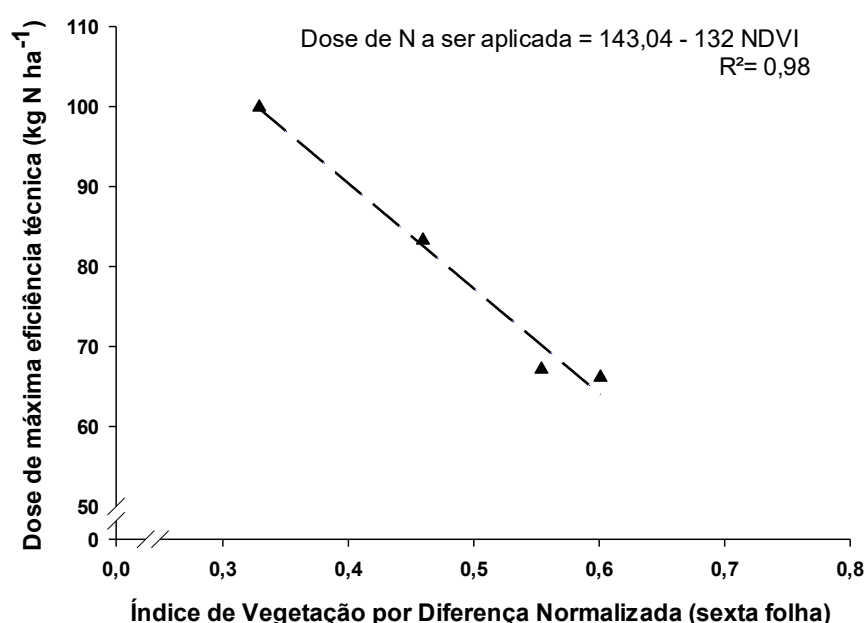


FIGURA 2. Algoritmo de aplicação de nitrogênio na cultura do trigo, proposto por Turra (2016), no estágio de seis folhas completamente expandidas.

Para todas as áreas experimentais foi utilizada a densidade de semeadura de 300 sementes aptas m^{-2} . A semeadura foi realizada na primeira semana de junho, sendo cada parcela constituída de 10 linhas de 3 metros de comprimento, espaçadas em 0,17 m. Os tratos culturais foram realizados segundo as indicações técnicas da cultura do trigo (Reunião, 2017). Baseando-se na análise de solo das áreas experimentais, a adubação de base foi de 150 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 150 kg ha^{-1} de K_2O .

3.2.4 Avaliações

3.2.4.1 Rendimento de biomassa na parte aérea

No momento da aplicação das doses de N em cobertura, foi realizado corte de biomassa da parte aérea dos tratamentos, sendo amostrada área de três linhas com 0,5 m de comprimento, perfazendo 0,25 m².

3.2.4.2 Rendimento de grãos

O rendimento de grãos foi quantificado pela colheita da área útil da parcela, constituída das oito linhas centrais com dois metros de comprimento, perfazendo 2,72 m². Após a trilha, a massa de grãos de cada parcela foi corrigida para a umidade de 130 g kg⁻¹, sendo o valor extrapolado para kg ha⁻¹.

3.2.4.3 Eficiência de uso do nitrogênio

Os procedimentos de adubação foram avaliados quanto à eficiência do uso do N de duas maneiras. Na primeira forma, foi realizada avaliação do uso do N, por meio da seguinte fórmula: $\text{Uso do N} = \text{Rendimento de grãos} / \text{Dose de N aplicado}$. A segunda forma de avaliação foi a Eficiência Agronômica do N, por meio da seguinte fórmula: $\text{Eficiência Agronômica do N} = (\text{RGa} - \text{RGna}) / (\text{QNa})$, sendo que RGa refere-se ao rendimento de grãos com adubação, RGna refere-se ao rendimento de grãos sem adubação e QNa refere-se à quantidade de N aplicado, em kg ha⁻¹ (Beche *et al.*, 2014; Todeschini *et al.*, 2016).

3.2.4.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo Teste F, com auxílio do pacote estatístico SASTM (Statistical Analysis System - SAS 8.0). Para as variáveis analisadas, se procedeu a análise de variância. Outra análise que foi realizada quando houve significância na ANOVA, foi realizada a comparação de médias pelo teste de Tukey, ao nível de $p < 0,10$ para o rendimento de biomassa seca da parte aérea e ao nível de $p < 0,05$ para o rendimento de grãos.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Biomassa seca da parte aérea

A biomassa da parte aérea foi coletada quando as plantas atingiram o estágio da sexta folha completamente expandida, ou seja, no momento da aplicação das doses de N em cobertura.

Os diferentes tratamentos utilizados na base foram utilizados no intuito de gerar variabilidade espacial no crescimento das plantas, para posteriormente, no estágio da sexta folha, corrigir essa variabilidade, utilizando doses variadas de N a partir dos dois procedimentos de adubação (PADRÃO e algoritmo). Ressalta-se que, neste estágio, os procedimentos de aplicação de N em cobertura (PADRÃO e o Algoritmo) ainda não haviam sido aplicadas. Houve variação de produção de biomassa seca na parte aérea de 400 até 1200 kg ha⁻¹ na EEA - UFRGS, de 260 até 600 kg ha⁻¹ na Embrapa Trigo, de 350 até 650 kg ha⁻¹ na SETREM, para ambas as cultivares (BRS Parrudo e TBIO Sossego) (Figura 3 A, C e E, respectivamente).

Com a criação da variabilidade espacial de biomassa na parte aérea e com a aplicação de N em cobertura, realizou-se nova coleta de biomassa no estágio do florescimento, período esse que ocorre o máximo de acúmulo de biomassa pela cultura e também o máximo de absorção de nutrientes (Von-Pinho *et al.*, 2009; De Bona *et al.*, 2016).

Observou-se que, de modo geral, o algoritmo e a dose PADRÃO foram eficientes em incrementar a biomassa da parte aérea nas doses que receberam as menores doses na emergência (base) em relação aos tratamentos que receberam as maiores doses de N na emergência. Houve variação de produção de biomassa seca na parte aérea de 1296 até 5537 kg ha⁻¹ na EEA-UFRGS, de 3295 até 6231 kg ha⁻¹ na Embrapa Trigo, de 3011 até 6586 kg ha⁻¹ na SETREM, para ambas as cultivares (BRS Parrudo e TBIO Sossego) (Figura 3 B, D e F, respectivamente).

Com a maior disponibilidade de N no solo, maior será a absorção e acúmulo no tecido foliar e maior a produção de biomassa da parte aérea, pois o N é um dos nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas. Esse comportamento crescente da biomassa da parte aérea em função da maior disponibilidade de N foi observado por diversos autores (Povh, 2007; Heege *et al.*, 2008; Mistele & Schmidhalter, 2008; Fitzgerald *et al.*, 2010; Fu *et al.*, 2014; Sharma *et al.*, 2015; Turra, 2016; Colaço & Bramley, 2018; Frels *et al.*, 2018).

A variabilidade da produção de biomassa no estágio de seis folhas completamente expandidas tem efeito direto nos valores de NDVI. O aumento dos valores de NDVI em função do maior acúmulo de biomassa na parte aérea deve-se à maior disponibilidade de N, resultando no aumento da quantidade de moléculas de clorofila nas folhas. Quanto maior o acúmulo de biomassa

fotossinteticamente ativa, maior é a reflectância da radiação no infravermelho próximo e menor é a reflectância no vermelho, ocorrendo aumento no NDVI (Smith *et al.*, 2017).

Turra (2016) avaliou duas cultivares de trigo (TBIO Quartzo e TBIO Sintonia), verificando elevados coeficientes de determinação entre NDVI e biomassa, sendo que o aumento na produção de biomassa se refletiu em incrementos lineares no valor de NDVI. Diversos autores encontraram variação na produção de biomassa para as culturas do trigo e do milho (Chen *et al.* 2010; Yao *et al.* 2010; Erdle *et al.* 2011; Chim *et al.* 2017; Zhao *et al.* 2018; Wang *et al.* 2018). Povh *et al.* (2008), encontraram elevados coeficientes de determinação, superiores a 0,83, entre NDVI e biomassa da parte aérea de trigo. Assim, o NDVI medido por sensor de vegetação é preciso para diferenciar, no estágio de seis folhas completamente expandidas, diferentes condições de desenvolvimento da cultura proporcionadas pela variação na disponibilidade de N na emergência das plantas.

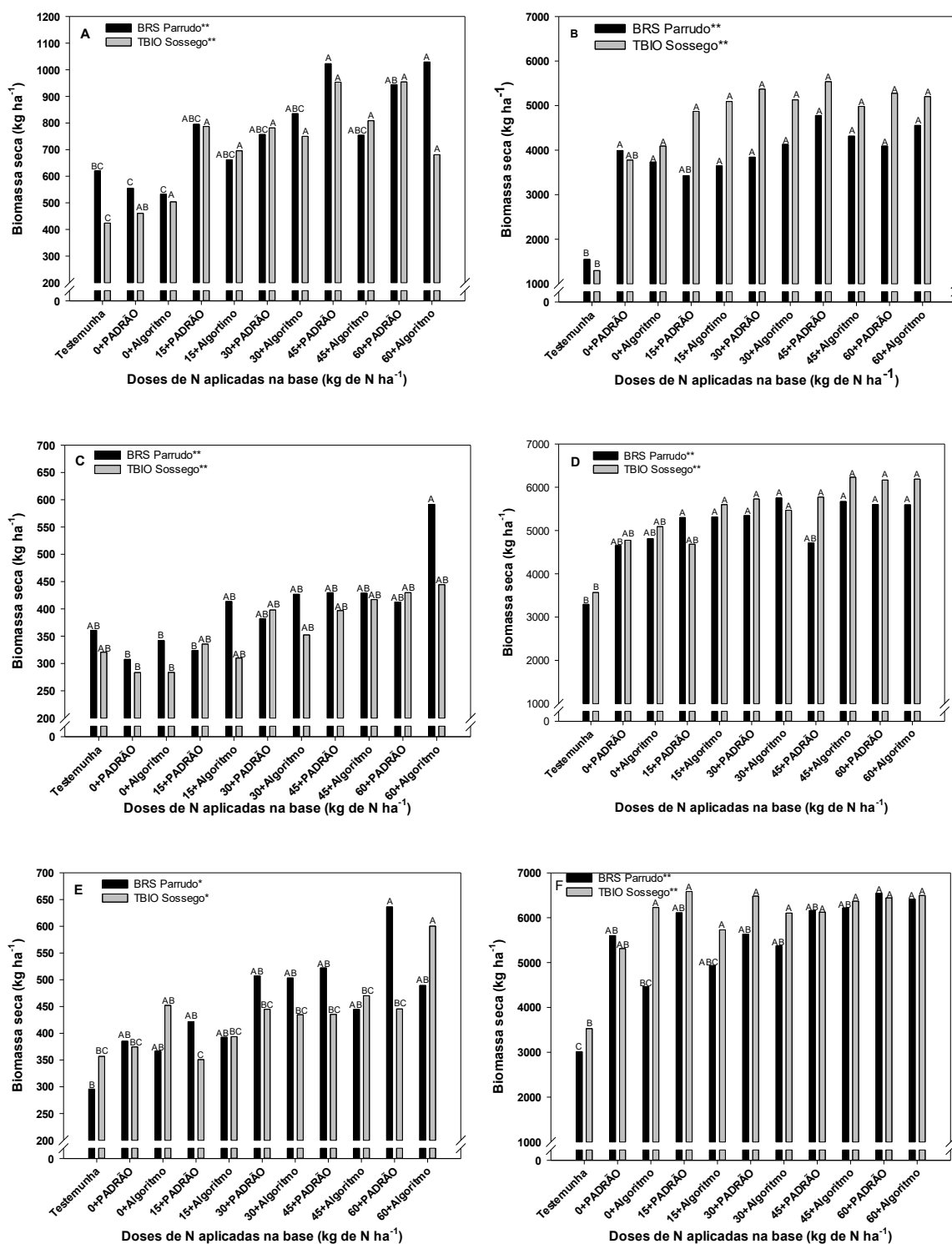


FIGURA 3. Biomassa da parte aérea no estágio de seis folhas expandidas (A), (C) e (E) e no florescimento (B), (D) e (F), na EEA-UFRGS, Embrapa Trigo e SETREM, respectivamente. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada cultivar pelo teste de Tukey, a $p < 0,10$ de probabilidade. * Significativo a $p < 0,10$; ** Significativo a $p < 0,01$.

Os maiores incrementos no NDVI ocorrem principalmente nos estádios iniciais de desenvolvimento, quando a biomassa da parte aérea é pequena e a cobertura do solo pela cultura ainda são baixas.

Para o NDVI nas duas cultivares avaliadas (BRS Parrudo e TBIO Sossego), observa-se que, quando as plantas não receberam aplicação de N na base, estas apresentaram menor valor de NDVI em relação aos tratamentos que receberam adubação nitrogenada neste momento. A variabilidade encontrada para os valores de NDVI foi elevada para ambas as cultivares e também para os locais (Tabela 4).

Apesar de ser ainda bastante cedo (estádio de seis folhas expandidas), constatou-se que o NDVI foi eficiente em quantificar diferenças do desenvolvimento das plantas frente às diferentes doses de N aplicadas por ocasião da emergência das plantas. Estes distintos acréscimos de NDVI para cada cultivar e local ocorreu devido aos diferentes incrementos de biomassa seca da parte aérea observados em cada cultivar, em função da aplicação de doses crescentes de N na base, o que proporcionou incrementos no valor de NDVI avaliados no estágio de seis folhas expandidas.

TABELA 4. Valores de NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) no estágio de seis folhas completamente expandidas, para as cultivares de trigo BRS Parrudo e TBIO Sossego, para os diferentes procedimentos de adubação em cobertura.

		Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI			
Cultivar	Procedimento de adubação	Doses de N aplicadas na base	EEA/UFRGS	SETREM	Embrapa Trigo
BRS Parrudo	Testemunha ¹	0	0,51	0,33	0,43
		0	0,51	0,34	0,42
	Algoritmo ²	15	0,61	0,40	0,46
		30	0,66	0,41	0,49
		45	0,65	0,43	0,50
		60	0,69	0,43	0,52
		60	0,69	0,43	0,52
	PADRÃO ³	0	0,54	0,34	0,43
		15	0,60	0,39	0,47
		30	0,65	0,39	0,47
		45	0,66	0,42	0,48
		60	0,68	0,45	0,53
		60	0,68	0,45	0,53
		60	0,68	0,45	0,53
	TBIO Sossego	Testemunha ¹	0	0,45	0,30
0			0,53	0,33	0,38
Algoritmo ²		15	0,58	0,35	0,42
		30	0,67	0,40	0,46
		45	0,68	0,39	0,44
		60	0,67	0,41	0,50
		60	0,67	0,41	0,50
PADRÃO ³		0	0,50	0,32	0,40
		15	0,63	0,37	0,42
		30	0,64	0,36	0,47
		45	0,69	0,38	0,45
		60	0,73	0,36	0,51
	60	0,73	0,36	0,51	

¹ Procedimento onde não houve adubação nitrogenada; ² Procedimento de adubação seguindo a recomendação do algoritmo; ³ Procedimento de adubação segundo o manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Comissão..., 2016).

A variação encontrada de produção de biomassa relaciona-se diretamente com as variações dos valores de NDVI. De posse destas informações e seguindo o procedimento proposto para realizar a adubação nitrogenada em taxa variada, a partir do modelo adaptado de Turra (2016), define-se que as plantas que acumulam

pouca biomassa até a sexta folha, irão apresentar maior demanda por N, sendo que, quando as plantas apresentarem alto acúmulo de biomassa no estágio da sexta folha, as plantas demandaram menos N.

3.3.2 Rendimento de grãos

As três áreas utilizadas na safra agrícola de 2017 apresentaram produção de grãos acima de 3100 kg ha⁻¹, para ambas as cultivares. O rendimento de grãos obtidos na EEA – UFRGS não apresentou diferença significativa entre os métodos de adubação (algoritmo e PADRÃO) para a cultivar TBIO Sossego, porém a cultivar BRS Parrudo apresentou diferença significativa entre os métodos de adubação, sendo o algoritmo aquele que apresentou maior rendimento de grãos (Tabela 5). No experimento conduzido em Três de Maio (RS), não houve diferença significativa para os métodos de adubação para ambas as cultivares (Tabela 6).

O experimento conduzido na área da Embrapa Trigo apresentou rendimento de grãos acima de 4000 kg ha⁻¹ quando recebeu adubação na cobertura. A cultivar TBIO Sossego não apresentou diferença significativa entre os métodos de adubação. A cultivar BRS Parrudo apresentou diferença significativa entre os métodos de adubação, sendo que o algoritmo apresentou o maior rendimento de grãos quando comparado com o método tradicional PADRÃO (Tabela 7).

TABELA 5. Rendimento de grãos, dose de N total, uso do nitrogênio e eficiência do uso do N (EUN) de cultivares de trigo nos diferentes procedimentos de adubação em cobertura na EEA – UFRGS.

Cultivar	Procedimento de adubação	Dose de base ¹	Dose de cobertura ²	Dose total de N ³	Rendimento de grãos	Uso do N ⁴	EUN ⁵	
BRS Parrudo	Testemunha	0	0	0	1751	-	-	
	Algoritmo	0	100	100	3676	36,6	19,3	
		15	87	102	3629	35,6	18,4	
		30	80	110	3557	35,3	17,7	
		45	78	123	3935	32,0	17,8	
		60	76	136	3728	27,4	14,5	
		0	80	80	3430	42,9	21,0	
	PADRÃO	15	80	95	3527	37,1	18,7	
		30	80	110	3426	31,1	15,2	
		45	80	125	3651	29,2	15,2	
		60	80	140	3656	26,1	13,6	
		Testemunha	0	0	0	1437	-	-
	TBIO Sossego	Algoritmo	0	97	97	3512	36,2	21,4
			15	90	105	3995	38,1	24,4
30			80	110	3928	35,7	22,6	
45			76	121	4119	34,0	22,2	
60			77	137	4463	32,6	21,6	
0			80	80	3812	47,7	29,7	
PADRÃO		15	80	95	3781	39,8	24,7	
		30	80	110	4176	38,0	24,9	
		45	80	125	4214	33,7	22,2	
		60	80	140	4238	30,3	20,0	
		Testemunha	0	0	0	1437	-	-
Média dos tratamentos								
Cultivar	Procedimento de adubação	Dose de base ¹	Dose de cobertura ²	Dose total de N ³	Rendimento de grãos	Uso do N ⁴	EUN ⁵	
BRS Parrudo	Testemunha	-	0	0,0	1751 C	-	-	
	Algoritmo	-	84,2	112,8	3705 A	33,4	17,5	
	PADRÃO	-	80,0	110,0	3538 B	33,3	16,7	
TBIO Sossego	Testemunha	-	0	0,0	1437 B	-	-	
	Algoritmo	-	84,0	114,0	4003 A	35,3	22,4	
	PADRÃO	-	80,0	110,0	4045 A	37,9	24,3	

Letras maiúsculas são comparadas entre a mesma cultivar, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ¹Dose de N aplicada na emergência; ² Dose de N aplicada em cobertura, em função do procedimento de adubação; ³ Dose total de N aplicado por tratamento (base+cobertura); ⁴ EUN = Uso do N = (kg de grão/kg de N); ⁵ EUN = Eficiência do uso do N.

As variáveis de uso do N e eficiência do uso do N, analisadas para ambas as cultivares e nas três áreas experimentais, não apresentaram diferença significativa quando comparadas os dois procedimentos de aplicação de N. Porém, quando se avalia as diferentes doses de N aplicadas na emergência, observa-se que a associação das maiores doses de N na base com as doses de N aplicadas em cobertura, resulta em redução do Uso do N e da EUN. Resultados semelhantes foram encontrados por diversos autores para a cultura do milho e arroz (Sangoi *et al.*, 2015; Mota *et al.*, 2015; Freitas, 2007). Esses resultados estão de acordo com a Lei de Mitscherlich, pois, quando se aplicam doses crescentes de um nutriente, o aumento no rendimento de grãos é elevado inicialmente, mas decresce posteriormente (Rajj, 2011).

A disponibilidade de nitrogênio tem grande influência sobre os componentes do rendimento, os quais possuem papel fundamental na formação do rendimento final de grãos. A oferta inicial de N no início do desenvolvimento vegetativo tem grande importância em estimular a emissão e sobrevivência dos afixhos no período inicial de desenvolvimento da cultura do trigo, refletindo-se em maior número de espigas por unidade de área por ocasião da colheita (Zagonel *et al.*, 2002; Turra, 2016).

TABELA 6. Rendimento de grãos, dose de N total, uso do nitrogênio e eficiência do uso do N (EUN) de cultivares de trigo nos diferentes procedimentos de adubação em cobertura na SETREM.

Cultivar	Procedimento de adubação	Dose de base ¹	Dose de cobertura ²	Dose total de N ³	Rendimento de grãos	Uso do N ⁴	EUN ⁵	
BRS Parrudo	Testemunha	0	0	0	1656	-	-	
	Algoritmo	0	89	89	3119	35,0	16,4	
		15	81	96	3187	33,1	15,9	
		30	80	110	3115	28,3	13,3	
		45	77	122	2901	23,7	10,2	
		60	77	137	3225	23,5	11,4	
		PADRÃO	0	80	80	3062	38,3	17,6
	PADRÃO	15	80	95	3220	33,9	16,5	
		30	80	110	3379	30,7	15,7	
		45	80	125	3276	26,2	13,0	
		60	80	140	3306	23,6	11,8	
		Testemunha	0	0	0	1964	-	-
	TBIO Sossego	Algoritmo	0	89	89	3081	34,5	12,5
			15	86	101	3284	32,5	13,1
30			80	110	3101	28,2	10,3	
45			81	126	3447	27,3	11,8	
60			78	138	3219	23,2	9,1	
PADRÃO			0	80	80	3094	38,7	14,1
PADRÃO		15	80	95	3304	34,8	14,1	
		30	80	110	3255	29,6	11,7	
		45	80	125	3340	26,7	11,0	
		60	80	140	3144	22,5	8,4	
Média dos tratamentos								
Cultivar	Procedimento de adubação	Dose de base ¹	Dose de cobertura ²	Dose total de N ³	Rendimento de grãos	Uso do N ⁴	EUN ⁵	
BRS Parrudo	Testemunha	-	0	0	1656 B	-	-	
	Algoritmo	-	81	111	3109 A	28,7	13,4	
	PADRÃO	-	80	110	3249 A	30,5	14,9	
TBIO Sossego	Testemunha	-	0	0	1964 B	-	-	
	Algoritmo	-	83	113	3226 A	29,1	11,3	
	PADRÃO	-	80	110	3227 A	30,4	11,9	

Letras maiúsculas são comparadas entre a mesma cultivar, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ¹Dose de N aplicada na emergência; ² Dose de N aplicada em cobertura, em função do procedimento de adubação; ³ Dose total de N aplicado por tratamento (base+cobertura); ⁴ EUN = Uso do N = (kg de grão/kg de N); ⁵ EUN = Eficiência do uso do N.

Analisando as doses de N recomendadas pelo método PADRÃO e pelo algoritmo, observou-se que não houve diferença entre as doses recomendadas em cobertura e na dose total. Para a RHACT 2 (EEA/UFRGS e SETREM), a dose recomendada em cobertura pela (Comissão..., 2016), foi de 80 kg N ha⁻¹. Para a RHACT 1 (Embrapa Trigo), a dose recomendada em cobertura pela (Comissão..., 2016) foi de 100 kg N ha⁻¹. Essas doses de N em cobertura foram redistribuídas de maneira adequada na área, aplicando-se as maiores doses de N nas parcelas que haviam recebido as menores doses de N na base (emergência), como pode ser visto nas Tabelas 5, 6 e 7. O procedimento de adubação PADRÃO recomendou dose fixa de 80 kg N ha⁻¹ para a RHACT 2 (EEA/UFRGS e SETREM) e a dose de 100 kg N ha⁻¹ para a RHACT 1 (Embrapa Trigo), seguindo a recomendação da Comissão..., 2016.

De modo geral, observa-se que, para ambas cultivares e para os três ambientes de produção, não houve diferença significativa nas doses recomendadas pelo procedimento PADRÃO e aquelas prescritas pelo algoritmo. O algoritmo utilizado apresentou adequada redistribuição das doses de N entre as doses de N utilizadas na semeadura (0 e 15 kg N ha⁻¹), aumentando as doses para os tratamentos que apresentaram maior demanda nutricional, bem como reduzindo as doses recomendadas para os tratamentos (45 e 60 kg N ha⁻¹) que demandaram doses menores.

TABELA 7. Rendimento de grãos, dose de N total, uso do nitrogênio e eficiência do uso do N (EUN) para produção de grãos de cultivares de trigo nos diferentes procedimentos de adubação em cobertura na Embrapa Trigo.

Cultivar	Procedimento de adubação	Dose de base ¹	Dose de cobertura ²	Dose total de N ³	Rendimento de grãos	Uso do N ⁴	EUN ⁵	
BRS Parrudo	Testemunha	0	0	0	2429	-	-	
	Algoritmo	0	110	110	4053	37,1	14,9	
		15	103	119	4232	35,6	15,2	
		30	100	130	4158	32,0	13,3	
		45	99	144	3909	27,2	10,3	
		60	96	156	4235	27,1	11,5	
	PADRÃO	0	100	100	4021	40,2	15,9	
		15	100	115	4026	35,0	13,9	
		30	100	130	4099	31,5	12,8	
		45	100	145	4062	28,0	11,3	
		60	100	160	4080	25,5	10,3	
	TBIO Sossego	Testemunha	0	0	0	2573	-	-
		Algoritmo	0	111	111	3812	34,5	11,2
			15	105	120	3997	33,3	11,8
			30	100	130	4090	31,5	11,7
45			103	148	4138	28,0	10,6	
60			95	155	4366	28,2	11,6	
PADRÃO		0	100	100	3869	38,7	13,0	
		15	100	115	4015	34,9	12,5	
		30	100	130	4384	33,7	13,9	
		45	100	145	4277	29,5	11,7	
		60	100	160	4151	25,9	9,9	
Média dos tratamentos								
Cultivar		Método de adubação	Dose de base ¹	Dose de cobertura ²	Dose total de N ³	Rendimento de grãos	Uso do N ⁴	EUN ⁵
BRS Parrudo		Testemunha	-	0	0,0	2429 C	-	-
		Algoritmo	-	102	132	4117 A	31,8	13,0
	PADRÃO	-	100	130	4058 B	32,1	12,8	
TBIO Sossego	Testemunha	-	0	0,0	2573 B	-	-	
	Algoritmo	-	103	133	4080 A	31,1	11,4	
	PADRÃO	-	100	130	4139 A	32,6	12,2	

Letras maiúsculas são comparadas entre a mesma cultivar, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ¹Dose de N aplicada na emergência; ² Dose de N aplicada em cobertura, em função do procedimento de adubação; ³ Dose total de N aplicado por tratamento

(base+cobertura); ⁴ EUN = Uso do N = (kg de grão/kg de N); ⁵ EUN = Eficiência do uso do N.

Quanto mais elevado for o NDVI no momento de aplicação de N em cobertura (sexta folha), o que indica maior biomassa e acúmulo de N na parte aérea, menor será a resposta à aplicação de N em cobertura e menores serão as doses de N a serem aplicadas. Segundo Lamothe (1994), quando elevadas quantidades de N forem absorvidas até o final do afilhamento, as plantas pouco responderão à adição de adubo nitrogenado em cobertura. Essa resposta de aplicação foi encontrada com a utilização do algoritmo, pois, quando houve elevada quantidade de N disponibilizada no início do desenvolvimento da cultura, as plantas demandaram doses de N próximas à PADRÃO (80 kg N ha⁻¹). Welsh *et al.* (2003) concluíram que as estratégias mais eficientes de aplicação de N em taxa variável para cevada e trigo de inverno foram relacionadas à aplicação de maiores doses de N em áreas de baixa densidade de colmos. Desta maneira, torna-se fundamental avaliar a variabilidade da biomassa e da quantidade de N acumulada, para aperfeiçoar a aplicação de N em cobertura em taxa variável, com doses condizentes com a real necessidade das plantas em diferentes áreas de uma lavoura.

Assim, os valores de NDVI, avaliados por sensores ópticos ativos, podem ser utilizados a fim de detectar os níveis de desenvolvimento e o estado nutricional da cultura em relação ao N. Desta forma, utilizou-se o valor do NDVI para ajustar as doses aplicadas de N conforme as condições específicas variáveis dentro de um determinado talhão. Com isso, as doses recomendadas seriam mais condizentes

com a real demanda das plantas, evitando-se a aplicação de excesso do nutriente, caso fosse feita a aplicação a taxas uniformes ou fixas.

A falta de resposta do rendimento de grãos para os diferentes procedimentos de aplicação de N em cobertura está provavelmente relacionada à cultura antecessora, a qual foi soja. Como a cultura da soja apresenta fixação de N no sistema via fixação biológica e também por ser leguminosa, a mesma apresenta baixa relação C/N. Desta forma, a decomposição do material vegetal é rápida, liberando os nutrientes (macro e micronutrientes) para o solo, o que favorece o desenvolvimento inicial da cultura do trigo.

3.4 CONCLUSÃO

A variabilidade no desenvolvimento das plantas (biomassa da parte aérea) no início do desenvolvimento do trigo, foi influenciado pelas doses de N e da safra anterior, que foi cultivada com a soja.

O algoritmo desenvolvido prescreveu doses iguais ou maiores de N em relação ao procedimento PADRÃO. O rendimento de grãos do algoritmo foi igual ou superior ao procedimento PADRÃO. As doses de N recomendadas pelos dois procedimentos não apresentaram muita variação devido ao cultivo de trigo após a soja.

O algoritmo adaptado e validado com valores de NDVI pode ser utilizado para a adubação nitrogenada em taxa variável, permitindo melhor redistribuição e ajuste da dose de N conforme a demanda nutricional da cultura em diferentes áreas da lavoura.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASSO, B. et al. A strategic and tactical management approach to select optimal N fertilizer rates for wheat in a spatially variable field. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.35, p.215-222, 2011.

BECHE, E. et al. Eficiência de uso de nitrogênio em cultivares de trigo pioneiras e modernas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.49, p.948-957, 2014.

BERGAMASCHI, H. et al. **Clima da Estação Experimental da UFRGS e região de abrangência**. Porto Alegre: UFRGS, 2003, 78 p.

BREDEMEIER, C. VIAN, A.L.; PIRES, J.L.F. Aplicação de nitrogênio em tempo real: modelos e aplicações. In: SANTI, A. L. et al. **Agricultura de Precisão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: CESPOL, 2016. cap.7, p.138-158.

CHAVARRIA G. et al. Regulador de crescimento em plantas de trigo: reflexos sobre o desenvolvimento vegetativo, rendimento e qualidade de grãos. **Revista Ceres**, Viçosa, v.62, p.583-588, 2015.

CHEN, X. et al. Producing more grain with lower environmental costs. **Nature**, London, v.514, p.486-4894, 2014.

CHIM, B.K. et al. In-season decision support tools for estimating sidedress nitrogen rates for corn in the Mid-Atlantic Coastal Plain. **Journal of Plant Nutrition**, London, v.40, p.2818-2828, 2017.

COLAÇO, A.F.; BRAMLEY, R.G.V. Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops?. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.218, p.126-140, 2018.

DE BONA, F.D.; DE MORI, C.; WIETHÖLTER, S. Manejo nutricional da cultura do trigo. **Informações Agrônomicas - IPNI**, Piracicaba, n.15, 2016.

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

FITZGERALD, G.J.; RODRIGUEZ, D.; O'LEARY, G. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index: the canopy chlorophyll content index (CCCI). **Field Crop Research**, Amsterdam, v.116, p.318-324, 2010.

FREITAS, T.F.S. **Densidade de semeadura e adubação nitrogenada em cobertura na época de semeadura tardia de arroz irrigado**. 2007. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

FRELS, K. et al. Evaluating canopy spectral reflectance vegetation indices to estimate nitrogen use traits in hard winter wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.217, p.82-92, 2018.

FU, Y. et al. Winter wheat biomass estimation based on spectral indices, band depth analysis and partial least squares regression using hyperspectral measurements. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v.100, p.51-59, 2014.

HEEGE, H.J.; REUSCH, S.; THIESSEN, E. Prospects and results for Optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.9, p.115-131, 2008.

INMAN, D. et al. Nitrogen uptake across site-specific management zones in irrigated maize production systems. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, p.169-176, 2005.

INMET. **Normais Climatológicas.** Disponível em:

<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>.

Acesso em: 26 fev. 2016.

IPAGRO. **Observações meteorológicas no estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: IPAGRO, 1979. 272 p. (Boletim Técnico, 3).

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

MAHAJAN, G.R. et al. Using hyperspectral remote sensing techniques to monitor nitrogen, phosphorus, sulphur and potassium in wheat (*Triticum aestivum* L.).

Precision Agriculture, Dordrecht, v.15, p.499-522, 2014.

MANTAI R. D. et al. The dynamics of relation oat panicle with grain yield by nitrogen.

American Journal of Plant Sciences, Irvine, v.7, p.17-27, 2016.

MISTELE, B., SCHMIDHALTER, U. Estimating the nitrogen nutrition index using spectral canopy reflectance measurements. **European Journal Agronomy**, Amsterdam, v.29, p.184–190, 2008.

MOTA, M.R. et al. Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.39, p.512-522, 2015.

POVH, F. P. **Utilização de sensor ótico ativo em culturas de cereais.** 2007. 86 f. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

POVH, F.P. et al. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais.

Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.43, p.1075-1083, 2008.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011.

420 p.

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

REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 10., 2016, Londrina. **Informações técnicas para trigo e triticales: safra 2017**.

Brasília: EMBRAPA, 2017. 240 p.

SANGOI, L. et al. Desempenho agrônômico do milho em razão do tratamento de sementes com *Azospirillum* sp. e da aplicação de doses de nitrogênio mineral.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.39, p.1141-1150, 2015.

SHARMA, L.K. et al. Active-optical sensors using red NDVI compared to red edge NDVI for prediction of corn grain yield in North Dakota, U.S.A. **Sensors**, Basel, v.15, p.27832–27853, 2015.

SINGH, S.K. et al. Assessment of growth, leaf N concentration and chlorophyll content of sweet sorghum using canopy reflectance. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.209, p.47–57, 2017.

SMITH, H.L.; MCAUSLAND, L.; MURCHIE, E.H. Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.68, p.2099- 2110, 2017.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. C. D. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER-RS, 2008. 222 p.

TODESCHINI, M.H. et al. Eficiência de uso do Nitrogênio em cultivares modernas de trigo. **Bragantia**, Campinas, v.75, p.351–361, 2016.

TURRA, M.A. **Manejo do nitrogênio em cultivares de trigo baseado no índice de vegetação por diferença normalizada (ndvi)**. 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

VON PINHO, R.G. et al. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.8, p.157-173, 2009.

WANG, L. et al. Nitrogen fertilization improved water-use efficiency of winter wheat through increasing water use during vegetative rather than grain filling. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.197, p.41-53, 2018.

WELSH, J.P. et al. Developing strategies for spatially variable nitrogen application in cereals. Part I: Winter barley. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v.84, p.481-494, 2003.

WREGE, M.S. et al. **Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 336 p.

YAO, X. et al. Exploring hyperspectral bands and estimation indices for leaf nitrogen Accumulation in wheat. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v.12, p.89-100, 2010.

ZAGONEL, J. et al. Doses de nitrogênio e densidade de plantas com e sem um regulador de crescimento afetando o trigo, cultivar OR-1. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, p.25-29, 2002.

ZHAO, B. et al. Exploring new spectral bands and vegetation indices for estimating nitrogen nutrition index of summer maize. **European Journal Agronomy**, Amsterdam, v.93, p.113–125, 2018.

4 CAPÍTULO II

DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO PARA A ADUBAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA À TAXA VARIADA EM MILHO UTILIZANDO SENSORES DE VEGETAÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

O alto potencial produtivo da cultura do milho é definido a partir da interação do ambiente de produção, genótipos e práticas de manejo. Entre as principais práticas de manejo está a adubação nitrogenada. O nitrogênio (N) é constituinte do metabolismo vegetal, como clorofilas (relação direta com a fotossíntese) e sua adequada disponibilidade às plantas reflete-se diretamente no rendimento grãos (Ciampitti & Vyn, 2012). Desta forma, as práticas de manejo que conferem maior disponibilidade de N para a cultura e aumentem a eficiência do uso do deste nutriente, são de fundamental importância (Portz *et al.*, 2012; Ciampitti & Vyn, 2013). O incremento da EUN pela cultura do milho confere um menor risco de contaminação do meio ambiente, devido à redução das perdas de N. Atualmente os maiores custos de produção são referentes a semente e a adubação nitrogenada.

Para incrementar a eficiência do uso do nitrogênio (EUN) na cultura do milho e o rendimento de grãos, alguns algoritmos para adubação nitrogenada em cobertura e a taxa variada foram desenvolvidos nos Estados Unidos, Europa e, recentemente, no Brasil. Os algoritmos e modelos foram desenvolvidos para os cereais de inverno e milho, para prescrever doses de N em cobertura utilizando sensores de vegetação (Varvel *et al.*, 2007; Dellinger *et al.*, 2008; Tubaña *et al.*, 2008; Holland & Schepers, 2010; Kitchen *et al.*, 2010; Barker & Sawyer, 2010; Solari *et al.*, 2010; Shiratsuchi *et al.*, 2010; Shiratsuchi *et al.*, 2014; Tagarakis & Ketterings, 2018). Entretanto, necessita-se desenvolver algoritmos por meio de sensores de

vegetação, na região de cultivo da cultura, considerando as condições edafoclimáticas, possibilitando ajustar com maior precisão as doses de N a ser aplicada na cultura do milho.

Desta forma, a utilização dos sensores ativos de dossel, os quais são ferramentas utilizadas na agricultura de precisão para realizar adubação nitrogenada em cobertura à taxa variada e em tempo real tem a finalidade de redistribuir adequadamente as quantidades de fertilizantes nitrogenados, aplicando conforme a demanda da cultura e promovendo o incremento no rendimento de grãos e ou redução no custo de produção (Raun *et al.*, 2005; Thompson *et al.*, 2015; Tagarakis & Ketterings, 2018).

Com a utilização dos sensores ativos de dossel, torna-se necessário o desenvolvimento de algoritmos com aplicação regionalizada, os quais consideram a variabilidade espacial do desenvolvimento das plantas ao longo do talhão (Shanahan *et al.*, 2008; Roberts *et al.*, 2010; Bredemeier *et al.*, 2016). A utilização de sensores de vegetação permite identificar as diferenças entre as plantas, expressando em índices de vegetação, os quais apresentam relação significativa em caracterizar o potencial produtivo da cultura (Crain *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2013; Bushong *et al.*, 2016).

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um algoritmo para indicação de adubação nitrogenada em cobertura e à taxa variada na cultura do milho nas condições edafoclimáticas de Eldorado do Sul (RS).

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Caracterização do local de execução dos experimentos

O trabalho de campo foi conduzido na Estação Experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), na safra agrícola de 2016/2017. A EEA/UFRGS está localizada no município de Eldorado do Sul (RS), na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul (RS). O clima é subtropical de verão úmido quente, do tipo Cfa, conforme a classificação de Koppen (IPAGRO, 1979), com altitude média de 46 metros acima do nível do mar.

A precipitação pluvial média anual em Eldorado do Sul é de 1.440 mm e a temperatura média mensal do ar varia entre 14 e 25°C, entre os meses mais frios e mais quentes (Bergamaschi *et al.*, 2003). O solo da área experimental pertence à unidade de mapeamento São Jerônimo, caracterizado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck *et al.*, 2008).

Antes da instalação do experimento, foram retiradas amostras de solo na área de estudo, na camada entre as profundidades de 0-20 cm, no ano de 2015. As amostras foram analisadas pelo Laboratório de Análises de Solos da UFRGS e os resultados são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Características físicas e químicas das amostras de solo das áreas experimentais antes da instalação dos experimentos. EEA/UFRGS, no ano 2015.

EEA/UFRGS – Eldorado do Sul, RS									
Ano	Argila	pH	P	K	MO ¹	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	V ²
	%	H ₂ O	---- mg dm ⁻³ --	--	g kg ⁻¹	----- cmol _c dm ⁻³ -----	-----	-----	%
2015	27	5,6	20	165	21	0	4,3	1,9	71

¹ MO = matéria orgânica; ² V = saturação de bases.

4.2.2 Metodologia para o desenvolvimento do algoritmo para a safra agrícola 2016/2017

Os tratamentos foram alocados no delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos receberam adubação de cobertura no estágio V9 (nove folhas completamente expandidas) (Ritchie *et al.*, 1993).

Com o intuito de gerar variabilidade e de calibrar o algoritmo, foram utilizados nove tratamentos, sendo diferentes doses de nitrogênio (0, 25, 50, 75, 100 e 150 kg N ha⁻¹) aplicados no estágio V3 e que receberam adubação em cobertura pelo algoritmo no estágio V9, um tratamento que não recebeu nitrogênio (testemunha negativa), a faixa rica (FR), que recebeu 250 kg N ha⁻¹ na emergência, e o tratamento denominado PADRÃO. O tratamento FR recebeu a dose de 250 kg N ha⁻¹ no estágio V3, com o objetivo de maximizar a disponibilidade de N e evitar a deficiência deste nutriente (Tabela 2). O tratamento denominado PADRÃO foi baseado na recomendação de adubação preconizada pelo Manual de Adubação e Calagem para RS e SC (Comissão..., 2016). Este tratamento consistiu na aplicação de 30 kg N ha⁻¹ na semeadura (formulação - NPK) e mais a dose recomendada pelo Manual de Adubação e Calagem para RS e SC (75 kg de N ha⁻¹), posteriormente, uma aplicação de N em cobertura, no estágio V9 (245 kg N ha⁻¹), totalizando dose total de 350 kg N ha⁻¹, considerando expectativa de rendimento de grãos de 18000 kg ha⁻¹, considerando a análise de solo.

TABELA 2. Lista de tratamentos com as diferentes doses de N aplicados na base (V3), doses de N em cobertura e dose de N total, utilizados no experimento conduzido na EEA - UFRGS. Safra agrícola 2016/2017.

Métodos de recomendação de N	Dose de N aplicada via fertilizante formulado (kg N ha ⁻¹)	Tratamentos aplicados na base (V3) (kg N ha ⁻¹) ¹	Dose de cobertura (V9) (kg N ha ⁻¹) ²	Dose total (kg N ha ⁻¹)
Algoritmo	30	0	250	280
	30	25	200	255
	30	50	200	280
	30	75	50	155
	30	100	50	180
	30	150	50	230
Faixa rica	30	250	0	280
PADRÃO	30	75	245	350
Testemunha	0	0	0	0

¹ As doses aplicadas na semeadura receberam fertilização de 30 kg N ha⁻¹, menos o tratamento de testemunha. ² Doses de N recomendadas via algoritmo e pela forma tradicional.

Segundo a recomendação de adubação nitrogenada para a cultura do milho, a dose de N que se utiliza em adubações de cobertura em lavouras irrigadas para uma expectativa de rendimento de grãos de 18000 kg ha⁻¹, é de 350 kg de N ha⁻¹ (Comissão..., 2016). A fonte de N utilizada nas aplicações foi super N.

No estágio vegetativo V9, foi realizada a adubação nitrogenada em cobertura, utilizando classes de índice de suficiência de N - ISN (Tabela 3), calculadas a partir dos valores de NDVI, as quais foram definidas a partir dos resultados obtidos por Vian (2015). O ISN foi obtido pela relação dos valores dos índices de vegetação dos tratamentos (0, 25, 50, 75, 100, 150 kg N ha⁻¹) dividido pelos valores dos índices de vegetação da faixa rica de N – FR (tratamento sem deficiência de nitrogênio). Os valores de ISN se apresentam em classes de suficiência de N, visando a realização da adubação de cobertura a taxa variável. Desta forma, o algoritmo proposto foi desenvolvido com base nesses dados, sendo

que todas as classes receberam adubação nitrogenada em V9 em tempo real e a taxa variável.

TABELA 3. Classes de suficiência de nitrogênio em milho entre as relações de NDVI das parcelas tratamentos com a faixa rica, em condição de irrigação.

Classe	Suficiência de N (Relação entre o NDVI dos tratamentos com a faixa rica)	Dose aplicada¹ (kg N ha⁻¹)
Classe C	< 0,97	250
Classe B	0,98 – 1,00	200
Classe A	> 1,00	50

¹ Dose definida a partir dos dados reportados por Vian (2015).

Para a condução do experimento foi utilizado o híbrido Morgan 30A77PW, semeado na densidade de 9 plantas m⁻². A semeadura foi realizada na primeira semana de setembro de 2016, sendo cada parcela constituída de 10 linhas de 8 metros de comprimento, espaçadas em 0,5 m. O experimento foi conduzido sob irrigação, quando necessário. As irrigações complementares foram realizadas com base no monitoramento da umidade volumétrica do solo, através do sensor Hidro Farm. Considerou-se a umidade volumétrica de 20 % como limite inferior, ou seja, efetuou-se a irrigação sempre que foi atingido este valor nos sensores. Foi utilizado o sistema de irrigação por aspersão. Os tratos culturais foram realizados segundo as indicações técnicas da cultura do milho (Reunião, 2013). Baseando-se na análise de solo da área experimental, a adubação de base definida foi de 30 kg de N ha⁻¹, 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O. A cultura antecessora foi aveia branca (*Avena sativa* L.).

4.2.3 Avaliação com os sensores de vegetação

As medições da reflectância do dossel vegetativo foram realizadas com os sensores ópticos ativos Greenseeker® e Crop Circle®, sendo quantificados os índices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e NDRE (Normalized Difference Red Edge Index), respectivamente. As leituras foram realizadas com o equipamento posicionado paralelamente às linhas da cultura, com 0,6 a 0,8 m acima do dossel (Figura 1), sendo avaliadas as linhas centrais no estágio vegetativo V9 (nove folhas completamente expandidas).

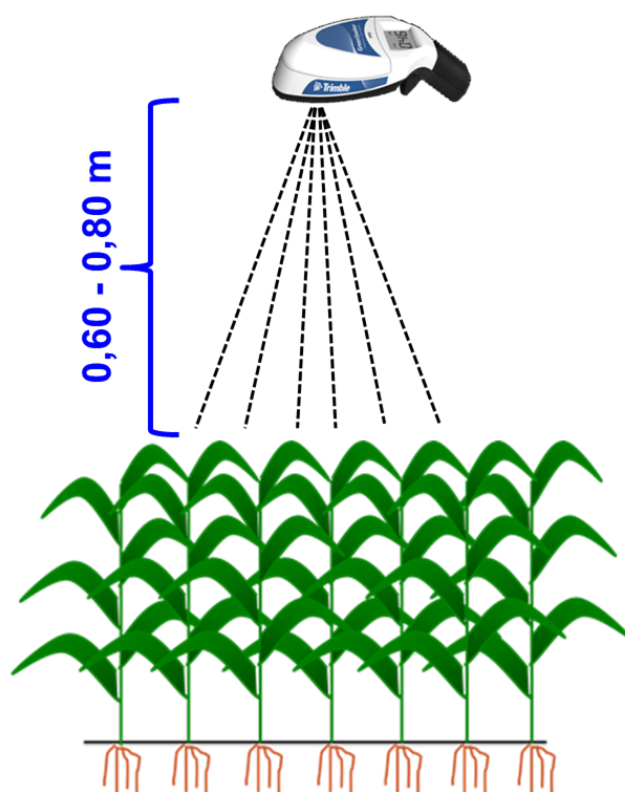


FIGURA 1. Orientação nadir de leitura dos índices de vegetação, obtidos pelos sensores Greenseeker e Crop Circle.

O NDVI foi calculado utilizando a seguinte fórmula: $NDVI = (IVP - V) / (IVP + V)$, onde V refere-se à reflectância na região do vermelho (680 nm) e IVP refere-se ao infravermelho próximo (770 nm). O NDRE foi calculado utilizando a seguinte

fórmula: $NDRE = (IVP-RE)/(IVP+RE)$, onde o RE refere-se à reflectância na região chamada de borda vermelha (Red Edge) (730 nm) e IVP refere-se ao infravermelho próximo (780 nm).

No momento da aplicação das doses de N em cobertura (Estádio V9), foi realizada amostragem de plantas para quantificação da biomassa seca da parte aérea nos tratamentos, em uma linha de semeadura com espaçamento de 0,45 m e com 0,5 m de comprimento, totalizando 0,22 m². Posteriormente, foi realizada a determinação dos teores de N no tecido vegetal, conforme descrito por Tedesco *et al.* (1995). A quantidade de N acumulado no tecido foi calculada pela multiplicação do teor de N (%) na parte aérea e da biomassa seca da parte aérea, sendo expresso em kg N ha⁻¹.

O rendimento de grãos foi avaliado pela colheita da área útil da parcela, constituída de quatro linhas centrais e com seis metros de comprimento, totalizando 12 m². Após a trilha, a massa de grãos de cada parcela foi pesada e corrigida para a umidade de 130 g kg⁻¹, sendo o valor extrapolado para kg ha⁻¹.

Por fim, foram realizadas duas avaliações para quantificar a Eficiência de uso de N (EUN). Foi calculado o uso do N, pela fórmula: $\text{Uso do N} = \text{Rendimento de grãos} / \text{Dose de N aplicada}$. A segunda forma de avaliação foi a Eficiência Agronômica do N, pela fórmula: $(RGa - RGna) / (QNa)$, sendo que RGa refere-se ao rendimento de grãos com adubação, RGna refere-se ao rendimento de grãos sem adubação e QNa – refere-se à quantidade de N aplicada.

4.2.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância ANOVA pelo Teste F, com auxílio do pacote estatístico SASTM (Statistical Analysis System - SAS 8.0). Posteriormente, análise de regressão entre os valores de NDVI e NDRE com o rendimento de grãos. Outra análise que foi realizada, quando houve significância na ANOVA, entre o rendimento obtido pelos diferentes métodos de adubação (PADRÃO e algoritmo) foi a comparação de médias pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a utilização das doses de N aplicadas no estágio V3, houve resposta positiva entre o ISN com os dois índices de vegetação utilizados (NDVI e NDRE) (Figura 2). Para ambos índices de vegetação testados, observa-se uma pequena variação entre os diferentes valores de ISN em função das doses de N aplicadas no estágio V3. Essas curvas de resposta entre os índices de vegetação entre os ISN são de fundamental importância, pois as mesmas proporcionam a interpretação da quantidade de N existente na planta de acordo com os diferentes sensores testados.

O ISN encontrado para os dois sensores utilizados apresentou variação para as diferentes doses de N no estágio V3, sendo que o NDVI apresentou a maior variação do valor de ISN em relação ao NDRE. Ressalta-se que os sensores ativos

de vegetação realizam as leituras sem a necessidade de contato com as plantas (Formaggio & Sanches, 2017).

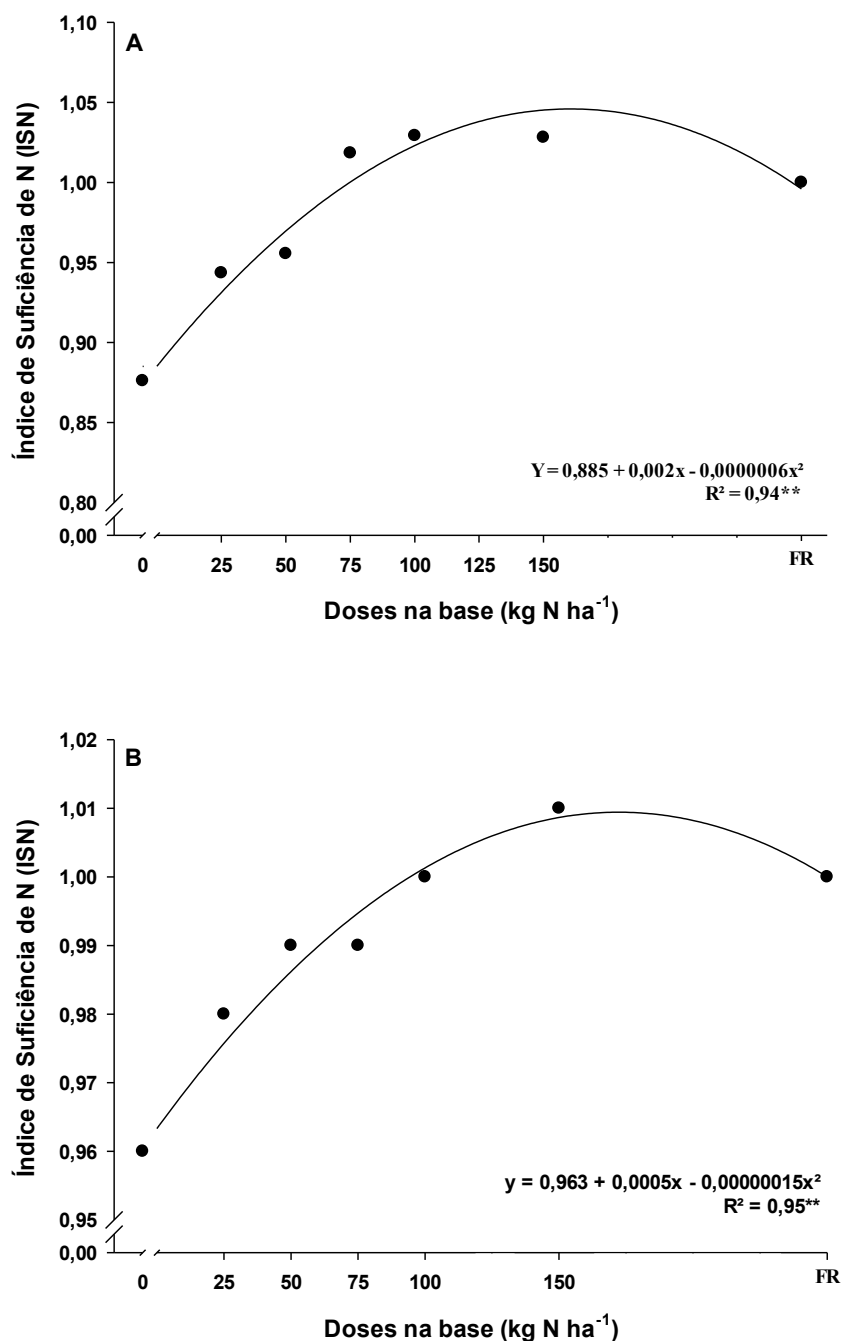


FIGURA 2. Resposta do índice de suficiência de N (ISN) em relação às doses de N aplicadas no estágio V3 na cultura do milho, utilizando o NDRE (Crop Circle) (A) e NDVI (Greenseeker) (B). FR=Faixa rica. ** Significativo a $p < 0,01$.

As classes de ISN para definição da adubação nitrogenada em cobertura a taxa variada no estádio V9 são apresentadas na Figura 3. Para cada classe de ISN foi associada uma dose máxima aplicada, a qual foi de 250 kg de N ha⁻¹, para ISN < 0,98, a dose média de 200 kg de N ha⁻¹, com ISN variando de 0,98 e 1,00 e a dose mínima de 50 kg de N ha⁻¹, quando o ISN foi > 1,00. Esses intervalos de ISN foram definidos com base em dados previamente obtidos, sendo que os valores de ISN mais próximos a 1,0 indicam que as plantas estão suficientemente nutridas em relação ao N para garantir rendimentos elevados (Solari *et al.*, 2010; Yin *et al.*, 2011 Shiratsuchi *et al.*, 2014).

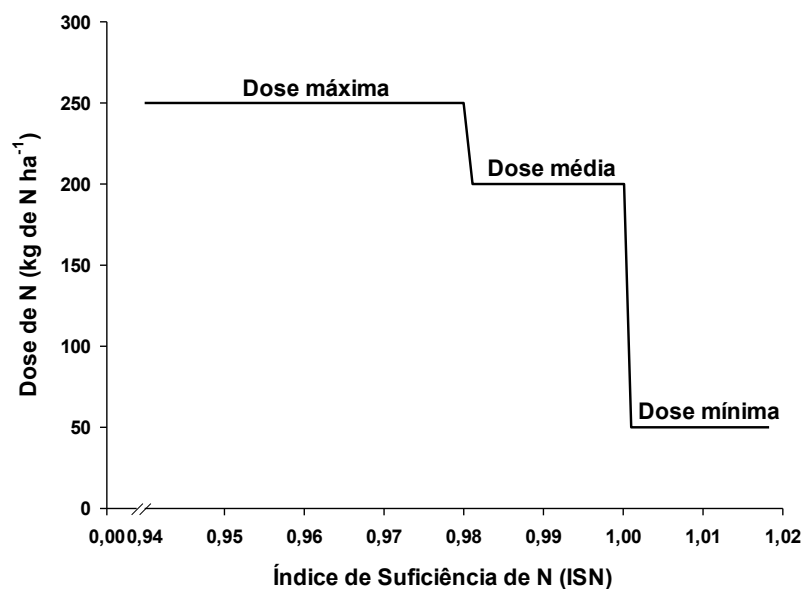


FIGURA 3. Algoritmo utilizado na safra agrícola 2016/2017 para aplicação de nitrogênio (N) em cobertura na cultura do milho, por meio de índices de suficiência de N (ISN), com definição de dose máxima, média e mínima.

Com a utilização do algoritmo mencionado na Figura 3 para a aplicação de N em cobertura no milho, buscou-se corrigir a variabilidade gerada inicialmente com

as doses de N aplicadas na semeadura e manter a expectativa de rendimento de grãos em 18000 kg ha⁻¹.

4.3.1 Biomassa seca da parte aérea, teor de N na folha e quantidade de N acumulado na parte aérea

As três variáveis (biomassa seca da parte aérea, nitrogênio acumulado e quantidade de nitrogênio acumulado) apresentaram comportamento similar (resposta quadrática), pois os valores de biomassa seca da parte aérea apresentaram variação de 3.600 a 5.000 kg ha⁻¹, sendo que as doses de 75, 100 e 150 kg de N ha⁻¹ não apresentaram diferença significativa em relação a faixa rica (FR) (Figura 4).

Com o incremento das doses de N disponibilizadas no início do desenvolvimento da cultura, observou-se incremento na produção de biomassa da parte aérea com o aumento das doses até uma dose ótima, na qual a absorção e assimilação foi máxima (Figura 4). Inúmeros autores encontraram resposta semelhante para milho (Hong *et al.*, 2007), trigo (Eitel *et al.*, 2008; Turra, 2016) e cana-de-açúcar (Lofton *et al.*, 2012; Amaral *et al.* 2015).

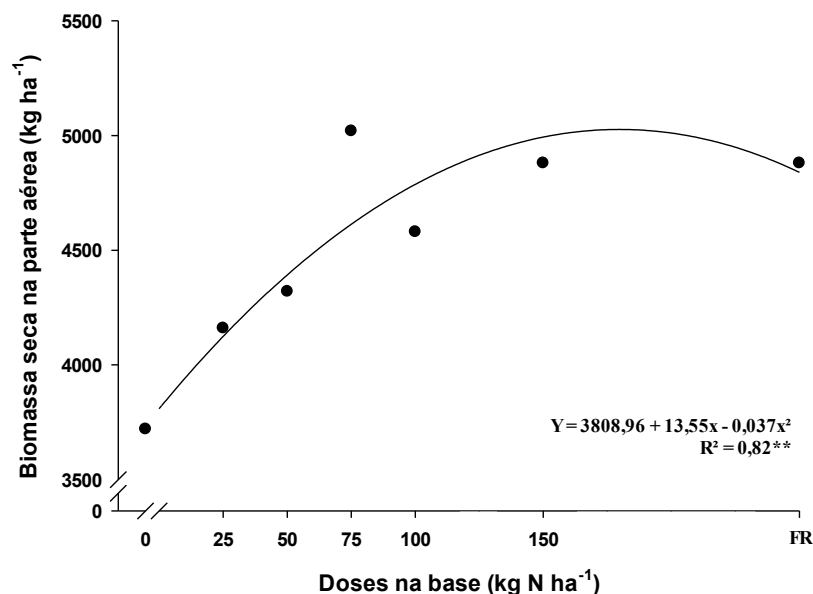


FIGURA 4. Biomassa seca na parte aérea no estágio V9 do milho, em relação às doses de N aplicadas no estágio V3. FR = Faixa rica. ** Significativo a $p < 0,01$.

Os teores de N na parte aérea do milho, expressos em porcentagem de nitrogênio no tecido da planta, apresentaram resposta similar ao resultado encontrado para a biomassa da parte aérea. Houve incremento nos teores de N foliar até a dose de 100 kg de N ha⁻¹, o qual variou entre 1,8 a 2,7% (Figura 5). Resultados semelhantes foram encontrados por vários autores, sendo que com o incremento das doses de N aplicadas na semeadura ou em cobertura, a planta não responde de forma linear a absorção do N aplicado, ou seja, apresenta uma dose ótima de absorção (Mota *et al.*, 2014; Muschietti-Piana *et al.*, 2018; Troyjack *et al.*, 2018).

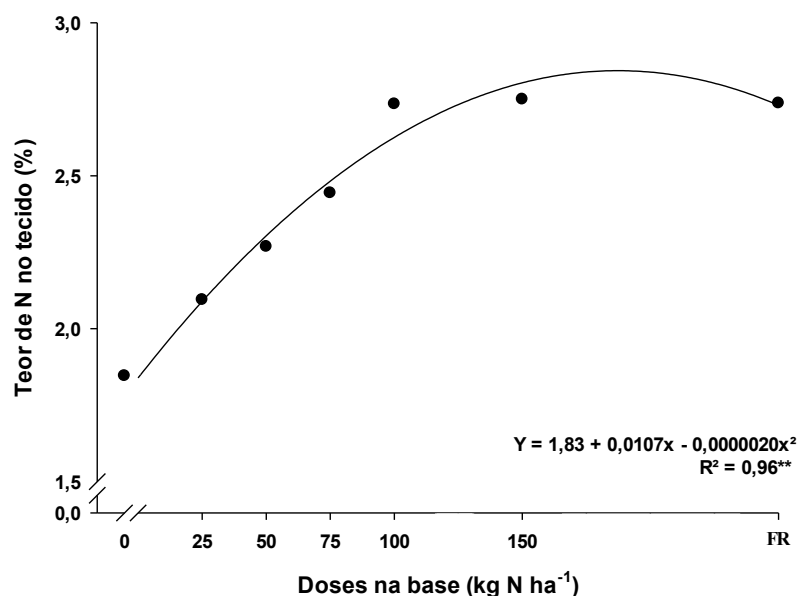


FIGURA 5. Teor de N (%) na parte aérea no estágio vegetativo V9 do milho, em relação às doses de N aplicadas no estágio V3. FR = Faixa rica. ** Significativo a $p < 0,01$.

Os valores encontrados de N acumulado pelas plantas apresentaram variação de 70 até 130 kg de N ha⁻¹ (Figura 6). O mesmo comportamento foi encontrado para a quantidade de N acumulado na parte aérea (kg ha⁻¹), onde se obteve resposta quadrática do acúmulo de N na parte aérea para as maiores doses de N aplicado na sementeira. Vários autores encontraram o mesmo comportamento (resposta quadrática) entre biomassa da parte aérea e teor de N (%) com o incremento das doses de N (Argenta *et al.*, 2001; Kramberger *et al.*, 2009; Rossini *et al.*, 2018).

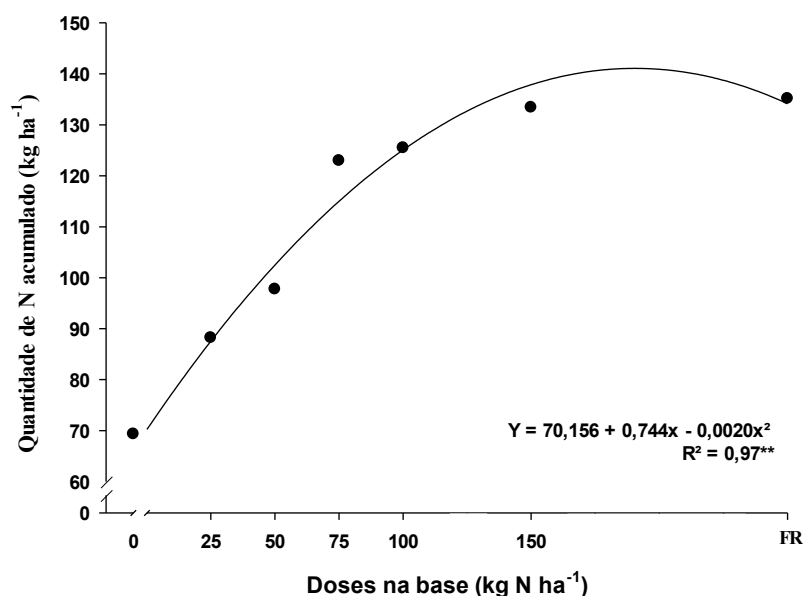


FIGURA 6. Quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea no estágio V9 do milho, em relação às doses de N aplicadas no estágio V3. FR = Faixa rica. ** Significativo a $p < 0,01$.

Outra explicação para a dinâmica do N aplicado é que todo o N não foi absorvido pela planta, devido à alta dose aplicada na semeadura e, desta maneira, pode ter sido perdido para o ambiente por meio da lixiviação e volatilização. A produção de biomassa, teor de N no tecido e a quantidade de N acumulada pela cultura do milho foram afetadas pelas diferentes doses de N disponibilizadas na semeadura. Essas variações mostram que o objetivo inicial de criação de variabilidade no estágio V9 foi atendido. Desta maneira, o algoritmo desenvolvido pode ser utilizado com a finalidade de redistribuir, de maneira variada, a dose de N em cobertura no estágio V9 da cultura do milho.

4.3.2 Rendimento de grãos e eficiência do uso do nitrogênio (EUN)

Em relação às doses de N aplicadas, o que se observa é que o algoritmo não contemplou a necessidade total de N necessária para a produção de grãos de 18 t ha⁻¹ (350 kg N ha⁻¹), como pode ser visto na Tabela 2. Apenas em duas doses de N aplicadas na semeadura, o algoritmo recomendou uma dose próxima, ou seja, uma dose total de 280 kg N ha⁻¹.

Essa redução na dose recomendada de N para a produção de 18000 kg ha⁻¹ pode estar associada a alguma limitação do ambiente de produção. Além disso, pode ter ocorrido atraso no manejo de aplicação da dose de N em cobertura, a qual estava programada para ocorrer no estágio vegetativo V8. Porém, devido ao excesso de chuva no estágio V8, a aplicação do N com base no algoritmo ocorreu no estágio V9. Esse atraso na aplicação está relacionado com a eficiência dos índices de vegetação (principalmente o NDVI) em identificar diferenças no desenvolvimento das plantas.

O NDVI é formado pela reflectância das bandas do V (vermelho) e IVP (infravermelho próximo), sendo calculado pela fórmula $NDVI = (IVP - V) / (IVP + V)$, proposta por Rouse *et al.* (1973). A reflectância do vermelho (V) apresenta variação ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, sabendo-se que o vermelho é absorvido pelas clorofilas para o processo fotossintético e pelos fitocromos, responsáveis pelo processo de fotoperíodo, sendo nesta região encontradas as clorofilas a e b. Esta região é caracterizada como uma região de muita absorção e pouca reflectância ao longo do desenvolvimento da cultura. Dessa forma, com o incremento do Índice de Área Foliar (IAF), há um aumento na absorção na banda do vermelho pelas clorofilas, reduzindo a reflectância até o

momento em que, mesmo apresentando um alto IAF, não se reduz a reflectância (Gitelson, 2004).

Quando se avalia o outro componente do NDVI, o infravermelho (IVP), observa-se que há uma relação de incremento na sua reflectância, com o aumento do IAF. O que justifica este comportamento é que, como o IVP não tem ou tem pouquíssima absorção pelos pigmentos das plantas, esse comprimento de onda apresenta alta reflectância de toda a energia incidente sobre a planta, permitindo sua utilização, pois o IVP está relacionado com as características estruturais do dossel (biomassa). Com base nessas informações, pode-se definir que, a partir do momento em que se estabilizar a reflectância no vermelho, haverá a saturação do NDVI, ou seja, o índice deixa de ser sensível aos incrementos de IAF e, conseqüentemente, para a reflectância do IVP (Gitelson, 2004).

O rendimento de grãos da testemunha, que não recebeu dose de N, foi de 4755 kg ha⁻¹, sendo inferior ao tratamento tradicional PADRÃO (Manual de adubação e calagem), que produziu 13100 kg ha⁻¹, não apresentando diferença significativa do algoritmo utilizado que apresentou produtividade média de grãos de 13.300 kg ha⁻¹ (Tabela 4). Quando avalia as doses totais aplicadas (base + cobertura) entre o método tradicional PADRÃO com o algoritmo, observa-se que o algoritmo prescreveu uma dose menor de N do que o recomendado (350 kg N ha⁻¹), sendo que o mesmo manteve os patamares de rendimento de grãos. Esses resultados são encontrados na literatura comprovando que a utilização de algoritmos para a adubação em cobertura auxilia na manutenção ou incremento do rendimento de grãos, com a redução da dose de N (Thompson *et al.*, 2015; Franzen *et al.*, 2016).

TABELA 4. Tratamentos de N aplicados na base e doses aplicadas em cobertura e sua relação com o rendimento de grãos de milho e o uso eficiente do N.

Tratamento aplicados V3 (kg N ha ⁻¹) ¹	Dose de cobertura (kg N ha ⁻¹)	Dose total (kg N ha ⁻¹)	Uso do N ²	Eficiência do Uso do N ³	Rendimento de grãos (kg ha ⁻¹)
0	250	280	41,9	24,9	12.200
25	200	255	47,9	29,2	13.900
50	200	280	54,4	37,4	14.300
75	50	155	83,3	52,6	12.200
100	50	180	79,8	53,6	14.900
150	50	230	65,9	42,1	13.700
Média do algoritmo	133	230	61,0 ^{ns}	39,9 ^{ns}	13.300 A
PADRÃO	250	350	65,9 ^{ns}	42,2 ^{ns}	13.100 A
Testemunha	0	0	---	---	4.700 B
CV (%)	---	---	7,5	11,7	8,0

Letras maiúsculas são comparadas entre a mesma cultivar, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ^{ns} não significativo a $p < 0,05$. CV = Coeficiente de variação. ¹ Para todas as doses N aplicadas na base foram adicionadas na semeadura 30 kg N ha⁻¹, em função da formulação do fertilizante. ² Uso do N = kg de grão/kg de N; ³ EUN = Eficiência do Uso do N.

Quando se avaliou o uso do N e sua eficiência, observou-se que as plantas que apresentaram um maior ISN no momento da adubação de cobertura foram as que apresentaram melhor resposta produtiva, alcançando os maiores rendimentos (14.977 e 13.785 kg ha⁻¹, respectivamente dos tratamentos que receberam 100 e 150 kg N ha⁻¹ no estágio V3). Da mesma forma, as melhores e maiores eficiências do uso do N pelo milho foram para os mesmos tratamentos. Para o uso do N, obteve-se, para cada kg de N aplicado produziu-se 61,0 kg de grãos, não diferenciando do tratamento PADRÃO. Para a eficiência agrônômica do N, ocorreu resposta semelhante, sendo que houve eficiência máxima de 42,1 para o tratamento PADRÃO (Tabela 2).

4.4 Aprimoramento do algoritmo para a safra agrícola 2017/2018

Com a utilização do primeiro algoritmo desenvolvido a partir dos dados reportados por Vian (2015), observou-se que alguns ajustes necessitam ser realizados para uma melhor resposta da cultura. Os ajustes realizados foram adaptações na forma de recomendar as doses de N em função do ISN (Figura 7). Os ajustes foram baseados no algoritmo desenvolvido para a cultura do milho de segunda safra no Mato Grosso (MT) por Shiratsuchi *et al.* (2014). Esses novos ajustes seguiram a mesma abordagem largamente utilizada nos algoritmos desenvolvidos na Europa e nos Estados Unidos, que é a utilização de uma faixa de referência (FR) e o emprego do índice de suficiência do nitrogênio (ISN) (Schepers *et al.*, 1992). As etapas desenvolvidas para realizar os ajustes no algoritmo foram as seguintes:

1 – Determinou-se a necessidade de N pela cultura do milho para atingir um potencial produtivo de 18.000 kg ha⁻¹. Segundo o Manual de adubação e calagem para o RS e SC (Comissão..., 2016), para atingir tal potencial produtivo há necessidade de aplicação de 350 kg de N ha⁻¹.

2 – O segundo fator utilizado foi a sensibilidade dos sensores de vegetação utilizados para calcular o ISN, utilizando a relação entre o ISN e as doses de N. As doses de N foram as mesmas utilizadas previamente (0, 25, 50, 100, 150 e FR – 250 kg de N ha⁻¹).

3 – O terceiro passo foi avaliar a diferença entre a necessidade de adubação nitrogenada em cobertura para complementar a dose necessária para atingir a dose de 350 kg de N ha⁻¹, a qual foi definida a partir do ISN (Figura 7), sendo relacionadas

as doses (0, 25, 50, 75, 100 e 150 kg de N ha⁻¹) com o índice de suficiência de N, para que se estabeleça um modelo de aplicação de N em cobertura em função do índice ISN.

Ao contrário do algoritmo utilizado na safra agrícola 2016/2017, esse algoritmo objetiva prescrever a dose necessária (350 kg de N ha⁻¹) para que o potencial produtivo seja alcançado. Além disso, ressalta-se que essa dose de N é recomendada para lavouras onde a deficiência hídrica não seja limitante.

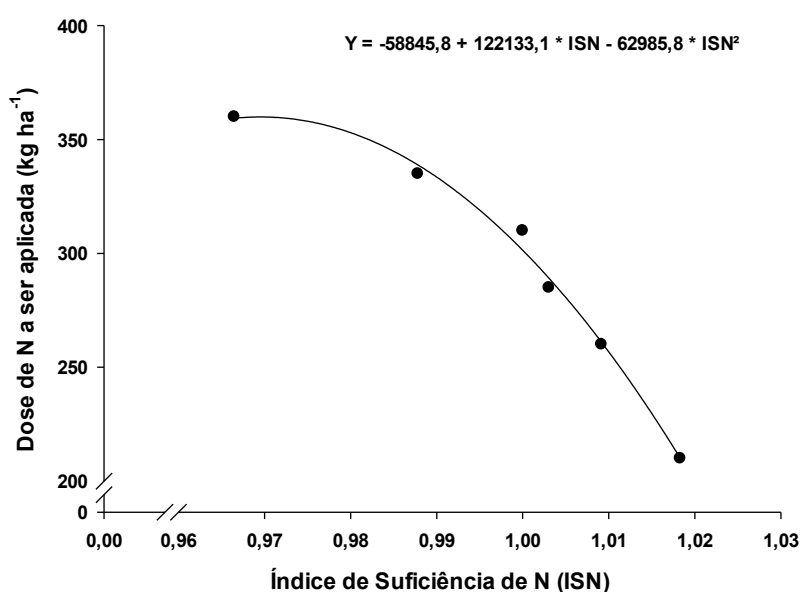


FIGURA 7. Algoritmo de recomendação de nitrogênio em cobertura, adaptado para a cultura do milho para a safra agrícola 2017/2018.

Na Figura 8 são apresentados alguns algoritmos de recomendação de N em tempo real e a taxa variada, amplamente utilizados nos Estados Unidos (EUA) e no Brasil, comparados com o algoritmo desenvolvido neste trabalho.

Solari *et al.* (2010) e Holland & Schepers (2010), desenvolveram algoritmos de recomendação de N a taxa variada para a cultura do milho utilizando o sensor de vegetação SPAD. Solari *et al.* (2010), utilizando o clorofilômetro SPAD e o ISN,

demonstraram um decréscimo na recomendação de N a partir do ISN de 0,7 até o valor de 0,97, apresentando dose inicial de 150 kg de N ha⁻¹. Holland & Schepers (2010), utilizaram a mesma lógica de desenvolvimento do algoritmo, porém, modificando-se o ambiente produtivo. Houve uma alteração na dose prescrita, iniciando com dose próxima de 250 kg de N ha⁻¹ para o ISN de 0,70, obtendo-se uma redução na dose recomendada quando o ISN chegar próximo a 1,0.

O algoritmo proposto por Shiratsuchi *et al.* (2014) foi desenvolvido para as condições edafoclimáticas do cerrado brasileiro, levando em consideração um rendimento médio de grãos de 8.000 kg ha⁻¹. Para esse algoritmo, os valores de ISN foram calculados a partir do índice de vegetação NDVI. A recomendação da dose de N inicia com o ISN de 0,80, com uma dose de 130 kg de N ha⁻¹, sendo reduzindo a zero até o ISN de 0,96.

O algoritmo desenvolvido no presente trabalho tem por objetivo obter um potencial produtivo de 18.000 kg ha⁻¹. Para o desenvolvimento desse algoritmo, utilizou-se metodologia semelhante a utilizada por Shiratsuchi *et al.* (2014), empregando o NDVI como o índice de vegetação para calcular o ISN. Em função do aumento da dose de N a ser recomendada e do ambiente de produção, apresenta valores maiores de dose e um ajuste mais fino, sendo que, para o ISN de 0,90, a dose recomendada seria de 325 kg de N ha⁻¹, obtendo uma dose máxima de 390 kg de N ha⁻¹ para o ISN de 0,95 e, posteriormente, o seu decréscimo até o ISN de 1,05.

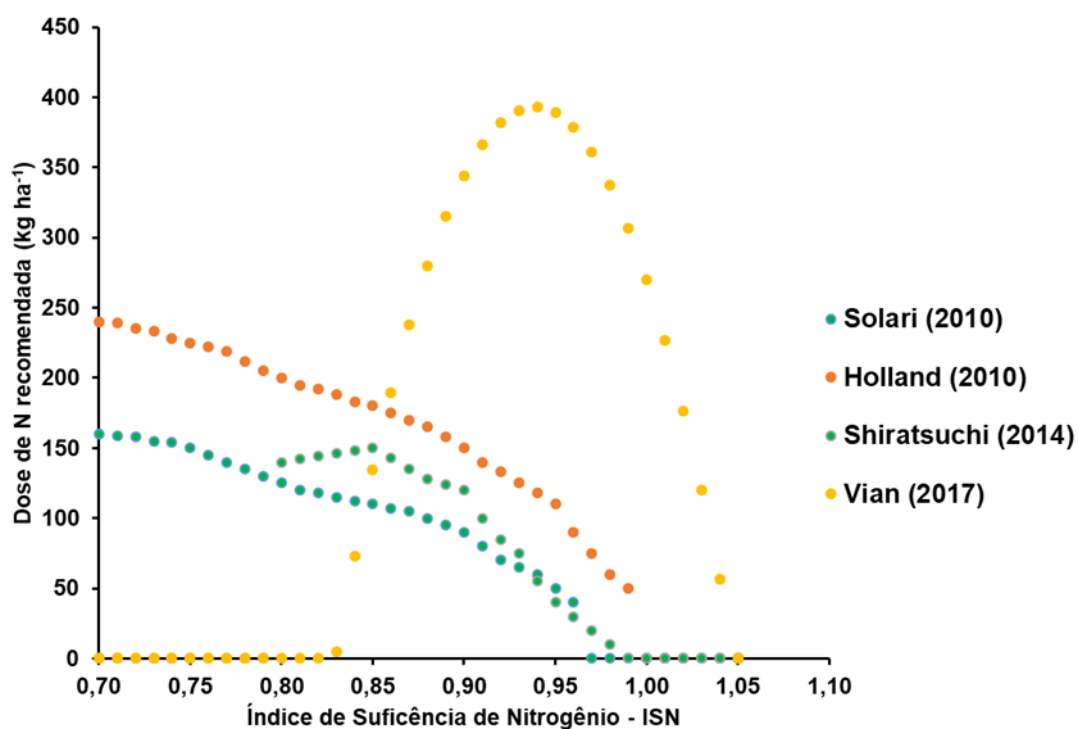


FIGURA 8. Comparação entre os diferentes algoritmos de recomendação de nitrogênio em cobertura desenvolvidos para a cultura do milho cultivada nos Estados Unidos (Solari, 2010 e Holland, 2010) e no Brasil (Shiratsuchi, 2014 e Algoritmo proposto por Vian 2017).

4.5 CONCLUSÃO

A dose recomendada pelo algoritmo manteve o mesmo rendimento de grãos que a metodologia de adubação tradicional (PADRÃO), porém o algoritmo apresentou uma redução na dose de nitrogênio de cobertura de 120 kg N ha⁻¹.

Os sensores de vegetação utilizados para prescrever o uso do algoritmo para recomendação de adubação nitrogenada em cobertura e em taxa variada

foram eficientes para manutenção do potencial produtivo do milho para as condições edafoclimáticas de Eldorado do Sul (RS).

4.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, L.R. et al. Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.16, p.15–28, 2015.

ARGENTA, G. et al. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.27, p.109–119, 2003.

BARKER, D.W.; SAWYER, J.E. Using active canopy sensors to quantify corn nitrogen stress and nitrogen application rate. **Agronomy Journal**, Madison, v.102, p.964-971, 2010.

BERGAMASCHI, H. et al **Clima da Estação Experimental da UFRGS e região de abrangência**. Porto Alegre: UFRGS, 2003, 78 p.

BREDEMEIER, C.; VIAN, A.L.; PIRES, J.L.F. Aplicação de nitrogênio em tempo real: modelos e aplicações. In: SANTI, A.L. et al. **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: CESPOL, 2016. p.137-158.

BUSHONG, J.T. et al. Evaluation of mid-season sensor based nitrogen fertilizer recommendations for winter wheat using different estimates of yield potential.

Precision Agriculture, Dordrecht, v. 17, p.470–487, 2016.

CIAMPITTI, I.A.; VYN, T.J. Grain nitrogen source changes over time in maize: a review. **Crop Science**, Madison, v.53, p.366-377, 2013.

CIAMPITTI, I.A.; VYN, T.J. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: a review. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.133, p.48-67, 2012.

CRAIN, J.; ORTIZ-MONASTERIO, I.; RAUN, B. Evaluation of a reduced cost active NDVI sensor for crop nutrient management. **Journal of Sensors**, London, v. 2012, [art.] 582028, 2012.

DELLINGER, A.E.; SCHMIDT, J.P.; BEEGLE, D.B. Developing nitrogen fertilizer recommendations for corn using an active sensor. **Agronomy Journal**, Madison, v.100, p.1546-1552, 2008.

EITEL, J.U.H. et al. Combined spectral index to improve ground-based estimates of nitrogen status in dryland wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v.100, p.1694–1702, 2008.

FORMAGGIO, A.R.; SANCHES, I.D. Perspectivas futuras da agricultura Brasileira e mundial. In: FORMAGGIO, A.R.; SANCHES, I.D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. p. 227-254.

FRANZEN, D. et al. Algorithms for in-season nutrient management in cereals. **Agronomy Journal**, Madison, v.108, p.1-7, 2016.

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

HOLLAND, K.H.; SCHEPERS, J.S. Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.102, p.1415-1424, 2010.

HONG, S.D. et al. Comparison of ground based remote sensors for evaluation of corn biomass affected by nitrogen stress. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.38, p.2209–2226, 2007.

HUANG, M. et al. Impact of temperature changes on early-rice productivity in a subtropical environment of China. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 146, p. 10–15, 2013.

IPAGRO. **Observações meteorológicas no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: IPAGRO, 1979. 272 p. (Boletim Técnico, 3).

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

KRAMBERGER, B. et al. Effects of cover on soil mineral nitrogen and on the yield and nitrogen content of maize. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.31, p.103–109, 2009.

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

MOTA, M.R. et al. Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.39, p.512–522, 2015.

MUSCHIETTI-PIANAA, M.D.P. et al. Using site-specific nitrogen management in rainfed corn to reduce the risk of nitrate leaching. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.199, p.61–70, 2018.

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

REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE MILHO, 58.; REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE SORGO, 41., 2013, Pelotas, RS. **Indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul: safras 2013/2014 e 2014/2015**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013. 124 p.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1993. 26 p. (Special Report, 48).

ROBERTS, D.F. et al. Will variable rate nitrogen fertilization using corn canopy reflectance sensing deliver environmental benefits? **Agronomy Journal**, Madison, v.102, p.85-95, 2010.

ROSSINI, M.A. et al. Contribution of the early-established plant hierarchies to maize crop responses to N fertilization. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.216, p.141–149, 2018.

ROUSE, J.W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, D.C. **Proceedings...** Washington, D.C.: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973. v.1, p.309-317.

SCHEPERS, J.S. et al. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. **Communications in Soil and Plant Analysis**, New York, v.23, p.2173–2187, 1992.

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

SHIRATSUCHI, L.S. et al. Algoritmo para aplicação de doses variáveis de nitrogênio em tempo real para produção de milho safra e safrinha no cerrado. In: BERNARDI, A.C. de. C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: EMBRAPA, 2014. p. 226-232.

SOLARI, F. et al. An active sensor algorithm for nitrogen recommendations based on a chlorophyll meter algorithm. **Agronomy Journal**, Madison, v.102, p.1090-1098, 2010.

STRECK, E.V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R.C.D. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER-RS, 2008. 222 p.

TAGARAKIS, A.C.; KETTERINGS, Q.M. Proximal sensor-based algorithm for variable rate nitrogen application in maize in northeast U.S.A. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v.145, p.373-378, 2018.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

THOMPSON, L.J. et al. Model and sensor-based recommendations approaches for in-season nitrogen management in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.107, p.2020-2030, 2015.

TROYJACK, C. et al. Nitrogen fertilization on maize sowing: plant growth and seed vigor. **American Journal of Plant Sciences**, Irvine, v.9, p.83–97, 2018.

TUBAÑA, B.S. et al. Adjusting midseason nitrogen rate using a sensor-based optimization algorithm to increase use efficiency in corn. **Journal of Plant Nutrition**, London, v.31, p.1393–1419, 2008.

TURRA, M.A. **Manejo do nitrogênio em cultivares de trigo baseado no índice de vegetação por diferença normalizada (ndvi)**. 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

VARVEL, G.E. et al. An algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index. **Agronomy Journal**, Madison, v.99, p.701–706, 2007.

VIAN, A. L. **Sensores de vegetação para estimativa in situ potencial produtivo na cultura do milho**. 2015, 81 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

YIN, X. et al. In-season prediction of corn yield using plant height under major production systems. **Agronomy Journal**, Madison, v.103, p.903–929, 2011.

5 CAPÍTULO III

MODELO PARA RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA NA CULTURA DO TRIGO UTILIZANDO SENSOR DE VEGETAÇÃO

5.1 INTRODUÇÃO

A recomendação de adubação nitrogenada para a cultura do trigo no Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC) é definida em função do teor de matéria orgânica no solo, da cultura antecessora e da expectativa de rendimento de grãos (REUNIÃO, 2017). Esta forma tradicional de recomendar nitrogênio em cobertura a taxa fixa desconsidera a variabilidade espacial do crescimento das plantas, a qual é promovida pelos diferentes tipos de solo, mineralização da matéria orgânica, variações de relevo, variabilidade de distribuição de palha da cultura antecessora, entre outros (Amado, 2016).

Neste sentido, diferentes formas de recomendação ou de redistribuição do nitrogênio (N) aplicado em cobertura precisam ser desenvolvidas. O aumento da eficiência do uso do N pela cultura do trigo pelo ajuste da adubação nitrogenada em função da demanda nutricional das plantas e da expectativa de rendimento de grãos da cultura, levando em considerando a variabilidade espacial das plantas, é uma forma viável e prática de se obter ganhos produtivos e sustentáveis na agricultura (Roberson, 2013; Bredemeier *et al.*, 2016; Turra, 2016).

Para realizar a recomendação de N em função da demanda nutricional das plantas, alguns modelos foram desenvolvidos para que as aplicações a taxa variada pudessem se tornar uma realidade. Esses algoritmos levam em consideração variáveis como a disponibilidade de N no solo, condições meteorológicas, estágio de desenvolvimento da cultura, conteúdo de clorofila, demanda nutricional e o potencial produtivo (Flowers *et al.*, 2003; Raun *et al.*, 2005; Varvel *et al.*, 2006;

Shanahan *et al.*, 2008; Shiratsuchi *et al.*, 2011; Schmidt *et al.*, 2011; Holland & Schepers, 2013).

Porém, a dificuldade em trabalhar a campo com as inúmeras variáveis necessárias para viabilizar o uso desses algoritmos gerou a necessidade de desenvolver algoritmos mais simples e práticos. Alguns trabalhos já foram desenvolvidos para as culturas da cana-de-açúcar, algodão e milho para as condições edafoclimáticas do cerrado brasileiro (Amaral & Molin, 2011; Shiratsuchi *et al.*, 2011; Shiratsuchi *et al.*, 2014; Trevisan, 2016). Desta forma, entende-se que a implementação e a utilização dos algoritmos ocorrerão a partir da facilidade de uso dos mesmos (Léon, 2014), além de estarem calibrados e validados para as condições edafoclimáticas da região sul do Brasil.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um algoritmo de fácil aplicação para recomendação da adubação nitrogenada em cobertura em trigo em função da demanda nutricional de nitrogênio pela cultura no estágio de seis folhas completamente expandidas, usando o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) medido por sensor ativo de vegetação.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho a campo foi conduzido em 2016 na Estação Experimental da Embrapa Trigo, localizada no município de Coxilha (RS), região fisiográfica do Planalto Médio do Estado do Rio Grande do Sul, pertencente à Região Homogênea

de Adaptação de Cultivares 1 (Reunião, 2017). O clima é subtropical de verão úmido quente, do tipo Cfa, conforme a classificação de Koppen (INMET, 2016), com altitude média de 689 metros acima do nível do mar.

A precipitação pluvial média anual em Coxilha é de 1.788 mm e a temperatura média mensal do ar do mês mais quente é de 22°C e a média do mês mais frio é de 12,9°C (INMET, 2016). O solo predominante na região é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico húmico, caracterizado por possuir boa drenagem, ser profundo e com aptidão para cultivos anuais de grãos (Streck *et al.*, 2008).

Antes da instalação do experimento, foi realizada amostragem de solo na área de estudo, na camada de 0-20 cm. As amostras foram analisadas pelo Laboratório de Análises de Solos da Embrapa Trigo e os resultados são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Características físicas e químicas das amostras de solo retiradas da área experimental antes da instalação do experimento.

Embrapa Trigo – Coxilha, RS									
Ano	Argila %	pH H ₂ O	P ---- mg dm ⁻³ -	K	MO ¹ g kg ⁻¹	Al ³⁺ -----	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³ ----	Mg ²⁺	V ² %
2016	47	5,9	44,9	180	27	0,2	4,5	2,25	80

¹ MO=matéria orgânica; ² V = saturação de bases.

Para o desenvolvimento do algoritmo, optou-se por realizar a semeadura do trigo sob resteva (resíduos) de lavoura de soja, uma vez que este é o sistema de sucessão que ocorre com maior frequência nos Estados do RS e SC. A dessecação das áreas antes da implantação dos experimentos foi realizada com herbicida de ação total a base de glyphosato (3 L ha⁻¹ de produto comercial) (Reunião, 2017).

As cultivares utilizadas foram BRS Parrudo, BRS Marcante e TBIO Sossego. Todas as cultivares utilizadas são indicadas para cultivo na Região Homogênea de Adaptação de Cultivares 1. Na Tabela 2, são listadas algumas características das cultivares utilizadas no experimento. Os critérios de escolha das cultivares foram dois, sendo que o primeiro critério se considerou as cultivares mais cultivadas e o segundo critério foi em função do hábito de crescimento.

TABELA 2. Descrição das cultivares de trigo utilizadas.

Cultivar	Ciclo¹	Porte	Hábito de crescimento	RHACT²	Classificação
BRS Parrudo	135	Médio	Ereto	RS 1 e 2	Pão/Melhorador
TBIO Sossego	130	Médio	Semi-ereto	RS 1 e 2, SC 1 e 2, PR 1, 2 e 3, SP 2 e 3, MS 3 e 4, MG4, GO4, DF4	Pão
BRS Marcante	133	Médio	Semi-ereto	RS 1 e 2, SC 1 e 2, PR 1	Pão

¹Dias; ² Região homogênea de adaptação de cultivares de trigo (1, 2, 3 e 4) e Estados: RS (Rio Grande do Sul), SC (Santa Catarina), PR (Paraná), SP (São Paulo), MS (Mato Grosso do Sul), MG (Minas Gerais), GO (Goiás) e DF (Distrito Federal) (Reunião..., 2017).

A densidade de semeadura foi de 300 sementes aptas m⁻², sendo realizada na primeira semana de junho. Cada parcela foi constituída de 10 linhas de três metros de comprimento, espaçadas em 0,17 m. A adubação de base foi de 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 150 kg ha⁻¹ de K₂O. Os tratos culturais foram realizados segundo as indicações técnicas para a cultura do trigo (Reunião, 2017).

5.2.1 Desenvolvimento do algoritmo

O algoritmo proposto neste trabalho foi criado em função da demanda nutricional de nitrogênio pela cultura do trigo no estágio de seis folhas completamente expandidas. Para tanto, foi considerada a curva de absorção de N pelo trigo proposta por Wiethölter (2011). Essa curva se caracteriza pela elevada absorção de N entre os estádios de alongamento dos entrenós e espigamento, podendo atingir o máximo próximo aos 100 dias após a emergência das plantas, como pode ser observado na Figura 1. Portanto, uma adubação nitrogenada adequada no período anterior a essa máxima absorção permite adequada disponibilidade de N para o crescimento das plantas e para a definição de elevado potencial produtivo.

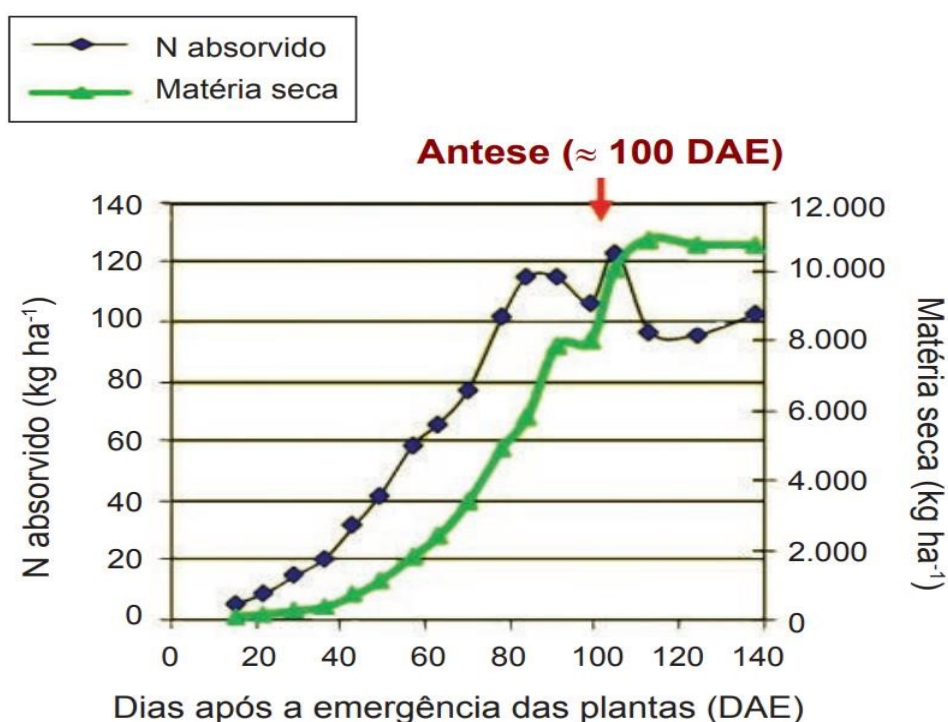


FIGURA 1. Curva de absorção de nitrogênio pela cultura do trigo, adaptada de Wiethölter (2011).

A adubação nitrogenada em cobertura em trigo é recomendada para o estágio de seis folhas completamente expandidas, pois é o momento que as plantas apresentam a melhor resposta à adubação. Dessa forma, o estágio de seis folhas ocorre entre 40 a 50 dias após a emergência das plantas e, neste momento, as plantas já deverão ter absorvido um total de aproximadamente 30 a 40 kg N ha⁻¹, para que altos potenciais produtivos possam ser alcançados. Desta forma, o algoritmo tem por objetivo aplicar a dose recomendada pelo Manual de Adubação e Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Comissão..., 2016), adicionada da quantidade de N necessária para suprir a demanda da planta neste estágio, considerando o padrão mostrado na Figura 1.

Neste sentido, buscou-se avaliar o efeito de diferentes doses de nitrogênio aplicadas na base, com o intuito de criar variabilidade inicial na absorção de N pelas plantas, e, posteriormente, quantificou-se a quantidade de N acumulada na parte aérea das plantas. Assim, os passos para a construção do algoritmo foram os seguintes: 1 – Tratamentos de base, 2 – Leituras com sensor de vegetação para realizar as relações com o NDVI e 3 - Quantificação do conteúdo de N no tecido, os quais são descritos a seguir:

Os tratamentos foram alocados no delineamento experimental de blocos ao acaso, com parcelas subdivididas e quatro repetições. Os tratamentos utilizados tiveram o objetivo de criar variabilidade na absorção de N no estágio de seis folhas completamente expandidas, com o intuito de simular a realidade encontrada a campo, criando assim, diferentes demandas potenciais de nitrogênio. Para tanto, foram utilizadas doses de nitrogênio aplicadas na emergência das plantas (base) (0, 15, 30, 45 e 60 kg N ha⁻¹), além de tratamento denominado de “PADRÃO”, onde

foram aplicadas as doses recomendadas pelo Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (Comissão...,2016), no qual foi aplicada a dose de 30 kg ha⁻¹ de N na base. A fonte de N utilizada foi ureia (45% de N).

O segundo passo se dá pela leitura da reflectância do dossel vegetativo com sensor óptico ativo GreenSeeker, sendo calculado o índice NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada - Normalized Difference Vegetation Index). As leituras foram realizadas com o equipamento posicionado paralelamente às linhas da cultura, a 0,8 m acima do dossel (Figura 2), sendo avaliadas as linhas centrais da parcela.

No estágio da sexta folha completamente expandida (Escala Haun, 1973), Estádio 3 da escala adaptada de Feekes & Large (Escala – Large, 1954) e estágio 23 da escala de Zadoks (Escala Zadoks, Chang & Konzac, 1974), foi realizada amostragem de biomassa da parte aérea dos diferentes tratamentos, em três linhas de 0,5 m de comprimento, totalizando área de 0,27 m². Posteriormente, realizou-se a quantificação dos teores de N acumulado no tecido vegetal, seguindo o método Kjeldahl, conforme descrito por Tedesco *et al.*, (1995). Em um segundo momento, multiplicou-se a concentração de N no tecido pela biomassa seca da parte aérea, obtendo-se a quantidade de N acumulada na parte aérea (kg ha⁻¹).

O NDVI é calculado utilizando a seguinte fórmula: $NDVI = (IVP - V) / (IVP + V)$, onde V refere-se à reflectância no vermelho (680 nm) e IVP refere-se à reflectância na região do infravermelho próximo (770 nm).

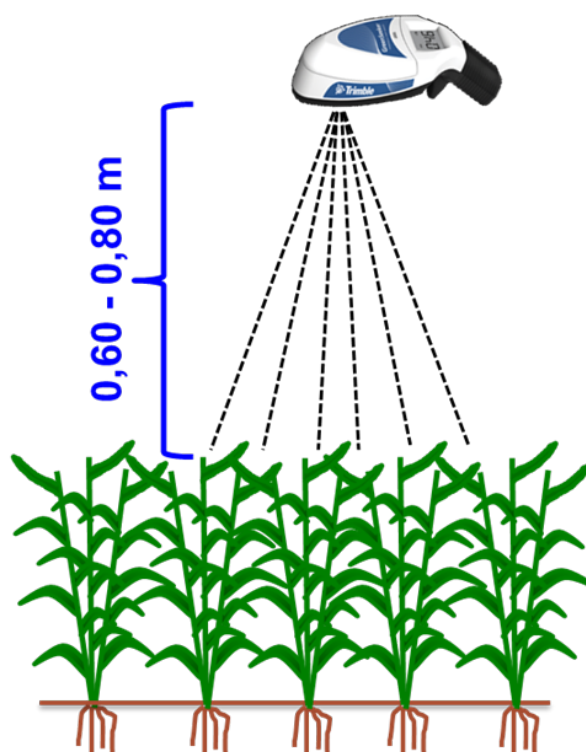


FIGURA 2. Orientação nadir de leitura do índice de vegetação, obtidos por meio do GreenSeeker.

De posse de todas as informações, o próximo passo foi desenvolver o modelo de recomendação, sendo que o mesmo será apresentado e discutido no item 5.3.

5.2.2 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo Teste F, com auxílio do pacote estatístico SASTM (Statistical Analysis System - SAS 8.0). Para as variáveis analisadas, foi realizada a análise de variância ANOVA e, posteriormente, análise de regressão entre os valores de NDVI e N acumulado, ao nível de $p < 0,05$.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A quantidade de biomassa na parte aérea do trigo, têm alta relação com as doses de nitrogênio aplicadas na semeadura, quando coletadas no estágio da sexta folha completamente expandida, além de apresentar alta relação com os valores de NDVI (Bredemeier, 1999; Polleto, 2004; Turra, 2016). A relação entre os teores de N acumulado na parte aérea da cultura está ligada com a disponibilidade de N no solo, pois, quando há variação na disponibilidade de N no solo, haverá variação na quantidade de N acumulada no dossel.

A variação de produção de biomassa e, conseqüentemente, no acúmulo de N nos tecidos vegetais pode ser estimada, de forma indireta, pelo emprego de sensores de vegetação, os quais informam um índice de vegetação, como, por exemplo, o NDVI. Este índice de vegetação é formado por dois comprimentos de onda, o vermelho e o infravermelho.

A maior disponibilidade de N para as plantas proporciona maior acúmulo de biomassa fotossinteticamente ativa. Desta forma há uma maior reflectância no infravermelho e uma maior absorção da radiação no vermelho, devido à concentração de clorofilas e, desta maneira, ocorre o aumento nos valores de NDVI (Rizzi, 2004; Povh *et al.*, 2008).

Quando se analisou a relação das quantidades de N acumulado na parte aérea e os valores de NDVI para as três cultivares utilizadas (TBIO Sossego, BRS Parrudo e BRS Marcante), foi possível representar essa relação com um modelo único, obtendo-se $r = 0,90$ (Figura 3). A relação entre o teor de N acumulado na

parte aérea do trigo com o NDVI, é alta, como pode ser observado na Figura 3, ao mesmo tempo que ocorre o incremento nas quantidades de N acumulada na parte aérea, ocorre o aumento dos valores de NDVI. Os valores de N acumulado variaram entre 13 kg N ha⁻¹ a 43 kg N ha⁻¹, sendo que os valores de NDVI variaram entre 0,61 a 0,76.

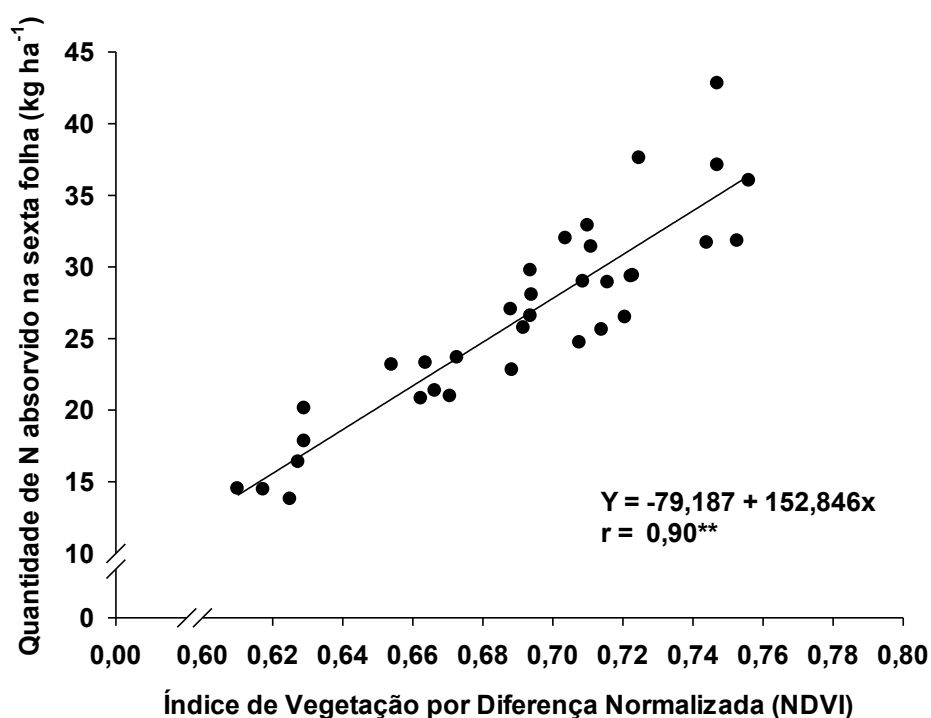


FIGURA 3. Relação entre os valores do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e a quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea do trigo (média de todos os tratamentos). Embrapa Trigo, 2016. ** Significativo a $p < 0,01$.

A partir da avaliação da quantidade de N acumulado no tecido no estágio da sexta folha (Figura 3), realizou-se a subtração do teor de N acumulado (35 kg N ha⁻¹), valor esse obtido da Figura 1. A fórmula da subtração utilizada para determinar a demanda de N é a seguinte: Demanda de N = 35 kg N ha⁻¹ - N acumulado no tecido (kg N ha⁻¹), utilizando a fórmula da Figura 3 (Quantidade de N acumulado =

- 79,187 + 152,85 NDVI) para a estimativa da quantidade de N acumulado na parte aérea. Desta forma, no estágio da sexta folhas completamente expandidas, é necessário que a planta tenha acumulado 35 kg N ha⁻¹, para que o potencial de rendimento acima de 5.000 kg ha⁻¹ possa ser atingido.

Observa-se que os sensores ópticos de dossel são capazes de estimar o teor de N no tecido em tempo real. Esta ferramenta possibilita estimar a ciclagem do nutriente (Nitrogênio) na parte aérea da cultura em tempo real ao longo do ciclo de crescimento da cultura.

Na Figura 4, são apresentados os valores da demanda de N pela cultura, onde os valores mais baixos de NDVI são associados às maiores demandas (em torno de 20 kg N ha⁻¹).

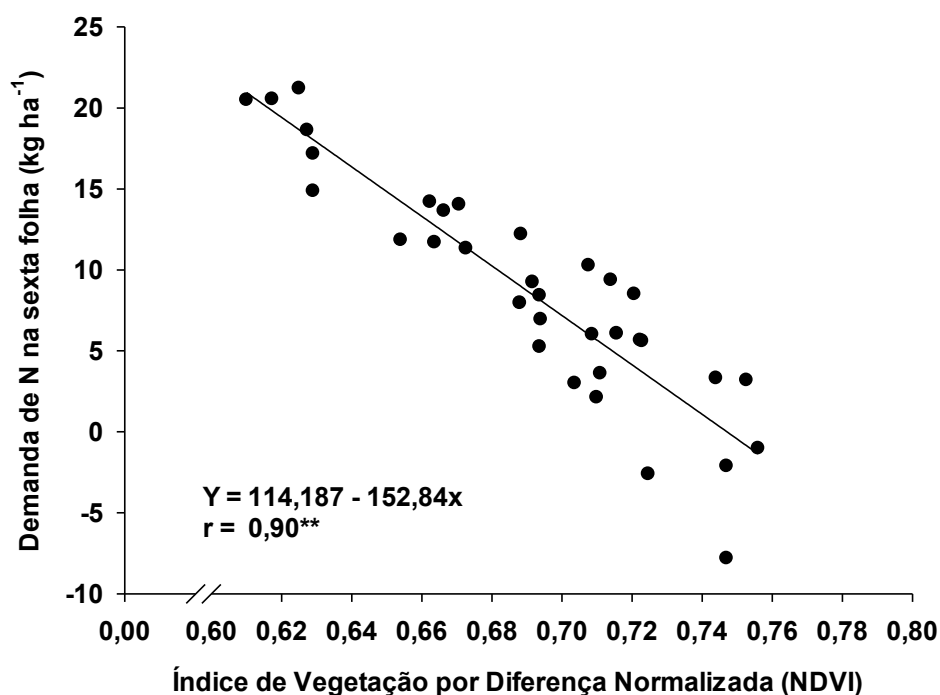


FIGURA 4. Demanda de nitrogênio em função dos valores de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). Embrapa Trigo, 2016. ** Significativo a $p < 0,01$.

A partir das etapas anteriores de construção do algoritmo, as quais serviram para quantificar os teores de N acumulado no tecido e mensurar a demanda de N pela cultura na fase inicial de crescimento, foi possível desenvolver a terceira etapa, a qual é o próprio algoritmo para indicação da aplicação de N a taxa variada.

O algoritmo foi definido com o objetivo de ser de simples e prática utilização a campo. Esta metodologia leva em consideração dois fatores fundamentais para a definição da dose a ser aplicada. O primeiro fator é determinar quanto de N está faltando para as plantas atingirem o valor de 35 kg N ha⁻¹ acumulado na parte aérea, a partir da estimativa, pelo NDVI, da quantidade de fato absorvida até o estágio de seis folhas completamente expandidas. Com a definição dessa variável, a mesma deve ser somada com a dose de N que o PADRÃO indicar para ser aplicada (Tabela 3). Neste caso, a dose indicada foi de 80 kg N ha⁻¹. Para construir o algoritmo, foi utilizada a seguinte relação: Dose de N recomendada pelo Algoritmo = Diferença entre a dose “ideal” (35 kg ha⁻¹) e o teor de N acumulado no tecido + dose escolhida pelo produtor (no caso a indicada pelo PADRÃO, que foi de 80 kg ha⁻¹).

Para a indicação da dose de N a ser aplicada na cultura do trigo, nos estados do RS e SC são levados em consideração três fatores, que são: teor de matéria orgânica no solo, cultura antecessora e expectativa de rendimento de grãos (Tabela 3) (Comissão..., 2016) Dessa forma, a definição da dose que será aplicada durante o ciclo da cultura varia em função destes três fatores, sendo que, da dose total, apenas 15 a 20 kg de N ha⁻¹ devem ser aplicados na semeadura e o restante da dose deve ser aplicada em cobertura, utilizando o algoritmo. Desta forma, as doses a ser utilizada em cobertura para as diferentes regiões produtoras de trigo serão definidas em função desta tabela.

Essas características apresentadas acima serão utilizadas como balizadoras, para a definição da dose de N a ser aplicada em cobertura para as diferentes regiões produtoras de trigo no sul do Brasil. Essas doses de N definidas a partir do manual de adubação e calagem para os Estados do RS e SC serão ajustadas em função da quantidade de N acumulada estimada pelo NDVI.

TABELA 3. Tabela de recomendação da dose de nitrogênio para a cultura do trigo.

Matéria orgânica do solo	Cultura antecessora	
	Leguminosa	Gramíneas
%	-----kg de N ha ⁻¹ -----	
≤ 2,5	60	80
2,6 – 5,0	40	60
> 5,0	≤ 20	≤ 20

¹Para rendimento de grãos maior que 3 t/ha, acrescentar aos valores da tabela 20 kg de N/ha, em cultivo após leguminosas; e 30 kg de N/ha, em cultivo após gramíneas; por tonelada adicional de grãos a serem produzidos (Comissão..., 2016).

Como pode ser observado na Figura 5, o algoritmo proposto obteve um $r = 0,95$ para as três cultivares utilizadas no experimento. Dessa forma, a definição da dose fica atrelada ao valor de NDVI, sendo calculada a partir da fórmula: Dose de N (kg ha⁻¹) = 281,276 – (222,536 NDVI). No algoritmo proposto, observa-se que as doses mínimas indicadas com base no NDVI ficaram próximas a dose de 110 kg N ha⁻¹, para um NDVI de 0,73 (Figura 5), pois as plantas apresentavam altos teores de N acumulados no tecido vegetal no estágio da sexta folha completamente expandida. Porém, para baixos valores de NDVI, observa-se que o N acumulado no tecido é baixo e, conseqüentemente, deverá receber uma dose maior de N, ou seja, doses próximas a 140 kg N ha⁻¹. Desta forma, o algoritmo tem por objetivo distribuir de uma melhor maneira o N que seria aplicado com dose fixa em toda

área, o que promove o melhor aproveitamento do N pelas plantas, maximiza o rendimento de grãos e reduz a contaminação ambiental.

Um aspecto importante que deve ser destacado é que o algoritmo construído considera a eficiência na absorção e as perdas de N, ou seja, o algoritmo considera que o valor 70% como coeficiente de eficiência do nutriente (N) aplicado no solo (Malavolta *et al.*, 1997). A recomendação para minimizar as perdas e melhorar a absorção de N pelas plantas é sempre realizar a adubação em cobertura antes de uma precipitação pluvial (próximo a 20 mm), a fim de incorporar o N no solo, deixando próximo ao sistema radicular, permitindo rápida absorção (Menegati, 2013).

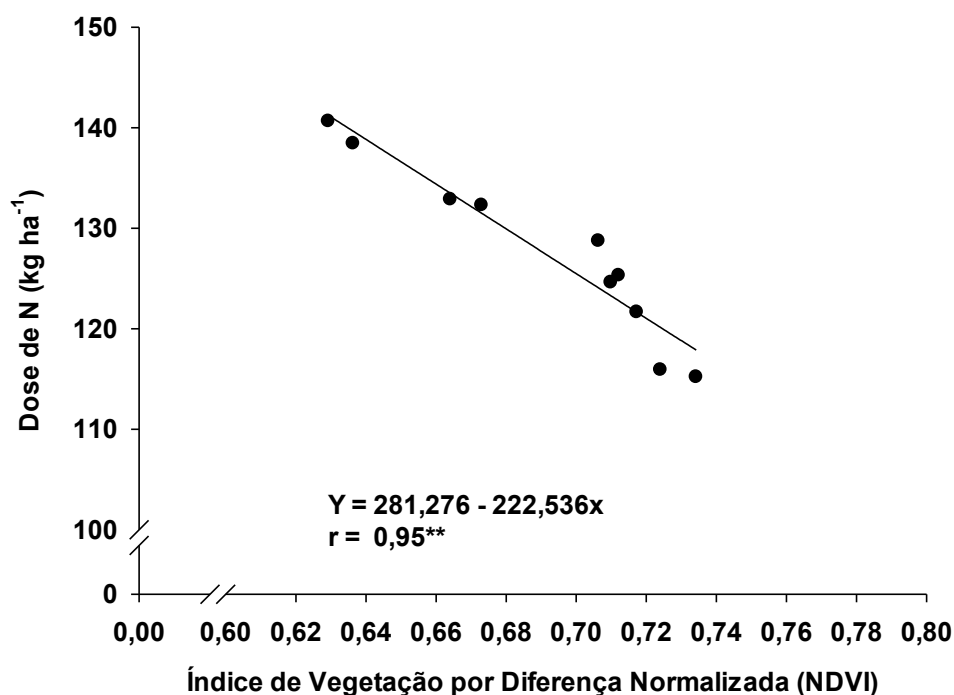


FIGURA 5. Algoritmo de adubação nitrogenada em cobertura no estágio de seis folhas completamente expandidas em função do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). Embrapa Trigo, 2016. ** Significativo a $p < 0,01$.

Como forma de evitar problemas como desperdícios de N aplicado em áreas com poucas plantas, características da cultivar em relação ao acamamento, a dose de máxima eficiência econômica ou aplicação de pouco N em áreas com muitas plantas, adicionou-se limites máximo e mínimo, conhecido como “*cut off*”, os quais são apresentados na Figura 6. Observa-se que, no caso de valores de NDVI abaixo de 0,62, deve-se limitar a dose a ser aplicada, pois, com esse valor de NDVI, atinge-se uma dose muito alta a ser aplicada (141 kg N ha^{-1}), considerada uma dose de máxima resposta pelas plantas. Recomenda-se a utilização do algoritmo até o NDVI de 0,55, que representa as plantas que não recebem adubação nitrogenada na semeadura.

Assume-se que, para valores de $\text{NDVI} \leq 0,62$ a dose ficará fixa a 141 kg N ha^{-1} até o $\text{NDVI} = 0,55$, enquanto que, para valores abaixo de 0,55, deve-se reduzir a dose de N a ser aplicado. Valores de NDVI acima que $\geq 0,62$ indicam a dose de aplicação a partir da prescrição do algoritmo, até o valor de $\text{NDVI} = 1,00$. A variação da dose de N a ser aplicado foi de 141 kg N ha^{-1} para o $\text{NDVI} = 0,62$ até 59 kg N ha^{-1} para o $\text{NDVI} = 1,00$.

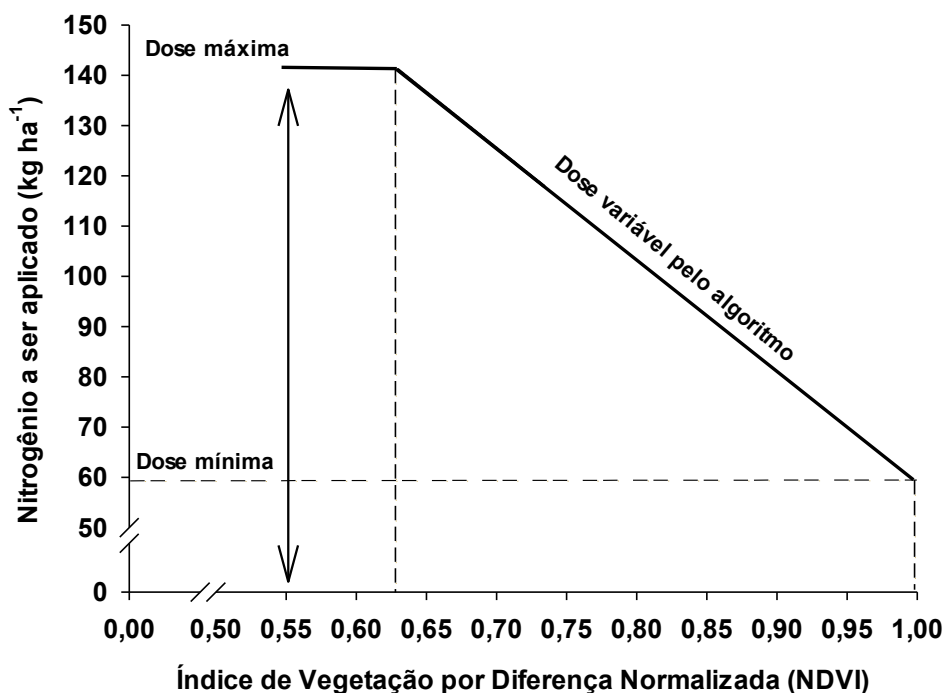


FIGURA 6. Algoritmo de adubação nitrogenada em cobertura de trigo no estágio de seis folhas completamente expandidas pelo Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).

O desenvolvimento de algoritmos para a adubação nitrogenada robustos, com praticidade e eficientes é discutido por diversos autores e para diferentes culturas no Brasil e no mundo, e são cada vez mais utilizados a campo. No entanto, é fundamental utilizar variáveis regionais para o desenvolvimento e validação desses modelos, caracterizando as variáveis edafoclimáticas da região de cultivo. Shiratsuchi *et al.* (2014) desenvolveu um algoritmo de adubação em cobertura para a cultura do milho utilizando os índices de vegetação e a exportação média de N pelos grãos, realizando apenas a reposição do N exportado via algoritmo, para a região do cerrado brasileiro. Trevisan (2016) desenvolveu algoritmo de adubação nitrogenada em cobertura para a cultura do algodão, baseado em sensores de vegetação. Turra (2016) desenvolveu método de aplicação de N em cobertura para

a cultura do trigo em relação a dose de máxima eficiência técnica usando o Índice de vegetação por diferença normalizada.

5.4 CONCLUSÃO

A resposta espectral do trigo a partir de valores de NDVI para a estimativa da quantidade de N acumulado no tecido, mostra que a geração do algoritmo baseado em dados relacionando a quantidade de N e NDVI.

O algoritmo proposto ($y = 281,276 - 222,536 \text{ NDVI}$) apresenta potencial de recomendação de adubação nitrogenada em cobertura, pois permite uma distribuição mais adequada da dose de N na área do que a utilização de dose fixa.

O algoritmo proposto apresenta facilidade de implementação a campo, devido à relação da quantidade de N na parte aérea com os valores de NDVI, conferindo um modelo simples para a indicação de N a taxa variada na cultura do trigo, utilizando sensor ativo de vegetação.

5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADO, T.J.C. Projeto Aquarius: principais contribuições e resultados. In: SANTI, A. L. **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: CESPOL, 2016. p.9-26.

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

BREDEMEIER, C. **Predição da necessidade de nitrogênio em cobertura em trigo e aveia**. 1999. 101 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BREDEMEIER, C.; VIAN, A.L.; PIRES, J.L.F. Aplicação de nitrogênio em tempo real: modelos e aplicações. In: SANTI, A. L. **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: CESPOL, 2016. p.137-158.

FLOWERS, M.R. et al. Field validation of a remote sensing technique for early nitrogen application decisions in wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v.95, p.167-176, 2003.

HAUN, J. R. Visual quantification of wheat development. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, p. 116-119, 1973.

HOLLAND, K. Y J. SCHEPERS. Use of a virtual-reference concept to interpret active canopy sensor data. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.14, n.1, p.71-85, 2013.

INMET. **Normais Climatológicas**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>.

Acesso em: 26 fev. 2016.

LARGE, E.C. Growth stages in cereals: illustration of the feekes scale. **Plant Pathology**, Oxford, v.3, p 128-129, 1954.

LÉON, L. Sensores de nitrógeno para la medición y aplicación em el cultivo em tiempo real. In: MANTOVANI, E. C.; MAGDALENA, C. **Manual de agricultura de precisión**. Montevideo: Procisur, 2014. p.148-159.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas, princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MENEGATI, G.B. **Estratégias de manejo para minimizar estresse por deficiência hídrica e para potencializar rendimento de grãos em milho sob condições de irrigação**. 2013. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós - Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

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

POVH, F.P. et al. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais.

Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.43, n.8, p.1075 - 1083, 2008.

RAUN, W. R. et al. Optical sensor based algorithm for crop nitrogen fertilization.

Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, v. 36, n. 19/20, p. 2759-2781, 2005.

REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE,

10., 2016, Londrina. **Informações técnicas para trigo e triticale**: safra 2017.

Brasília: EMBRAPA, 2017. 240 p.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja**:

estudo de caso no Rio Grande do Sul. 2004. 214 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004.

ROBERSON, G.T. **Map based vs. sensor based nitrogen application**

technology. 2013. Disponível em: <http://www.infoag.org/abstract_papers/papers/abstract_145>. Acesso em: 10 fev. 2018.

SCHMIDT, J. et al. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using

an active sensor. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.120, n.1, p. 94 - 101, 2011.

SHANAHAN, J. et al. Responsive in-season nitrogen management for cereals.

Computers and Electronics in Agriculture, New York, v. 61, n. 1, p.51-62, 2008.

SHIRATSUCHI, L.S. et al. Algoritmo para aplicação de doses variáveis de nitrogênio em tempo real para produção de milho safra e safrinha no cerrado. In:

BERNARDI, A. C. de C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2014. p. 224-230.

SHIRATSUCHI, L.S. et al. Desenvolvimento de um algoritmo baseado em sensores ativos de dossel para recomendação da adubação nitrogenada em taxas variáveis. In: INAMASU, R. Y. et al. **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: EMBRAPA Instrumentação, 2011a. p. 184-188.

STRECK, E.V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R.C.D. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER-RS, 2008. 222 p.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TREVISAN, R.G. **Sensores ativos de dossel na gestão da adubação nitrogenada e da aplicação de fitorreguladores no algodoeiro**. 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

TURRA, M.A. **Manejo do nitrogênio em cultivares de trigo baseado no índice de vegetação por diferença normalizada (ndvi)**. 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

VARVEL, G.E. et al. An algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index. **Agronomy Journal**. Madison, v.99, p. 701 - 706, 2006.

WIETHÖLTER, S. Fertilidade do solo e a cultura do trigo no Brasil. In: PIRES, J.L.F.; VARGAS, L.; CUNHA, G.R. da. **Trigo no Brasil**: bases para produção competitiva e sustentável. Passo Fundo, RS: EMBRAPA Trigo, 2011. p.135–

184.

ZADOKS, J.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.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de sensores de vegetação na agricultura brasileira e, principalmente, na região sul do Brasil tornou-se uma realidade. Desta forma, o desenvolvimento de tecnologias locais para implementação destas ferramentas a campo são necessárias. O Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) obtido pelos sensores apresenta associação significativa com a biomassa acumulada na parte aérea, possibilitando estimar o desenvolvimento e a demanda nutricional das plantas. Desta forma, o NDVI viabiliza a adubação nitrogenada em taxa variável, permitindo o ajuste da dose de N aplicada em diferentes áreas da lavoura.

Os algoritmos propostos no presente trabalho apresentam potencial de recomendação de adubação nitrogenada em cobertura a taxa variada, pois permitiram distribuição mais adequada da dose de N na área, em relação à forma tradicional de aplicação de dose uniforme (taxa fixa). O emprego destes algoritmos de adubação nitrogenada em cobertura para trigo e milho resultaram em rendimento de grãos igual ou superior à forma tradicional de recomendação de N.

Os algoritmos apresentam facilidade de implementação a campo, devido à relação direta do índice de suficiência de N (ISN) e do NDVI com a condição

nutricional das plantas, possibilitando aplicar N a taxa variada utilizando sensor ativo de vegetação nas culturas de milho e trigo.

Esses estudos serviram para gerar conhecimento técnico-científico, aporte técnico para produtores rurais que utilizam sensores de vegetação e para embasar as futuras melhorias nos algoritmos de adubação nitrogenada em cobertura a taxa variada.

7 VITA

André Luis Vian, nascido em 27 de outubro de 1989 no município de Seberi, Rio Grande do Sul, Brasil, é filho de Ary Luiz Vian (*in memoriam*) e Soeli Candaten Vian.

No ano de 2005, iniciou os estudos no Colégio Agrícola de Frederico Westphalen (CAFW-UFSM), vinculado à Universidade Federal de Santa Maria, formando-se em técnico em agropecuária em 2007. Durante este período, obteve experiências em todos os setores da agricultura e da agropecuária, realizando estágio e monitoria nos setores de jardinocultura e fruticultura. No ano de 2008, ingressou no Curso de Agronomia da Universidade Federal de Santa Maria, Campus de Frederico Westphalen (CESNORS), graduando-se Engenheiro Agrônomo em 2012. Durante este período, atuou em diferentes áreas de iniciação científica, como climatologia, fisiologia vegetal, melhoramento genético, herbologia, uso e manejo do solo e agricultura de precisão.

Em 2013, ingressou no Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), obtendo o título de Mestre em Fitotecnia com ênfase em fisiologia e manejo vegetal, no ano de 2015. No ano de 2015, ingressou no Curso de Doutorado do Programa de Pós-

Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), na área de Sistemas de Produção Vegetal.

Tem como linhas de pesquisa agricultura de precisão, sensores de reflectância e ecofisiologia e manejo de plantas de lavoura.