

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

USO DE FERRAMENTAS DE AGRICULTURA DE PRECISÃO NAS CULTURAS
DA SOJA E DO TRIGO

Carolina Trentin
Engenheira agrônoma/UFSM

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

Porto Alegre (RS), Brasil
Setembro, 2019

CAROLINA TRENTIN
Engenheira Agrônoma - UFSM

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM FITOTECNIA

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

Aprovado em: 16.07.2019
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 11.12.2020
Por

CHRISTIAN BREDEMEIER
Orientador - PPG Fitotecnia
UFRGS

CHRISTIAN BREDEMEIER
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia

ANDRÉ LUIS VIAN
PPG Fitotecnia/UFRGS

DANIELLE ALMEIDA
Instituto Rio-Grandense do Arroz

PAULO REGIS FERREIRA DA SILVA
Instituto Rio-Grandense do Arroz

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade de
Agronomia

“We’re in a maze, not a highway; there is nowhere that speed alone can take us”.
Julie Deghani

Aos meu pais Paulo e Marina Trentin,
para que ao lerem seus nomes nesta
obra, sintam todo o amor e admiração
que lhes tenho!

OBRIGADA!

USO DE FERRAMENTAS DE AGRICULTURA DE PRECISÃO NAS CULTURAS DE SOJA E TRIGO¹

Autora: Carolina Trentin

Orientador: Christian Bredemeier

RESUMO

As tecnologias têm proporcionado aumentos consideráveis na produção agrícola brasileira e mundial. Com a adoção da agricultura de precisão (AP), têm-se um aumento no ganho, tanto econômico quanto sustentável. O objetivo deste trabalho foi testar diferentes sensores de vegetação e plataformas para aquisição de dados em áreas nas culturas da soja e trigo. Foram conduzidos dois experimentos. O primeiro, com a cultura da soja em diferentes zonas de manejo, implantado na Fazenda Vila Morena (Boa Vista das Missões, RS), nos anos 2016/17 e 2017/18. Para as avaliações utilizou-se o sensor CropCircle[®] em diferentes estádios da cultura, bem como se avaliou os componentes de rendimento ao final do ciclo da mesma. O segundo experimento, com a cultura do trigo, foi implantado na EEA/UFRGS (Eldorado do Sul, RS), nos anos 2017 e 2018. Os tratamentos consistiram em diferentes doses de N na base e em cobertura, onde se avaliou diferentes índices de vegetação com o GreenSeeker[®] e com o Veículo aéreo não tripulado modelo DJI Matrice[®], carregando uma câmera Sequoia Parroth[®], além da biomassa e dos componentes de rendimento. Observou-se que os índices de vegetação aumentaram conforme as plantas, tanto de soja quanto de trigo, avançavam em seu estágio fenológico, porém a maioria destes chegava em um ponto de saturação, em geral quando as plantas estavam no estágio reprodutivo. A soja não mostrou diferença entre as zonas de manejo para ambos os anos, e a cultura do trigo incrementou sua produtividade com o aumento nas doses de N. Conclui-se que as ferramentas disponíveis utilizadas na AP são de fundamental importância para a avaliação de diferentes culturas a campo, a fim de melhorar a eficiência nos manejos adotados, bem como na estimativa da produtividade da mesma.

¹Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (83f.) Setembro, 2019.

USE OF PRECISION AGRICULTURE TOOLS IN SOYBEAN AND WHEAT CROPS¹

Author: Carolina Trentin
Adviser: Christian Bredemeier

ABSTRACT

The technologies have provided considerable increases in Brazilian and world agricultural production. With the adoption of precision agriculture (PA), there is an increase in both economic and sustainable gain. The objective of this work was to test different vegetation sensors and platforms for data acquisition in soybean and wheat crop areas. Two experiments were conducted. The first, with soybean cultivation in different management zones, implemented at Vila Morena Farm (Boa Vista das Missões, RS), in 2016/17 and 2017/18. CropCircle® sensor was used for the evaluations at different stages of the culture, and the yield components were evaluated at the end of the crop cycle. The second experiment, with the wheat crop, was implemented at EEA / UFRGS (Eldorado do Sul, RS), in 2017 and 2018. The treatments consisted of different doses of N in the base and cover, where different rates of GreenSeeker® and DJI Matrice® Unmanned Aerial Vehicle, carrying a Sequoia Parroth® camera, biomass and yield components. Vegetation indices increased as soybean and wheat plants advanced in their phenological stage, but most of them reached a saturation point, usually when the plants were in the reproductive stage. Soybean showed no difference between management zones for both years, and wheat crop increased its yield with increasing N rates. It is concluded that the available tools used in PA are of fundamental importance for the evaluation of different yields. field crops, in order to improve the efficiency in the adopted managements, as well as to estimate the productivity of the same.

¹Master Dissertation in Plant Science, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (83p.) Setembro, 2019.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Cultura da soja.....	3
2.2 Cultura do trigo	3
2.3 Importância do nitrogênio (N) para a cultura do trigo.....	4
2.4 Agricultura de Precisão (AP)	4
2.5 Unidades de manejo diferenciado	5
2.6 Sensoriamento remoto e sensores de vegetação.....	6
2.7 Veículos aéreos não tripulados (VANTs).....	8
2.8 Referências.....	11
3 CAPÍTULO 1	15
Desempenho da cultura da soja em diferentes zonas de manejo	15
3.1 INTRODUÇÃO.....	16
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	17
3.2.1 Localização e caracterização da área de estudo	17
3.2.2 Caracterização do estudo (unidades de manejo)	18
3.2.3 Tratos culturais.....	20
3.2.4 Variáveis analisadas	20
3.2.5 Análise estatística	22
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
3.4 CONCLUSÕES.....	32
3.5 REFERÊNCIAS	32
4 CAPÍTULO 2.....	35
Efeito da variabilidade de nitrogênio no desenvolvimento e na produção de grãos na cultura do trigo cultivado sob soja	35
4.1 INTRODUÇÃO.....	36
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	37
4.2.1 Localização e características da área de estudo	37
4.2.2 Variáveis analisadas	39
4.2.3 Análise estatística	40
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.4 CONCLUSÃO	48
4.5 REFERÊNCIAS	48
5 CAPÍTULO 3.....	51
Índices de vegetação obtidos por veículo aéreo não tripulado (VANT) e sua relação com a produtividade de grãos e biomassa de parte aérea para a cultura do trigo	51
5.1 INTRODUÇÃO.....	52
5.2 MATERIAL E MÉTODOS	53
5.2.1 Localização e características da área de estudo	53
5.2.2 Delineamento experimental e Tratamentos	53

	Página
5.2.3 Tratos Culturais	54
5.2.4 Variáveis analisadas	55
5.2.5 Análise estatística	58
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.4 CONCLUSÕES.....	67
5.5 REFERÊNCIAS	67
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO 1	
1. Datas de avaliações do estudo no campo e seus respectivos estádios fenológicos.....	20
2. Valores dos componentes de rendimento para as UMD, nas safras 2016/17 e 2017/18.....	26
3. Correlação entre legume m ² (LM), grãos legume ⁻¹ (GL), peso de mil grãos (MG), produtividade de grãos (PROD), número de ramos (R), legumes com zero grão m ² (LZG), legumes com um grãos m ² (LUG), legumes com dois grãos m ² (LDG), legumes com três grãos m ² (LTG) e legumes com quatro grãos m ² (LQG), para o ano agrícola de 2016/2017, nas UMD de alta (A), baixa (B) e média (M).	30
4. Correlação entre legume m ² (LM), grãos legume ⁻¹ (GL), peso de mil grãos (MG), produtividade de grãos (PROD), número de ramos m ² (R), legumes com zero grão m ² (LZG), legumes com um grãos m ² (LUG), legumes com dois grãos m ² (LDG), legumes com três grãos m ² (LTG) e legumes com quatro grãos m ² (LQG), para o ano agrícola de 2017/2018, nas UMD de alta (A), baixa (B) e média (M)	32
CAPÍTULO 2	
1. Tratamentos com diferentes doses de N (kg ha ⁻¹) aplicados na base e as doses de N (kg ha ⁻¹) aplicados em cobertura em ambas as safras agrícolas.....	39
2. Análise de Correlação linear de Pearson para as variáveis NDVI, Biomassa no Florescimento (BF), Nitrogênio no tecido (N) e Produtividade, na safra 2017.....	47
3. Análise de Correlação linear de Pearson para as variáveis NDVI, Biomassa no Florescimento (BF), Nitrogênio no tecido (N) e Produtividade, na safra 2018.....	47
CAPÍTULO 3	
1. Tratamentos com diferentes dosagens de N (kg ha ⁻¹) na base, com suas respectivas doses de N (kg ha ⁻¹) em cobertura, para os anos safra de 2017.....	54
2. Índices de vegetação calculados com base nas imagens da câmera Sequoia Parrot ®.....	56
3. Índices de vegetação calculados com base nas imagens da câmera Zenmuse X3® (RGB).....	57
4. Correlação de Pearson entre diferentes índices de vegetação obtidos pela câmera Sequoia com o NDVI obtido com o sensor Greenseeker, biomassa da parte aérea no florescimento (BF) e produtividade (PROD), nas cultivares de trigo TBIO Toruk e BRS Parrudo.....	59

5. Correlação de Pearson entre diferentes índices de vegetação obtidos pela câmera RGB com NDVI do sensor Greenseeker, biomassa do florescimento e produtividade.....	61
---	----

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
1. Curva de reflectância da vegetação. Adaptado de Moreira (2011)	10
CAPÍTULO 1	
1. Temperaturas máximas e mínimas e nebulosidade durante as safras 2016/17 e 2017/18.....	18
2. Definição das UMD na área do estudo (Damian, 2017)	19
3. Rendimento de grãos de soja em diferentes zonas de manejo nos anos agrícolas 2016/17 e 2017/18.....	22
4. Árvore de decisão para produtividade nas zonas de manejo nos anos agrícolas 2016/17 e 2017/18.....	24
5. Valores de NDVI e NDRE em diferentes estádios fenológicos, nas diferentes zonas de manejo para os anos agrícolas de 2016/17 e 2017/18.....	28
6. Teor de clorofila total para cada zona de manejo nos diferentes estádios fenológicos da cultura, no ano agrícola 2017/18.....	29
CAPÍTULO 2	
1. Temperaturas máxima e mínima, e precipitação pluvial para as safras 2017 e 2018 na EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS.....	38
2. Produtividade de grãos (kg ha^{-1}), para as cultivares BRS Parrudo e TBIO Toruk, nas safras de 2017 e 2018, em função de diferentes doses de N na base e em cobertura.....	41
3. Análise de regressão entre as doses totais e a produtividade das cultivares TBIO Toruk e BRS Parrudo, nas safras 2017 e 2018.....	43
4. Biomassa no estágio fenológico de V6 em função das doses de N, para as cultivares TBIO Toruk e BRS Parrudo, nas safras 2017 e 2018.....	45
5. Biomassa no estágio fenológico de florescimento, para as cultivares TBIO Toruk e BRS Parrudo, para as safras 2017 e 2018, em função das diferentes doses de N.	46
CAPÍTULO 3	
1. Análise de regressão entre o índice NDVI obtido pelo sensor Greenseeker e a produtividade de grãos para as cultivares BRS Parrudo (a) e TBIO Toruk (b).....	62
2. Análise de regressão entre a produtividade de grãos e os índices NDVI VANT (a) SAVI (b) e ExcRV (c), para a cultivar BRS Parrudo, e; índices NDVI VANT (d) SAVI (e) e ExcRV (f), para a cultivar TBIO Toruk. Sendo que NDVI VANT foi obtido com a câmera Sequoia e os demais com câmera RGB.....	64
3. Análise de regressão entre a biomassa no florescimento e os índices IFV (a) Excesso de RE e V (b) e IDDM (c), para a cultivar BRS Parrudo, e; IFV (d)	

	Página
Excesso de RE e V (d) e IDDM (f), para a cultivar TBIO Toruk. Sendo que IDDM foi obtido com a câmera Sequoia e os demais com câmera RGB.....	66

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alimentos, impulsiona a agricultura em termos tecnológicos e de manejo. A agricultura de precisão (AP) é uma das áreas que mais tem modernizado e desenvolvido o setor agropecuário na última década. Alguns instrumentos relacionados à AP possibilitaram aumentos significativos na produtividade, como o uso de mapas que apresentam as variabilidades nas áreas de cultivo, a aplicação de insumos em taxa variável, o emprego de mapas de produtividade e o monitoramento, em tempo real, das condições nutricionais das plantas (Santi *et al.*, 2013). Observar o desempenho das culturas sobre as zonas de manejo é de fundamental importância para que se possam aplicar as práticas mais adequadas nas diferentes áreas de uma lavoura. A utilização do manejo de plantas levando em conta os sítios específicos, como é o caso da aplicação de insumos em taxa variável, é uma das metodologias que auxiliam na economia dos mesmos, além de contribuir para a diminuição dos impactos da agricultura sobre o meio ambiente.

O sensoriamento remoto (SR) é outra ferramenta que pode auxiliar os produtores no aumento das produtividades nas áreas de cultivo. Este tem sido mencionado como uma alternativa aos atuais métodos de criação dos mapas de produtividade, além de poder ser utilizado para o monitoramento de lavouras em tempo real. A produtividade de uma cultura, estimada por sensores, é baseada no cálculo de índices de vegetação (IV), que indicam as condições nutricionais das plantas (Araujo,

Vettorazzi & Molin, 2005). A partir dessas informações, pode-se manejar de forma diferenciada a cultura, como o aumento dos cuidados com o manejo das culturas em áreas que apresentam maiores demandas (Moraes, 2008).

Dentro do SR os veículos aéreos não tripulados (VANTs) apresentam muitas aplicações na agricultura. Segundo Rathje & Franke (2016), os sensores transportados pelos VANTs captam os diferentes comprimentos de onda eletromagnética que são refletidos pelas plantas. A partir destas ondas refletidas, são coletados os valores referentes a cada ponto da lavoura, que então serão utilizados para determinação dos valores dos diferentes índices de vegetação.

Desta maneira, estudar as diferentes ferramentas que a AP disponibiliza é de fundamental importância para a maximização dos ganhos que a utilização dessas novas técnicas pode proporcionar aos técnicos de campo e aos produtores. As tecnologias disponíveis para as lavouras precisam auxiliar no aumento de produtividade, bem como no uso mais racional de insumos, visando reduzir o impacto ambiental e aumentar o retorno econômico da atividade agrícola.

Assim, a utilização de sensores de vegetação proximais e orbitais na agricultura contribui para o melhor entendimento do potencial produtivo das culturas. Os objetivos do trabalho foram: a) avaliar o desempenho da cultura da soja em diferentes zonas de manejo, definidas com base em sensores de vegetação proximais e produtividade de grãos; b) verificar a relação entre os índices de vegetação fornecidos pelos sensores e a produtividade de grãos e a biomassa de parte aérea da cultura do trigo; e, c) analisar a eficiência dos sensores de vegetação, acoplados a VANTs, em estimar a produtividade de grãos e a biomassa de parte aérea de trigo, utilizando diferentes doses de nitrogênio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultura da soja

A soja (*Glycine max*) é a principal cultura agrícola no Brasil e no mundo, em função de suas características nutricionais e de seu alto potencial produtivo. Essas especificidades conferem à cultura grande número de usos, principalmente na alimentação humana e animal (Gomes, 2007). A área semeada de soja no Brasil, na safra 2018/2019, foi de quase 36 milhões de hectares (ha), um aumento de 1,8% em relação ao levantamento anterior (CONAB, 2019). O aumento na área de cultivo ocorreu principalmente pela inserção das áreas de pastagens. A expansão da cultura no Brasil está relacionada aos avanços tecnológicos e científicos do setor agropecuário. O desenvolvimento de máquinas mais eficientes, que diminuem as perdas na colheita e aplicam de maneira mais eficiente os insumos, o desenvolvimento de cultivares com maior potencial produtivo e novas tecnologias para o manejo das culturas, como as resistências à pragas e doenças, têm sido os responsáveis pela promoção desses incrementos (Freitas, 2011).

2.2 Cultura do trigo

A produtividade do trigo cresceu em função do manejo adotado na cultura, principalmente relacionado à adubação, pelos avanços no melhoramento genético, bem como pela possibilidade de abertura de novos mercados consumidores. Estes proporcionaram um incremento médio de 2657 kg ha⁻¹ no ano de 2018 (Brum & Müller, 2008; CONAB, 2019). Entretanto, já foram obtidas produtividades superiores a 5000 kg ha⁻¹ quando a cultura foi submetida a altas doses de adubação nitrogenada, acima de 180

kg N ha⁻¹, em regiões do centro-oeste brasileiro (Boschini, 2010; Nunes, 2015). Segundo Boschini (2010), entretanto, a adubação representa um dos maiores custos com a cultura, logo, esta deve ser realizada de maneira eficiente e sustentável.

2.3 Importância do nitrogênio (N) para a cultura do trigo

Para que se atinjam os tetos de produtividade de uma cultura, é necessária a utilização não somente de cultivares que possuam alto potencial produtivo, mas também que o manejo da adubação seja realizado de forma correta (Filho *et al.*, 2010). O uso de fertilizantes nitrogenados é fundamental, pois o N é o mais requerido pelas plantas, uma vez que está envolvido em inúmeras funções metabólicas e fisiológicas, além de ser um importante constituinte celular (Taiz *et al.*, 2017).

A utilização do nitrogênio está diretamente relacionada ao crescimento e ao desenvolvimento da cultura. A utilização de fertilizantes nitrogenados influencia a quantidade do nutriente presente nas folhas e os teores de clorofila, visto que o mesmo é um importante constituinte da molécula, e proporciona aumento o número de espigas (Filho *et al.*, 2010).

Ao longo de seu ciclo, as plantas possuem diferentes demandas nutricionais. A disponibilidade dos nutrientes no solo, e principalmente fatores relacionados à fisiologia da planta, ditam a marcha de absorção (Bredemeier & Mundstock, 2000). Logo, saber manejar de forma consciente este recurso pode resultar em incremento significativo de produtividade.

2.4 Agricultura de Precisão (AP)

Os avanços na tecnologia permitiram a modernização na agricultura, assim, as propriedades rurais cada vez mais estão se transformando em empresas agrícolas. Estas são gerenciadas e manejadas de diferentes formas, de acordo com suas características específicas. A AP traz inúmeras vantagens dentro dos sistemas produtivos, como a redução de custos, eficiência e velocidade na tomada de decisão, incremento na produtividade e

possível diminuição no uso de insumos (Tschiedel & Ferreira, 2002), além de reduzir os impactos ambientais causados pela agricultura.

As novas tecnologias disponíveis para a agricultura auxiliam o produtor nas coletas, análises e no processamento de um grande volume de dados relativos à sua propriedade, muitas vezes em tempo real, com o auxílio de sensores e outras ferramentas (Corassa, 2015). Além dos avanços relacionados às inovações tecnológicas, a AP se relaciona também ao maior controle das atividades realizadas dentro da propriedade e de sua organização (Bernardi, 2014), que também contribuem para maiores produtividades e, conseqüentemente, maior lucratividade.

A aplicação de fertilizantes, principalmente do nitrogênio, em taxa variada, utilizando tecnologias de sensoriamento remoto, já é uma realidade (Bragagnolo, 2013). Essas aplicações em tempo real são possíveis pela ação de sensores que conseguem captar, por meio de refletância, as propriedades espectrais das folhas, que estão relacionadas ao estado nutricional da planta e, dessa forma, verificando a necessidade e, em seguida, realizando a aplicação em maiores ou menores quantidades de fertilizante nitrogenado.

Um dos maiores desafios da AP nos últimos anos têm sido aperfeiçoar o uso de mapas de produtividade e de solos e as demais informações que são coletadas nas áreas de produção.

Cruzando-se essas diferentes informações, obtidas temporal e espacialmente pode-se definir zonas de produtividade, onde é possível identificar áreas limitantes e conseqüentemente o melhor manejo para elas.

2.5 Unidades de manejo diferenciado

As unidades de manejo diferenciado (UMD) são áreas dentro de talhões de cultivo, que possuem semelhanças em alguns fatores, de solo, tais como condutividade elétrica do solo, pH, matéria orgânica, textura, estrutura e agregação, compactação; e/ou de

planta, como índices de vegetação e produtividade de grãos e de biomassa de parte aérea. (Alves *et al.*, 2013; Damian, 2017; Junior Luchiari *et al.* 2011; Santi *et al.*, 2013; Valente, 2010).

A utilização de mapas de produtividade para caracterizar as UMD em locais de baixo, médio e de alto potencial produtivo presente em uma área de cultivo foi a primeira ferramenta de agricultura de precisão que chegou ao Brasil. Atualmente, os sensores de produtividade estão presentes na maioria das colhedoras, gerando informações relevantes para o produtor, que, por meio de monitores, podem definir unidades de maior e menor produtividade no talhão, além de acompanhar as possíveis perdas que ocorrem durante o processo (Corassa, 2015). As decisões baseadas em UMD devem levar em consideração não somente a variabilidade espacial da área, mas também a existência de variabilidade temporal. Junior Luchiari *et al.* (2011) observaram que as UMD de alta produtividade apresentavam produtividades consideradas baixas em um de cada cinco anos. Ainda, segundo os autores, alguns atributos físicos do solo que caracterizam as diferentes UMD em uma área, são responsáveis pelos incrementos de produtividade de uma cultura. Os atributos físicos do solo estão relacionados à umidade, à disponibilidade de nutrientes para as plantas, e também ao desenvolvimento do sistema radicular da mesma.

Uma das vantagens da utilização de UMD é a possibilidade de aplicação de insumos em taxa variável, utilizando somente a quantidade de insumos necessária para uma região específica. Essa técnica aumenta a eficiência na utilização dos recursos naturais e diminui os impactos ambientais causados pela agricultura (Junior Luchiari *et al.*, 2011). O mapeamento do desenvolvimento das plantas ao longo de seu ciclo é importante para o manejo nutricional das mesmas. A divisão e a delimitação de áreas que possuem diferentes necessidades de cada elemento, levam a realização da prática de adubação de maneira mais eficiente, economicamente viável e sustentável (Chung *et al.*, 2018).

2.6 Sensoriamento remoto e sensores de vegetação

O sensoriamento remoto começou a ser utilizado na agricultura a partir da década de 1990, quando as pesquisas passaram a estudar não somente o mapeamento e a identificação da vegetação, mas também outros parâmetros como índice de área foliar e biomassa de plantas. Os sensores de vegetação mensuram a reflectância da radiação dos pigmentos e dos componentes das folhas. Sensores que medem a quantidade de radiação refletida pelas plantas em relação à radiação que foi emitida por ela, são conhecidos como sensores ativos. Já quando o sensor depende da emissão de radiação de outra fonte de energia, como a solar, este é conhecido como passivo (Erdle, Mistele & Schmidhalter, 2011).

As interações entre a radiação eletromagnética e a folha dependem dos componentes químicos, como pigmentos e água, além dos componentes estruturais e de organização de tecidos. Os comprimentos de ondas absorvidos pelas folhas variam de acordo com os componentes específicos, por exemplo, ondas da região do visível ($0,4 \mu\text{m} - 0,72 \mu\text{m}$) são referentes à reflectância dos pigmentos fotossintetizantes; já as ondas da região do infravermelho próximo ($0,72 \mu\text{m} - 1,1 \mu\text{m}$) referem-se à interação da energia com as estruturas do mesófilo, basicamente a biomassa (Ponzoni; Shimabukuro & Kuplich, 2012).

A capacidade dos sensores em captar diferenças na reflectância das plantas em seus diferentes estádios de crescimento é um dos maiores determinantes para a eficácia na utilização de taxas variáveis de adubos, principalmente de nitrogênio (Bragagnolo, Amado & Bortolotto, 2016). Índices de vegetação obtidos por sensores ópticos relacionam-se fortemente com o estado nutricional e também com os teores de matéria seca da cultura do milho (Bragagnolo, Amado & Bortolotto, 2016). A utilização de adubação nitrogenada em taxas variáveis, baseada em informações obtidas com o auxílio de sensores de vegetação, mostraram maior absorção do fertilizante no milho, se comparadas a adubações realizadas em taxa fixa (Bragagnolo *et al.*, 2013).

A utilização de ferramentas que estimem a quantidade de biomassa da parte aérea e a quantidade absorvida de nitrogênio pode fornecer informações sobre o potencial produtivo da cultura. Logo, a quantificação destas variáveis a campo em diferentes estádios fenológicos da cultura é importante, pois pode ajudar o produtor na tomada de decisão, como na aplicação de fertilizantes nitrogenados, e de fungicidas e em outras práticas de manejo que visam o aumento na produtividade (Elarab *et al.*, 2015). Alguns índices coletados pelos sensores, em tempo real, são amplamente utilizados, como é o caso do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI - Normalized difference vegetation index). Este índice é obtido a partir da relação entre a reflectância na faixa espectral do infravermelho próximo (NIR) e a reflectância na faixa espectral do vermelho (R), $[(NIR - R)/(NIR + R)]$. O NDVI pode assumir valores entre -1 a +1, sendo que os valores positivos se relacionam ao vigor vegetativo da cultura, enquanto que os valores negativos apontam presença de solo sem cobertura ou ausência de vegetação (Liu, 2006).

Os índices de vegetação, como o NDVI, podem ser empregados na detecção de plantas invasoras nas áreas de cultivo (Junior Merotto *et al.*, 2012), para estimar a produtividade de biomassa e de grãos (Schaefer & Lamb, 2016; Sanodiya *et al.*, 2017), além de serem utilizados para aplicação de nitrogênio em taxa variável (Arnall *et al.*, 2016). Logo, a partir deste índice de vegetação, é possível realizar o manejo específico e direcionado nas áreas.

2.7 Veículos aéreos não tripulados (VANTs)

VANTs são plataformas que possuem sensores acoplados em sua estrutura, em geral câmeras digitais, que auxiliam na coleta de dados relativos às áreas de cultivo (Araújo, Vettorazzi & Molin, 2005). O uso de câmeras facilita a obtenção de imagens que possuem elevada resolução espacial e temporal, visto que a coleta de dados pode ser realizada a qualquer momento durante o desenvolvimento da cultura (Logie & Coburn, 2018).

As câmeras transportadas pelos VANTs podem ser divididas, conforme a região do espectro eletromagnético que captam (Figura 1). Câmeras RGB referem-se às câmeras que captam os comprimentos de onda na região do visível, R (vermelho, 630-700 nm), G (verde, 490-560 nm) e B (azul, 440-490 nm). Câmeras multiespectrais assimilam até dez espectros de onda, em geral as ondas RGB ou Red Edge (700-750 nm), mais o infravermelho próximo (760-1200 nm). Já os sensores hiperespectrais conseguem captar diversos comprimentos de onda (Colomina & Molina, 2014).

O emprego de VANTs na agricultura tornou-se uma alternativa ao uso de imagens obtidas por satélites, em que as principais vantagens são a elevada resolução temporal, uma vez que os vôos podem ser realizados quando o responsável desejar ou quando houver a necessidade de maiores informações sobre a cultura ou área de cultivo, e também a alta resolução espacial (Araujo, Vettorazzi & Molin, 2005; Elarab *et al.*, 2015).

O uso de diferentes sensores carregados pelo VANT, possibilita-se a identificação e estimativa de plantas daninhas nas áreas de cultivo, falhas de semeadura, estado nutricional de plantas, além de sintomas de estresses bióticos e abióticos, entre outros (Araujo, Vettorazzi & Molin, 2005; Elarab *et al.*, 2015).

Para avaliar a concentração de clorofila nas folhas, as bandas de reflectância nas regiões do visível, principalmente azul e vermelho, são as mais indicadas, pois são as que apresentam maiores informações (Elarab *et al.*, 2015) (Figura 1). Ainda, segundo os autores, as estimativas dos teores de clorofila presentes nas plantas auxiliam os produtores a identificar possíveis heterogeneidades em suas lavouras, o que auxilia nas práticas de manejo adequadas de acordo com necessidades específicas.

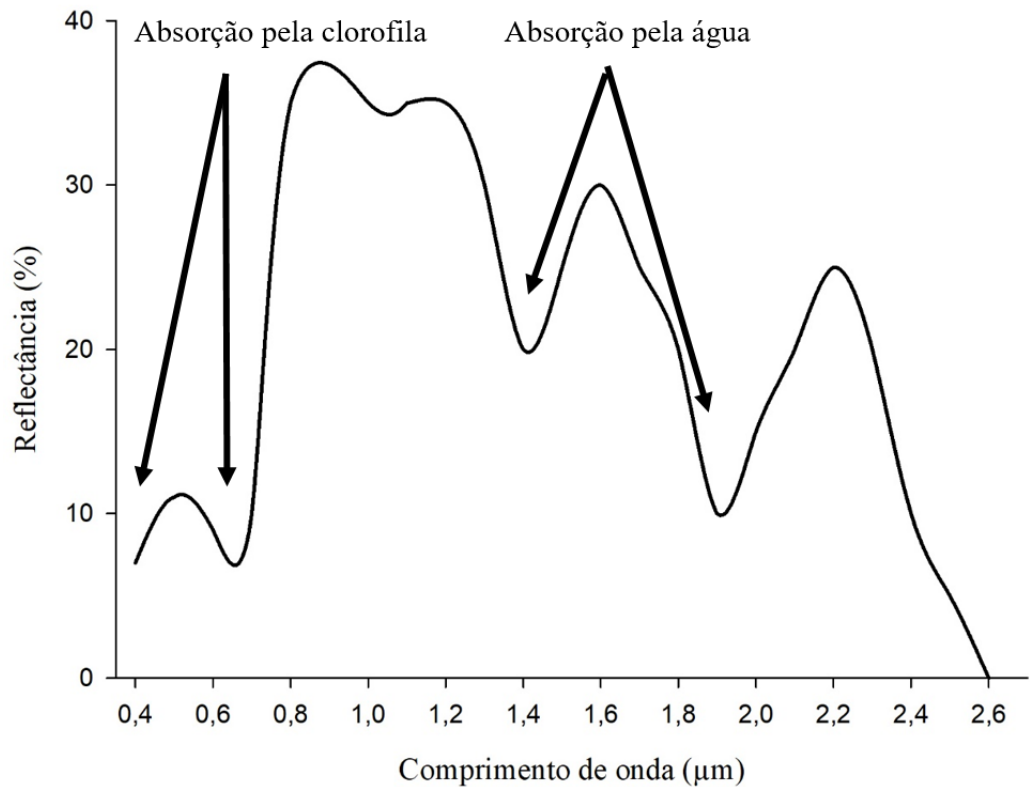


FIGURA 1. Curva de reflectância da vegetação. Adaptado de Moreira (2011).

Os dados de NDVI de uma cultura, obtidos a partir de VANTs, estão sendo amplamente utilizados na fenotipagem de plantas. Os resultados já têm sido utilizados para estimar a produtividade de grãos de culturas como o trigo (Adeel *et al.*, 2019), milho (Uav *et al.* 2016) e arroz (Zhou *et al.*, 2017). Além das caracterizações de plantas, os VANTs possibilitaram o emprego de sensores termais, que captam comprimentos de onda acima de 10.000 nm (). Estes possibilitam a avaliação dos teores de umidade do solo e de evapotranspiração, possibilitando o uso da AP de uma forma mais ampla (Elarab *et al.*, 2015).

A qualidade das imagens registradas pelas câmeras acopladas aos VANTs é fundamental para que se tenha informações precisas e que possam ser aproveitadas. Segundo Guijarro *et al.* (2011), para garantir a qualidade das imagens coletadas é necessário que se tenha uma boa iluminação no momento e que esta iluminação seja

constante, devendo-se evitar vôos tardios ou em dias com baixa luminosidade, pois esta interfere no resultado final.

Após coletar-se as imagens, estas devem ser processadas com auxílio de softwares específicos. Então, são extraídos os números digitais (digital number, DN) de cada pixel da imagem já processada, referentes a cada espectro que a câmera capta. Estes DN são utilizados para criação dos índices de vegetação.

Jorge & Inamasu (2014) citam que as imagens obtidas a partir dos VANTs se assemelhariam ao olho do produtor sobre sua área de cultivo. Ainda comentam que câmeras multiespectrais são responsáveis pela geração da maioria dos índices de vegetação (NDVI, GNDVI, EVI, entre outros), que são responsáveis pela percepção de estresses e de distúrbios nutricionais.

Por não ser um método destrutivo, o emprego de VANTs na agricultura tem se tornado crucial para tomada de decisão e gerenciamento das áreas de cultivo. Estes facilitam a coleta de informações em grandes áreas, não se fazendo necessário o caminhar para coleta de informações a respeito do estado da cultura e de sua variabilidade espacial na área cultivada.

2.8 Referências

ADEEL, M. et al. Plant Science a rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform. **Plant Science**, Amsterdam, v. 282, p. 95–103, 2019.

ALVES, S.M.F. et al. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.29, n.1, p.104-114, 2013.

ARAÚJO, J.C.; VETTORAZZI, C.A.; MOLIN, J.P. Estimativa da produtividade e determinação de zonas de manejo, em culturas de grãos, por meio de videografia aérea multiespectral. **Acta Scientiarum Agronomy**. Maringá, v. 27, n. 3, p. 437-447, 2005.

ARNALL, D.B. et al. Development of an NDVI-Based Nitrogen Rate Calculator for Cotton. **Crop Science**, Nova York, v. 56, p. 3263-3271, 2016.

BERNARDI, A.C.C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Embrapa. Brasília, 2014. 596 p.

BOSCHINI, A.P.M. **Produtividade e qualidade de grãos de trigo influenciados por nitrogênio e lâminas de água no Distrito Federal**. 2010. 44 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

BRAGAGNOLO, J. et al. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: II - indices of fertilizer efficiency and corn yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, vol. 37, n. 5, p. 1299-1309, 2013.

BRAGAGNOLO, J.; AMADO, T.J.C.; BORTOLOTTI, R.P. Use efficiency of variable rate of nitrogen prescribed by optical sensor in corn. **Revista Ceres**. Viçosa, vol. 63 n. 1, p.103-111, 2016.

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

BRUM, A.L.; MÜLLER, P.K. A realidade da cadeia do trigo no Brasil: o elo produtores/cooperativas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 46, p. 145-169, 2008.

CHUNG, S.O.; KABIR, M.S.N. e KIM, Y.J. Variable Fertilizer Recommendation by Image-based Grass Growth Status. **IFAC Papers OnLine**, Viena, v. 51, p. 10–13, 2018.

COLOMINA, I. e MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam. v. 92, p. 79–97, 2014.

CONAB- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra 2018/19: 6º levantamento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**, Brasília, DF, v.6, n.6, p.1 - 149 mês 2019. Monitoramento agrícola. Projeto Observatório Agrícola

CORASSA, G.M. **Manejo por ambiente: atributos de solo e desempenho de cultivares de soja**. 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente. Universidade Federal de Santa Maria campus Frederico Westphalen, Frederico Westphalen, 2015.

DAMIAN, J.M. **Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para definição de zonas de manejo e monitoramento da variabilidade da sucessão aveia preta/soja**.2017. 102 f.. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente. Universidade Federal de Santa Maria campus Frederico Westphalen, Frederico Westphalen, 2017.

ELARAB, M. et al. Estimating chlorophyll with thermal and broadband multispectral high resolution imagery from an unmanned aerial system using relevance vector machines for precision agriculture. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. Amsterdam, v. 43. p. 32-42, 2015.

ERDLE, K.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. Field Crops Research Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 124, n.1, p. 74–84, 2011.

- FILHO, M.C.M.T. et al. Doses, fontes e épocas de aplicação de nitrogênio em trigo irrigado em plantio direto. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 45, n. 8, p. 797-804, 2010.
- FREITAS, M.C.M. A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, vol. 7, 2011.
- GUIJARRO, M. et al. Automatic segmentation of relevant textures in agricultural images. **Computers and Electronics in Agriculture**. Amsterdam, v. 75, p. 75-83, 2011.
- GUSSO, A.; ARVOR, D.; DUCATI, J.R. Model for soybean production forecast based on prevailing physical conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 2, p. 95-103, 2017.
- GOMES, A.C.S. **Efeito de Diferentes estratégias de irrigação sob a cultura da soja (Glycine max (L.) Merrill) na região de Santiago, RS.** 2007. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, p.132, 2007.
- JORGE, L.A.C.; INAMASU, R.Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, A.C.C. (Org.) **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar.** Embrapa: Brasília, 2014, p. 109-134.
- JUNIOR LUCHIARI, A. et al. Zonas de Manejo: teoria e prática. In: INAMASU, R.Y. (Org.). **Agricultura de precisão: um novo olhar.** Embrapa Instrumentação. São Carlos, 2011. p. 60-64,
- JUNIOR MEROTTO, A. et al. Reflectance indices as a diagnostic tool for weed control performed by multipurpose equipment in precision agriculture. **Planta daninha.** Viçosa, v. 30, n. 2, p. 437-447, 2012.
- LIU, Y.; SWINTON, S.M., MILLER, N.R. In site-specific yield response consistent over time? Does it pay? **American Journal of Agricultural Economics**, Milwaukee, v. 88, p.471-483, 2006.
- LOGIE, G.S.J.; COBURN, C.A. An investigation of the spectral and radiometric characteristics of low-cost digital cameras for use in UAV remote sensing. **International Journal of Remote Sensing.** Amsterdam, v. 39, p. 1-20, 2018.
- MORAES, P.V.D. et al. Agricultura de Precisão no controle de plantas daninhas. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia.** Uruguaiana, v. 15, p. 01-14, 2008.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação.** 4. ed. São José dos Campos, 2011. 208 p.

- NUNES, P.H.M.P. et al. Produtividade do trigo irrigado submetido à Aplicação de nitrogênio e à inoculação com *Azospirillum brasilense*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, p.174-182, 2015.
- PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. p.176.
- RATHJE, E.M.; FRANKE, K. Remote sensing for geotechnical earthquake reconnaissance. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. Londres, v. 91, p. 304–316, 2016.
- SANODIYA, R. et al. Yield prediction by integrating NDVI and N-Tester data with yield monitor data. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**. v. 6 p. 1296-1307, 2017.
- SANTI, A.L. et al. Definição de zonas de produtividade em áreas manejadas com agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, v. 8, p. 510-515, 2013.
- SCHAEFER, M.T.; LAMB, D.W. A Combination of Plant NDVI and LiDAR Measurements Improve the Estimation of Pasture Biomass in Tall Fescue (*Festuca arundinacea* var. Fletcher). **Remote Sensing**, Amsterdam, v. 8, p. 2-10, 2016
- TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. p. 858.
- TAVARES, C.E.C. A logística do trigo no Brasil. In: NETO, A.A.O. (Org.) **A cultura do trigo**. CONAB: Brasília, 2017. 218 p.
- TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 159-163, 2002.
- UAV, S. et al. Analysis of Vegetation Indices to Determine Nitrogen Application and Yield Prediction in Maize. **Remote Sensing**. Amsterdam, v. 8, p. 1-15, 2016
- VALENTE, D.S.M. **Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para aplicação para definir zonas de manejo em Cafeicultura de precisão**. 2010. 103 f. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2010.
- ZHOU, X. et al. Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. Amsterdam, v. 130, p. 246–255, 2017.

3 CAPÍTULO 1

Desempenho da cultura da soja em diferentes zonas de manejo

3.1 INTRODUÇÃO

A soja possui grande relevância na economia brasileira, a cultura apresenta diversos benefícios para o sistema de produção, como a rotação de culturas, interrupção do ciclo de algumas doenças, manejo de plantas daninhas e também na fixação de nitrogênio, por meio da associação simbiótica com bactérias (Sankaran *et al.* 2018).

Por ser uma das culturas com maior importância agrícola no Brasil, as áreas de cultivo da soja estão entre as que mais evoluíram tecnologicamente nas últimas décadas. A incorporação e o uso dessas tecnologias, em sua grande parte, está associada ao surgimento da AP.

Para Duhan *et al.*, (2017), a AP pode ser definida como a gestão agrícola que visa mensurar as variações que ocorrem nas áreas de cultivo, a fim de realizar o correto manejo destas áreas, bem como a correta utilização dos insumos na propriedade. Estas práticas têm como base a sustentabilidade do cultivo e o uso correto dos recursos ambientais. Para a implantação da AP em uma propriedade é necessária a caracterização prévia da área de cultivo, a fim de definir quais são os fatores limitantes da produção e, desta forma, tentar otimizar os processos produtivos (Monzon *et al.* 2018).

Um dos fundamentos básicos para a adoção da AP é que as áreas de cultivo não são homogêneas. Levando esse preceito em consideração, a aplicação de insumos em taxa variável torna-se fundamental, ou seja, basear a quantidade de insumos aplicados com as características de solo, microclima, nas necessidades das plantas e em outros fatores que possam causar esses contrastes (Khanal, Fulton, & Shearer, 2017).

Considerando que há heterogeneidade nos campos de produção, a divisão destes em regiões com características semelhantes é essencial. Essas divisões são conhecidas como unidades de manejo diferenciado (UMD), em geral, são definidas principalmente com base em variáveis que se correlacionam espacialmente, como a produtividade de grãos das culturas (Gavioli *et al.*, 2016).

A AP dispõe de diversas ferramentas para avaliar essas heterogeneidades. Os sensores são os mais utilizados fornecendo os índices de vegetação das plantas nas áreas estudadas. As informações sobre a vegetação, que são obtidas a partir destes índices, são interpretadas, principalmente, pelas características espectrais do dossel, como diferenças nos pigmentos das folhas e a quantidade de biomassa de parte aérea (Xue & Su, 2017). Os índices mais utilizados para caracterização de um cultivo são o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e o índice de vegetação por diferença normalizada pelo red edge (NDRE). Compreender o comportamento de uma cultura nas diferentes unidades de manejo diferenciado é fundamental para que sejam adotadas as práticas de manejo adequadas para a situação.

Os objetivos deste estudo foram verificar o desempenho da cultura da soja, em relação a biomassa de parte aérea, componentes de rendimento e produtividade de grãos, em diferentes unidades de manejo diferenciado, definidas a partir de mapas de NDVI e do histórico de mapas de produtividade. Além disso, analisar o comportamento espectral da cultura nas unidades de manejo diferenciado, utilizando dois índices de vegetação (NDVI e NDRE) para as estimativas.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido na Fazenda Vila Morena, localizada no município de Boa Vista das Missões, RS, durante os anos agrícolas de 2016/2017 e 2017/2018. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico (Streck *et al.*, 2018). O clima da área é do tipo subtropical de primavera úmida, com temperaturas médias do ar de 18°C e precipitação pluvial anual média de 1919 mm (Maluf, 2000). A altitude do local é de aproximadamente 650 m acima do nível do mar. Na Figura 1, são apresentados os dados de temperatura do ar e nebulosidade entre os meses de novembro e abril nas duas safras

agrícolas, coletados em estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada a 30 km da área do estudo. O talhão estudado era de 114 ha, com irrigação por pivô central.

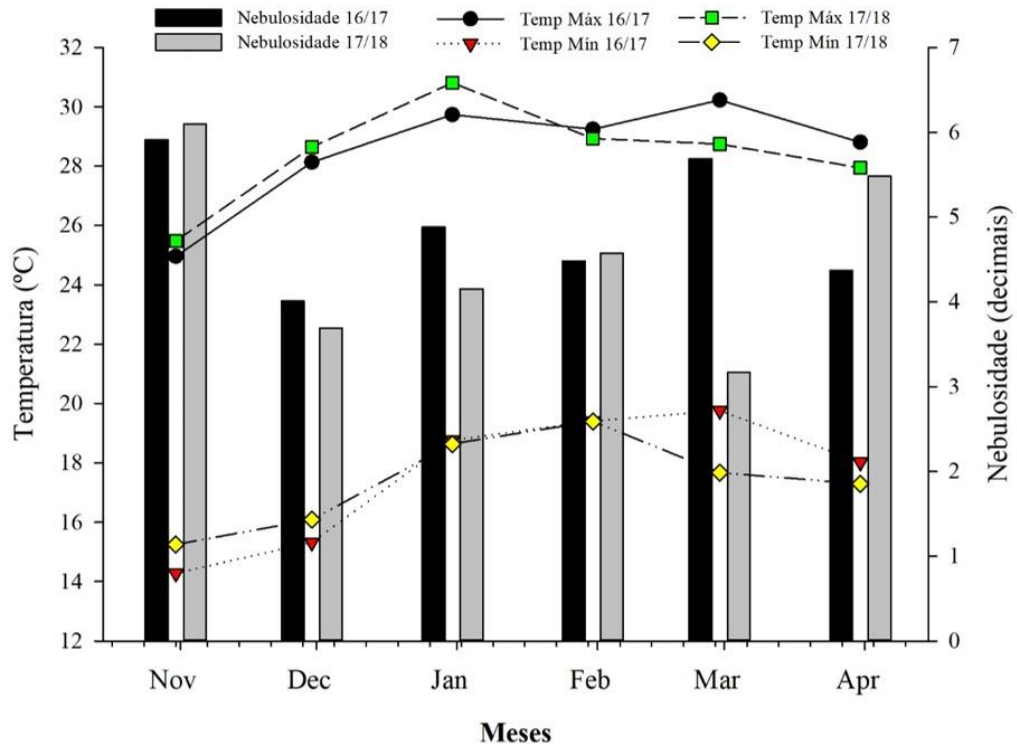


FIGURA 1. Temperaturas máximas e mínimas e nebulosidade durante as safras 2016/17 e 2017/18, no município de Palmeira das Missões.

3.2.2 Caracterização do estudo (unidades de manejo)

Foram definidas três diferentes unidades de manejo, que foram divididas em alto, médio e baixo potencial de produção, no talhão 114. Estas unidades foram definidas com base na sobreposição de mapas de produtividade de grãos (aveia branca na safra de 2010, trigo na safra de 2013 e soja na safra 2014/2015) e mapas de NDVI, que foram obtidos a partir de imagens do satélite Landsat, da cultura da soja nas safras de 2008, 2010 e 2014, aveia branca em 2010, milho em 2009 e trigo em 2013 (Figura 2) (Damian, 2017).

Após a coleta e análise dos dados obtidos a partir da produtividade e do NDVI, as unidades de manejo foram delimitadas com o auxílio do software Management Zone

Analyst (MZA, 1.0.1) (Fridgen *et al.*, 2004); que agrupa os dados em clusters baseados em algoritmos de agrupamento difuso (Damian, 2017).



FIGURA 2. Definição das unidades de manejo diferenciado na área do estudo (talhão 114 ha). Boa Vista das Missões (Damian, 2017).

O delineamento experimental utilizado foi de blocos inteiramente casualizados, onde, em cada unidade de manejo, foram alocadas 10 parcelas na safra de 2016/17 e 15 parcelas na safra 2017/18 de maneira aleatória. Cada parcela foi constituída de 3 linhas de 5 metros de comprimento, com espaçamento entre linhas 0,55 m, totalizando 8,25 m² de área.

A soja foi semeada nos dias 24/11/2016 e 08/11/2017 com as cultivares NS5727 IPRO e M5838 IPRO, respectivamente. A população de plantas utilizada em ambas as safras foi de, aproximadamente 30 sementes m⁻². As avaliações de campo foram iniciadas a partir do estágio fenológico de quinta folha trifolioladas completamente desenvolvida (Estádio V6) e seguiram até o estágio de grão cheio ou completo (Estádio R6) (Tabela 1).

TABELA 1. Datas de avaliações do estudo no campo e seus respectivos estádios fenológicos durante as duas safras agrícolas.

2016/2017		2017/2018	
Avaliações	Estádio	Avaliações	Estádio
26/12/16	V6	26/12/17	V10
06/01/17	V9	10/01/18	R2
19/01/17	R2	02/02/18	R5.1
22/02/17	R6	---	---

3.2.3 Tratos culturais

A adubação utilizada na semeadura foi 7 kg ha^{-1} de N e 40 kg ha^{-1} de P. Foi realizada também a adubação de 60 kg/ha de K em cobertura, quando as plantas estavam, aproximadamente, no estágio fenológico de primeira folha trifoliolada completamente desenvolvida (estádio V2).

Os demais tratos culturais, como o controle de pragas e doenças e a irrigação, foram realizados de acordo com as recomendações técnicas para a cultura da soja (Caraffa *et al.*, 2019) e executadas pelos responsáveis da área, seguindo os manejos e padrões do produtor.

3.2.4 Variáveis analisadas

Índices de vegetação

Foi utilizado o sensor “Crop Circle”, o qual foi posicionado paralelamente às linhas da cultura, a uma altura de 0,8 a 1,0 m acima do topo do dossel. As leituras foram realizadas pelo deslocamento linear do equipamento sobre a linha de semeadura em cada unidade experimental. A partir dos valores de reflectância obtidos pelo sensor, calculou-se os índices de vegetação NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada) (Equação 1) e NDRE (índice de vegetação por diferença normalizada pelo Red Edge) (Equação 2), dados pelas seguintes equações:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad \text{(Equação 1)}$$

$$NDRE = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (\text{Equação 2})$$

onde: NIR =infravermelho próximo (780 nm); R= Vermelho (670 nm); RED= Red Edge (730 nm).

O teor de clorofila foi determinado com o auxílio do equipamento ClorofiLog®. Foi utilizada a média de cinco folhas aleatórias dentro das unidades experimentais, definindo-se como padrão a folha central do último trifólio completamente expandido para a coleta dos dados. Esta avaliação foi realizada somente na safra 2017/18.

Estatura de planta

A estatura da planta foi avaliada em três plantas aleatórias dentro de cada unidade experimental quando estas estavam no estágio de pleno florescimento (R2). A avaliação consistiu na medição de toda a extensão da planta, desde a sua base até o seu ápice, utilizando régua graduada.

Biomassa e teor de nitrogênio (N) na biomassa da parte aérea

No momento do pleno florescimento (estádio R2), foram coletadas três plantas de cada unidade experimental, de forma aleatória. As amostras foram acondicionadas em sacos de papel e colocadas em estufa de circulação de ar forçado com temperatura de 60°C, até atingirem peso constante. Para a avaliação do teor de N, foi utilizado o método de Kjeldahl, conforme descrito por Tedesco *et al* (1985).

Componentes de rendimento

No período de maturação fisiológica, foram coletadas cinco plantas aleatórias por unidade experimental e avaliadas as seguintes variáveis: altura final da planta, número de ramos, número de legumes com um grão, número de legumes com dois grãos, número de legumes com três grãos, número de legumes com mais de três grãos, legumes sem grão

(chochos) e peso de mil grãos. A partir destas variáveis, foram determinados os componentes do rendimento de grãos (legumes m^{-2} , grãos $legume^{-1}$ e peso de mil grãos).

Rendimento de grãos

Para a determinação deste parâmetro foram colhidas cinco plantas de cada unidade experimental e, após foi realizada a debulha dos legumes. Foi quantificado o peso de grãos por unidade experimental e este foi extrapolado para rendimento de grãos total (em $kg\ ha^{-1}$), utilizou-se para correção a unidade de $130\ g\ kg^{-1}$.

3.2.5 Análise estatística

Para a análise dos dados, foi realizado teste de normalidade, análise de estatística descritiva, análise de distribuição dos dados por boxplot e testes de comparação múltipla de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produtividade de grãos para as safras 2016/17 e 2017/18 não apresentaram diferença estatística significativa entre as diferentes unidades de manejo. Porém, como se observa na Figura 3, há variação entre os valores de produtividade dentro das próprias unidades de manejo em relação as safras agrícolas.

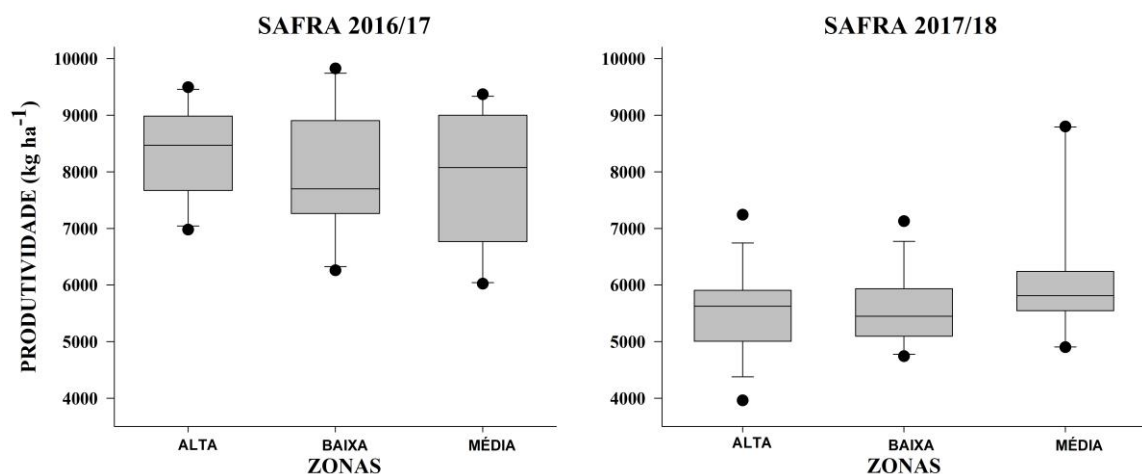


FIGURA 3. Produtividade de grãos de soja em três zonas de manejo nos anos agrícolas 2016/17 e 2017/18.

Para a safra 2016/17, se tem uma menor variação dos dados de produtividade de grãos na UMD de alta, em relação às UMD de média e de baixa produtividade, sendo que esta última UMD foi a que apresentou maior variação na produtividade. Na safra, 2017/18, observou-se que, diferentemente da safra anterior, a UMD de média foi a que apresentou maior variação entre os resultados de produtividade analisados.

Para ambas as safras agrícolas as produtividades encontradas foram elevadas, cerca de 9000 kg ha^{-1} em 2016/17 e 6000 kg ha^{-1} em 2017/18. Matei *et al.* (2017) encontraram produtividades, para a cultivar NS5727 IPRO de 5200 kg ha^{-1} , porém sem irrigação suplementar.

Para verificar qual variável explicava melhor a produtividade de grãos de cada ano agrícola, fez-se a análise de árvore de decisão (AD) (figura 4). As AD são segmentadas por grupos que possuem alguma semelhança, a fim de verificar quais variáveis possuem maior influência na variável de interesse (Song & Lu, 2015). Pode-se observar que, para as duas safras, o componente de rendimento legumes m^{-2} (leg m^{-2}) foi o que melhor explicou os dados de produtividade, apresentando coeficientes de determinação de 0,63 e 0,67 para 2016/17 e 2017/18, respectivamente.

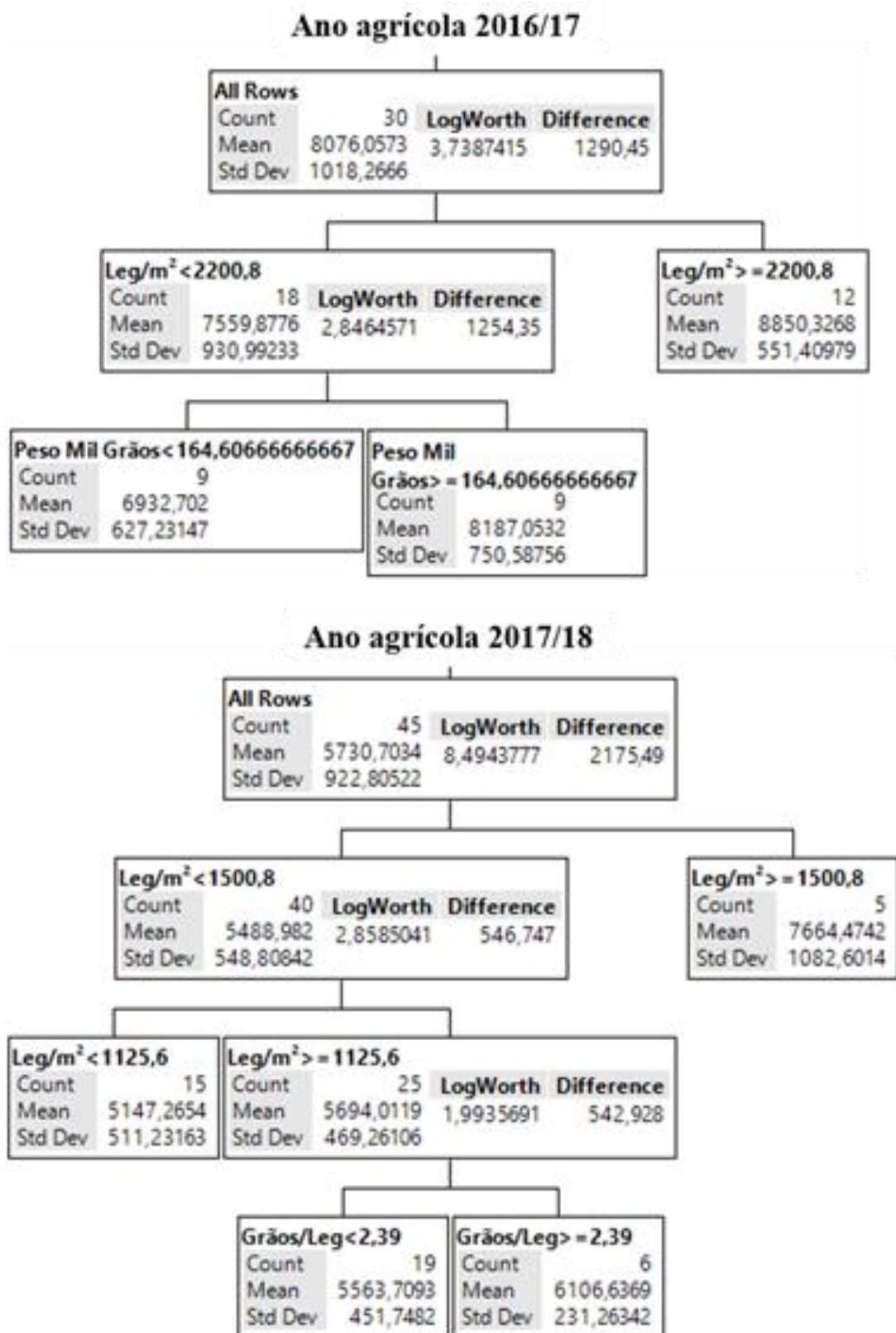


FIGURA 4. Árvore de decisão para produtividade de grãos de soja nas unidades de manejo diferenciado nas safras agrícolas 2016/17 e 2017/18.

Na safra agrícola 2016/17, o número de legumes/m² não apresentou diferença estatística para as UMD. Porém, o número de grãos legume⁻¹ e o peso de mil grãos foram superiores na UMD de alta (Tabela 2), em relação às demais UMD. Para a safra agrícola 2017/18, os componentes número de grãos legume⁻¹ e legumes m⁻² obtiveram diferença significativa (Tabela 2). Os maiores valores de grãos por legumes foram observados na UMD de média, seguida pela de alta e, por último, pela de baixa. Já para os valores de legumes m⁻², a unidade de manejo alta foi a que obteve maiores médias, seguida das demais UMD.

Os componentes de rendimento de uma cultura correlacionam-se diretamente com o microclima do ambiente de produção. Souza *et al.* (2015) apresenta que a temperatura é um fator importante a ser considerado para avaliar-se a produção de flores, a fixação de legumes na planta, a produção de grãos nos legumes, bem como o enchimento de grãos. Assim, mesmo que apresentasse diferenças entre a quantidade de legumes m⁻² e de grãos legume⁻¹, os grãos na UMD de alta podem não ter recebido a quantidade de carboidratos necessária para seu completo enchimento, logo, ficaram com peso semelhante aos das demais unidades de manejo, uma vez que este componente não apresentou diferença estatística significativa (Tabela 2).

Para a safra agrícola 2017/18, os componentes número de grãos legume⁻¹ e legumes m⁻² obtiveram diferença significativa (Tabela 2). Os maiores valores de grãos por legumes foram observados na UMD de média, seguida pela de alta e, por último, pela de baixa. Já para os valores de legumes m⁻², a unidade de manejo de alta foi a que obteve maiores médias, seguida das demais (Tabela 2).

TABELA 2. Valores dos componentes de rendimento da cultura da soja para as diferentes unidades de manejo diferenciado, nas safras 2016/17 e 2017/2018.

Unidade de Manejo Diferenciado - UMD				
Safra 2016/17				
Componente	Alta	Baixa	Média	CV (%)
Peso de mil grãos (g)	174,82 a	163,09 b	159,05 b	5,22
Grãos Legume⁻¹	2,37 a	2,26 ab	2,19 b	4,29
Legumes m⁻²	2119,7 ns	2197,1	2161,4	19,97
Safra 2017/18				
Peso de mil grãos (g)	165,02 ns	166,76	165,64	3,90
Grãos Legume⁻¹	2,30 b	2,33 ab	2,37 a	2,87
Legumes m⁻²	1334,29 a	1143,52 b	1157,71 b	15,57

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns= não significativo.

Quando submetida a condição de estresses abióticos, a soja aumentou o conteúdo de carboidratos não estruturais nas raízes, ocasionando um menor crescimento das plantas e, conseqüentemente uma menor alocação das reservas em órgãos reprodutivos (Silva *et al.*, 2018). Observa-se que, quando a cultura da soja passa por condições limitantes, mesmo que por pouco tempo ou com menor intensidade, já poderá ocorrer alguma alteração na relação fonte-dreno da planta, e dessa forma, interferir na alocação de reservas, ou no pegamento das flores, interferindo diretamente nos componentes de rendimento.

Avaliações do desenvolvimento vegetativo da cultura foram realizadas, uma dessas avaliações foram realizadas com sensor óptico de vegetação. Observou-se que, para a safra agrícola 2016/17, o NDVI no estágio fenológico V6 foi o único que apresentou diferença estatística significativa entre as UMD, sendo que os valores foram superiores as UMD de alta (Figura 5).

Ao longo de seu ciclo, a soja tende a acumular fotoassimilados nos estádios vegetativos, e apresenta os maiores valores de NVDI nos estádios reprodutivos. Nos estádios subseqüentes, os valores tendem a estabilizar e após decair, visto que a planta começa a mobilizar suas reservas para os órgãos reprodutivos, além de iniciar a

senescência de folhas, e, por consequência, a degradação da clorofila (Kuiawski *et al.*, 2017). A ausência de diferença estatística a partir do estágio V9 pode ser explicada pela saturação que ocorre com o NDVI. Já o NDRE apresentou diferença estatística entre as UMD em todos os estádios fenológicos da cultura, com exceção do estágio V9. Para este índice, a UMD de alta foi superior às demais em todas as avaliações. Na safra agrícola 2017/2018, houve diferença no NDVI para as UMD para todos os estádios, sendo que, a partir de R2, a UMD de alta não diferiu da UMD de média e ambas foram superiores a UMD de baixa. O NDRE também expressou maiores médias para as UMD de alta e de média durante o período reprodutivo, sendo que, no estágio fenológico V10, não houve diferença significativa. O NDRE é calculado com três comprimentos de onda, onde a banda espectral do red edge (RE) é caracterizada por penetrar em regiões mais internas do dossel e por ser mais sensível à clorofila do topo das plantas com maiores teores de biomassa, fazendo com que a saturação do índice seja reduzida, se comparado ao NDVI (Miller *et al.*, 2018).

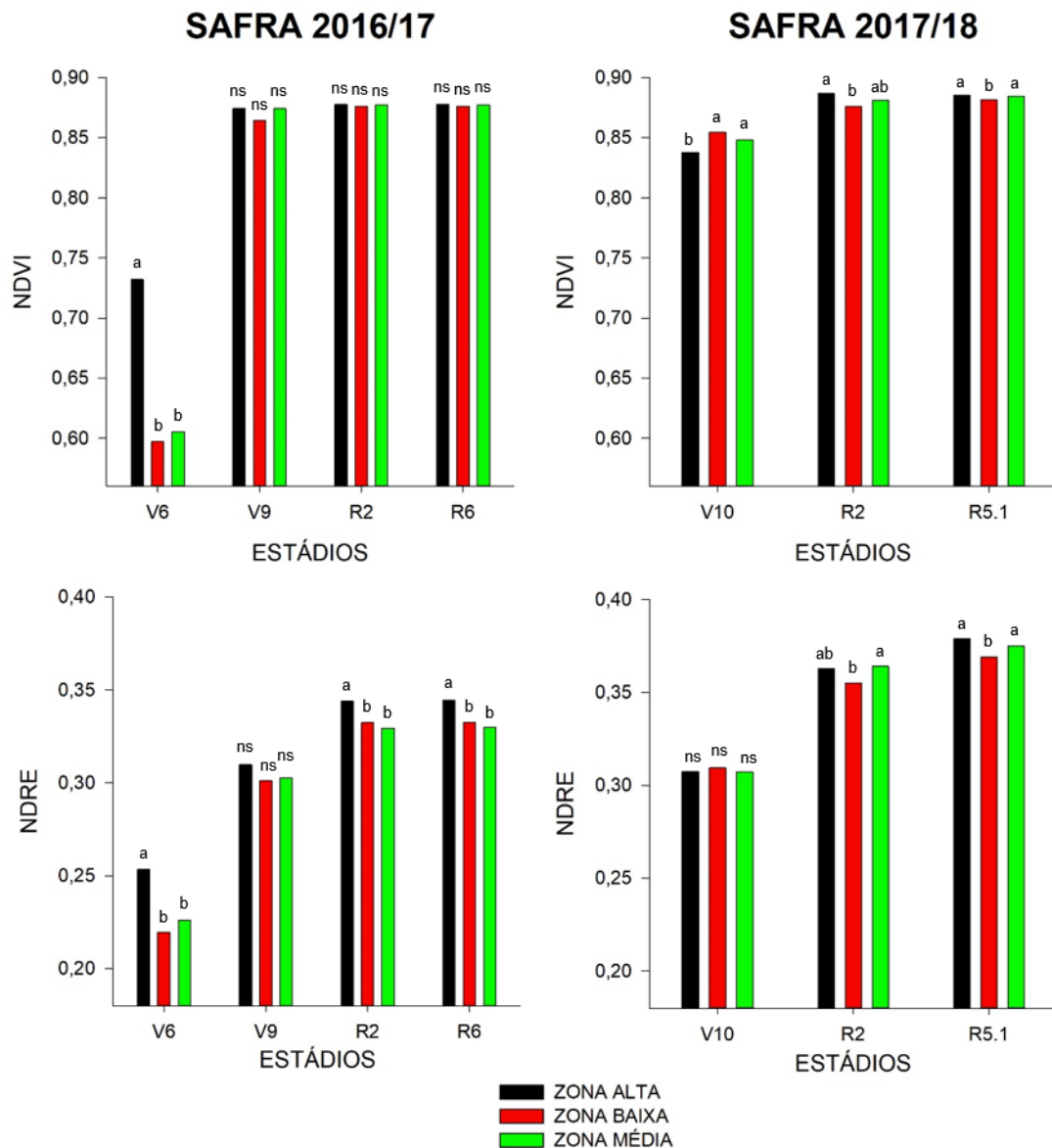


FIGURA 5. Valores de NDVI e NDRE, para a soja, em diferentes estádios fenológicos, nas diferentes unidades de manejo diferenciado para as safras agrícolas de 2016/17 e 2017/18. Letras minúsculas referem-se às comparações entre zonas de manejo em cada estádio fenológico (Teste de Tukey, $p < 0,05$). ns=não significativo.

Peng *et al.* (2017) observaram que índices de vegetação que utilizam o infravermelho próximo, como o NDVI e NDRE, apresentaram diferenças significativas entre os estádios fenológicos da cultura da soja. Verificaram, também, que o NDVI, e a clorofila, apresentaram maiores valores durante o estágio reprodutivo da cultura (Peng *et*

al., 2017), diferente do que foi observado neste estudo, onde a saturação do NDVI ocorreu no estágio V9.

Ao avaliar o teor de clorofila total, na safra agrícola 2017/18, verificou-se que no estágio de V10, a UMD de alta foi a que apresentou menores valores, seguida das UMD de baixa e média. Apesar de não haver diferença estatística significativa para o estágio R2, na avaliação subsequente, R5.1, a UMD de alta superou as UMD de baixa e média (Figura 6).

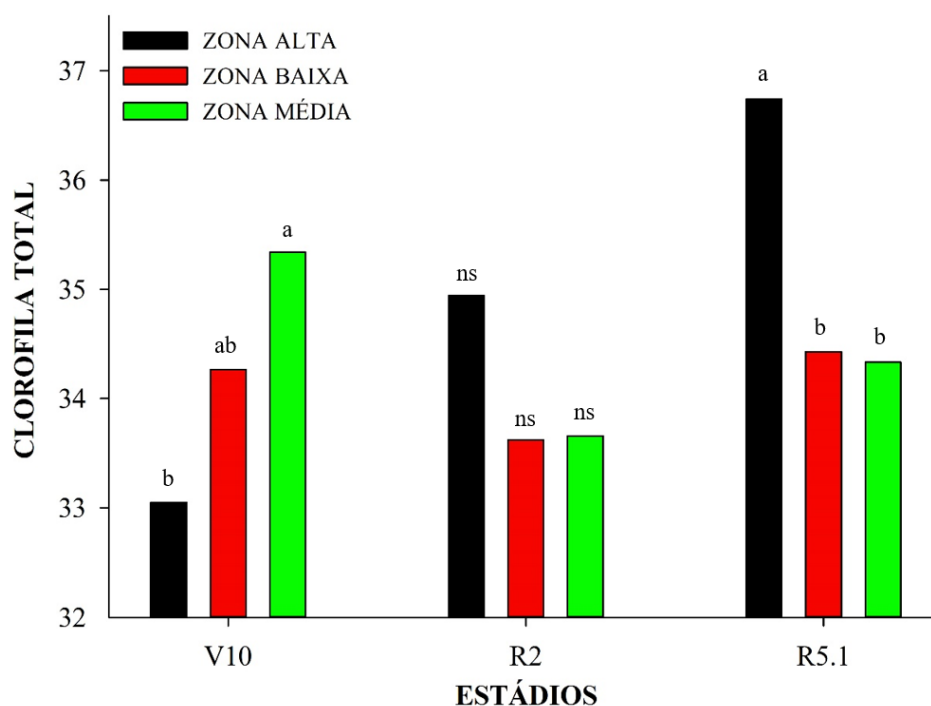


FIGURA 6. Teor de clorofila total para cada UMD nos diferentes estádios fenológicos da soja, no ano agrícola 2017/18. Letras minúsculas referem-se às comparações entre zonas de manejo em cada estágio fenológico (Teste de Tukey, $p < 0,05$). ^{ns}=não significativo.

Os resultados obtidos a partir das análises de clorofila se assemelham aos que foram encontrados no NDVI e NDRE. Isto se deve ao fato de que a banda espectral do vermelho, que é utilizada para o cálculo do índice, é altamente absorvida pela clorofila presente nas folhas, tornando o NDVI sensível às variações dos teores de clorofila na planta (Huete *et al.*, 1997).

Para verificar qual a relação entre as componentes de rendimento e a produtividade de grãos, foi realizada a análise de correlação linear de Pearson. Os dados obtidos mostraram que houve poucas respostas significativas. Na safra agrícola de 2016/2017, houve correlação entre número de ramos e legumes m^{-2} , nas UMD de baixa e média produtividade de grãos. As variáveis número de legumes com dois grãos e legumes com três grãos apresentaram altos coeficientes de correlação com o número de legumes m^{-2} , superiores a 0,65 (Tabela 3). Quando o número de grãos/legume aumentou, o peso de mil grãos diminuiu, pois, a correlação entre eles foi negativamente forte (Faligowska & Szukała, 2015). Da mesma maneira, houve correlação negativa entre número de grãos $legume^{-1}$ e número de legumes com dois e três grãos para a zona de alta, no ano safra de 2016/2017.

TABELA 3. Correlação entre legume m^{-2} (LM), grãos $legume^{-1}$ (GL), peso de mil grãos (MG), produtividade de grãos (PROD), número de ramos (R), legumes com zero grão m^{-2} (LZG), legumes com um grão m^{-2} (LUG), legumes com dois grãos m^{-2} (LDG), legumes com três grãos m^{-2} (LTG) e legumes com quatro grãos m^{-2} (LQG), para a safra agrícola de 2016/2017, nas UMD de alta (A), baixa (B) e média (M).

	LM			GL			MG			PROD		
	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M
R	0,22	0,67**	0,68*	-0,11	-0,33	0,04	-0,26	-0,32	0,16	0,16	0,44	0,53
LZG	0,59	0,72**	0,19	-0,92**	-0,52	0,03	-0,04	0,002	-0,07	0,14	-0,05	0,28
LUG	0,52	0,90**	0,47	-0,97**	-0,38	-0,45	-0,07	-0,3	0,17	0,03	0,45	0,48
LDG	0,80**	0,97**	0,92**	-0,18	-0,29	-0,07	-0,57	-0,2	-0,04	0,49	0,39	0,72**
LTG	0,73**	0,90**	0,69*	-0,11	0,22	0,80**	-0,15	0,02	0,65*	0,47	0,60	0,62
LQG	-0,36	0,48	0,51	0,11	-0,15	0,35	0,26	-0,24	-0,17	0,09	0,04	0,23
LM	.	.	.	-0,65	-0,19	0,2	-0,42	-0,17	0,25	0,48	0,50	0,83**
GL	.	.	.	.	.	.	0,26	0,33	0,54	-0,08	0,00	0,17
MG	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,32	-0,10	0,57

Médias seguidas de (*), (**), foram significativas a 5% e 1%, respectivamente.

Na safra agrícola de 2017/2018, assim como no ano anterior, foi observada alta correlação entre as variáveis número de legumes com dois e três grãos e número de legumes m^{-2} (Tabela 4), além de alta correlação entre legumes com dois e três grãos e número de legumes m^{-2} e a produtividade, para as três UDM. Os dados corroboram com

estudos feitos por Khan *et al.* (2018), que encontrou boas correlações quando avaliou o número de grãos planta⁻¹ com o número de legumes planta⁻¹. Porém, este último, se relacionou negativamente com a produtividade de grãos (Khan *et al.*, 2018).

Para a segunda safra agrícola, houve correlação entre o número de ramos por planta e a quantidade de legumes m² (0,7), para todas as UMD. Esta variável também se correlacionou bem com a produtividade de grãos. As análises de correlação são importantes pois auxiliam na avaliação de mudanças ou de características de uma variável que irá interferir, ou não, em outra (Sousa *et al.*, 2015).

Os maiores valores de correlações lineares de Pearson encontrados entre produtividade de grãos de soja e NDVI foram obtidos nos estádios vegetativo e no estágio reprodutivo (Bai *et al.*, 2016). Os autores apontam que o acúmulo de biomassa pela cultura e a maior quantidade de estruturas vegetativas apresentam benefícios para a produtividade, e estes resultados são importantes, pois podem ser utilizados para direcionar a seleção de genótipos com alto potencial produtivo. Neste trabalho, apesar dos componentes de rendimento (tabela 2) e dos índices de vegetação (figura 5), terem apresentado diferença estatística entre si, pelo teste de médias, ao se avaliar a correlação entre os ambos, observou-se que não houve significância para nenhuma zona de manejo e nem para os anos agrícolas.

TABELA 4. Correlação entre legume m² (LM), grãos/legume (GL), peso de mil grãos (MG), produtividade de grãos (PROD), número de ramos m² (R), legumes com zero grão m² (LZG), legumes com um grão m² (LUG), legumes com dois grãos m² (LDG), legumes com três grãos m² (LTG) e legumes com quatro grãos m² (LQG), para a safra agrícola de 2017/2018, nas UMD de alta (A), baixa (B) e média (M).

	LM			GL			MG			PROD		
	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M
R	0,70**	0,74**	0,74**	0,20	0,04	-0,53	-0,07	-0,36	-0,22	0,57*	0,51*	0,70**
LZG	0,20	0,01	-0,02	-0,13	-0,71**	0,03	-0,39	-0,47	-0,32	0,06	-0,27	-0,06
LUG	0,41	0,19	0,65**	-0,69	-0,87**	-0,85**	-0,05	-0,69**	-0,34	0,29	-0,13	0,40
LDG	0,86**	0,89**	0,89**	0,29	-0,09	-0,36	0,06	-0,35	-0,45	0,86**	0,64**	0,70**
LTG	0,92**	0,77**	0,83**	0,59**	0,66**	0,26	0,04	0,05	0,15	0,9**	0,69**	0,89**
LQG	-0,09	-0,22	0,49	-0,19	0,12	0,13	-0,69**	0,02	-0,12	-0,18	-0,04	0,44
LM	.	.	.	0,27	0,08	-0,30	0,009	-0,36	-0,24	0,95**	0,71**	0,87**
GL	.	.	.	.	.	.	0,06	0,59**	0,59*	0,35	0,34	0,02
MG	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,16	0,01	0,15

Médias seguidas de (*), (**), foram significativas a 5% e 1%, respectivamente.

3.4 CONCLUSÕES

O desempenho da soja nas diferentes UDM foi semelhante na maioria das avaliações, e não difere para a produtividade de grãos, para as duas safras. Já para as avaliações dos índices de vegetação, bem como teor de clorofila no estágio R5.1, a UMD de alta apresenta as melhores respostas.

Observa-se que houve a saturação do NDVI a partir dos estádios V9, na safra 2016/17 e R2 na safra 2017/18. As correlações entre os componentes de rendimento são altas, principalmente com o número de legumes por m² e produtividade de grãos.

3.5 REFERÊNCIAS

BAI, G. et al. A multi-sensor system for high throughput field phenotyping in soybean and wheat breeding. **Computers and Electronics in Agriculture**. Amsterdam v. 128, p. 181–192, 2016.

CARAFFA, M. et al. (Org) Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, safras 2018/2019 e 2019/2020. Três de Maio: Setrem, 2019. 105 p.

DAMIAN, J.M. et al. Monitoring variability in cash-crop yield caused by previous cultivation of a cover crop under a no-tillage system. **Computers and Electronics in Agriculture**. Amsterdam, v. 142, p. 607-621, 2017.

DUHAN, J.S. et al. Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. **Biotechnology Reports**. Amsterdam, v. 15, p. 11-23, 2017.

FALIGOWSKA, A.; SZUKAŁA, J. The effect of various long-term tillage systems on yield and yield component of yellow and narrow-leaved lupin. **Field Crops**. Amsterdam, v. 20, p. 188-193, 2015.

FRIDGEN, J.J. et al. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 100-108, 2004.

GAVIOLI, A. et al. Optimization of management zone delineation by using spatial principal components. **Computers and Electronics in Agriculture**. Amsterdam, v. 127, p. 302–310, 2016.

HUETE, A.R. et al. A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**. Madison, v. 59, p. 440-451, 1997.

KHAN, A. et al. Genotypic comparison of determinate and indeterminate soybean lines for yield and yield components. **Pakistan Journal of Botany**. v. 50, p. 131-134, 2018.

KHANAL, S.; FULTON, J.; SHEARER, S. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**. Amsterdam, v. 139, p. 22-32, 2017.

KUIAWSKI, A.C.M.B. et al. Vegetation indexes and delineation of management zones for soybean. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. Goiania, v. 47, p. 168-177, 2017.

MALUF, J.R.T. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, p. 141-150, 2000.

MATEI, G. et al. Agronomic performance of modern soybean cultivars in multi-environment trial. **Pesquisa agropecuária brasileira**. Brasília, v. 52, n. 7, p. 500-511, 2017.

MILLER, J.J. et al. Characterizing soybean vigor and productivity using multiple crop canopy sensor readings. **Field Crops Research**. Amsterdam, v. 216, p. 22–31, 2018.

MONZON, J.P. et al. H. Precision agriculture based on crop physiological principles improves whole-farm yield and profit. **European Journal of Agronomy**. Amsterdam, v. 99, p. 62–71, 2018.

PENG, Y. et al. Assessment of canopy chlorophyll content retrieval in maize and soybean: implications of hysteresis on the development of generic algorithms. **Remote Sensing**. v. 9, p. 226; 2017.

SANKARAN, S. et al. High-throughput field phenotyping in dry bean using small unmanned aerial vehicle based multispectral imagery. **Computers and Electronics in Agriculture**. Amsterdam, v. 151, p. 84-92, 2018.

SILVA, A.J; et al. Source-sink relationships in two soybean cultivars with indeterminate growth under water deficit. **Bragantia**. Campinas, v. 77, p. 23-35, 2018.

SONG, Y.; LU, Y. Decision tree methods: applications for classification and prediction. **Shanghai Archives of Psychiatry**. Shanghai, v. 2, p. 130-135, 2015.

SOUSA, L.B. et al. Correlation between yield components in F6 soybean progenies derived from seven biparental crosses. **Bioscience Journal**. Uberlândia, v. 31, p. 1692-1699, 2015.

SOUZA, V. Q. et al. Componentes de rendimento em combinações de fungicidas e inseticidas e análise de trilha em soja. **Global Science and Technology**. Rio Verde, v. 08, p. 169-178, 2015.

STRECK, E.V. et al. Solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS: EMATER/RS-ASCAR, 2018. 251 p.

TEDESCO, M.J.; VOLKWEISS, S.J.; BOHNEN, H. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 176 p., 1985.

XUE, J., SU, B. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. **Journal of Sensors**. Cairo, v. 2017 , p. 1-17, 2017.

4 CAPÍTULO 2

**Efeito da variabilidade de nitrogênio no desenvolvimento e na produção de grãos na
cultura do trigo cultivado sob soja**

4.1 INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto (SPD) surgiu como alternativa para diminuir os problemas com a emissão de gases do efeito estufa, melhorar a qualidade biológica do solo, além de diminuir as perdas pela erosão (Heroldová *et al.*, 2017). Um dos preceitos para a o uso do SPD é o emprego da rotação de culturas, que visa manter as áreas de cultivo sempre com cobertura vegetal. Um sistema que utiliza, de forma alternada, espécies leguminosas e gramíneas tende a complementar a disponibilidade de nutrientes, como o nitrogênio (N), como ocorre com espécies leguminosas, como a soja, que fixam N atmosférico e aumentam o teor do mesmo no solo, desta forma, disponibilizam maiores quantidades do nutriente para gramíneas, que são altamente exigentes em N (Finney, White & Kaye, 2016).

O SPD auxilia no incremento de produtividade, principalmente em anos com precipitação pluvial média, ou abaixo da média, também pelo aumento na qualidade biológica das áreas de produção (Kuhn *et al.*, 2016).

Apesar de haver uma melhoria na disponibilidade nutricional e um aumento no teor de matéria orgânica dos solos com a adoção do SPD, a utilização de fertilizantes, principalmente os fertilizantes nitrogenados, ainda são fundamentais para o desenvolvimento de espécies gramíneas.

O nitrogênio (N) é um elemento importante para a produção de enzimas e proteínas que compõem o aparelho fotossintético das plantas, que resultam no acúmulo de fotoassimilados e, em sequência, é necessário para a formação e enchimento dos grãos, (Leghari *et al.*, 2016; Zörb, Ludewig e Hawkesford, 2018; Basso *et al.*, 2016). Durante o momento da semeadura, faz-se a aplicação parcial da dose do fertilizante exigido pela cultura, e o restante é dividido em aplicações em cobertura durante os estádios em que as plantas mais demandam. Este fato se dá pela baixa exigência na fase inicial, por aumentar

os riscos de perdas por lixiviação e volatilização, além de poder causar estresse salino, visto que são aplicados na linha de semeadura (Filho *et al.*, 2010).

As aplicações de adubos nas áreas de cultivo são, em sua maioria, realizadas de maneira empírica, não levando em consideração o teor do nutriente residual no solo, e por vezes, nem a necessidade real da planta (Elsayed, Barmeier & Schmidhalter, 2018). Porém, o Manual de Adubação e Calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, indica que o uso de fertilizantes nitrogenados seja baseado na cultura antecessora ao cultivo, no teor de matéria orgânica da área e a expectativa de produtividade (SBCS, 2016).

Identificar os efeitos integrados de diferentes combinações de manejo de N é importante para o desenvolvimento de um sistema que atinja altas produtividades de grãos e use de maneira eficiente este nutriente (LU, 2016). Diante disto, avaliar as dosagens ideais de fertilizantes nitrogenados que plantas de trigo necessitam, além de evitar custos desnecessários para o produtor, auxilia na sustentabilidade do sistema produtivo, diminuindo os impactos causados pelo uso excessivo do N.

O objetivo foi avaliar os efeitos de diferentes doses de N, sobre o desenvolvimento da biomassa e a produtividade; e a correlação entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), biomassa no florescimento e a produtividade de grãos, na cultura do trigo implantada sob palhada de soja, em sistema de plantio direto.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Localização e características da área de estudo

Os experimentos foram conduzidos nas safras agrícolas de 2017 e 2018 na Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), no município de Eldorado do Sul (RS). A área experimental está situada na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul, a uma altitude média de

46 metros acima do nível do mar. O clima é do tipo Cfa, conforme a classificação de Köppen (IPAGRO, 1979). A precipitação pluvial média anual em Eldorado do Sul é de 1440 mm e a temperatura média mensal do ar varia entre 14 e 25°C, Figura 1, (Bergamaschi *et al.*, 2003). O solo é caracterizado como Argissolo Vermelho Distrófico Típico (Streck *et al.*, 2018).

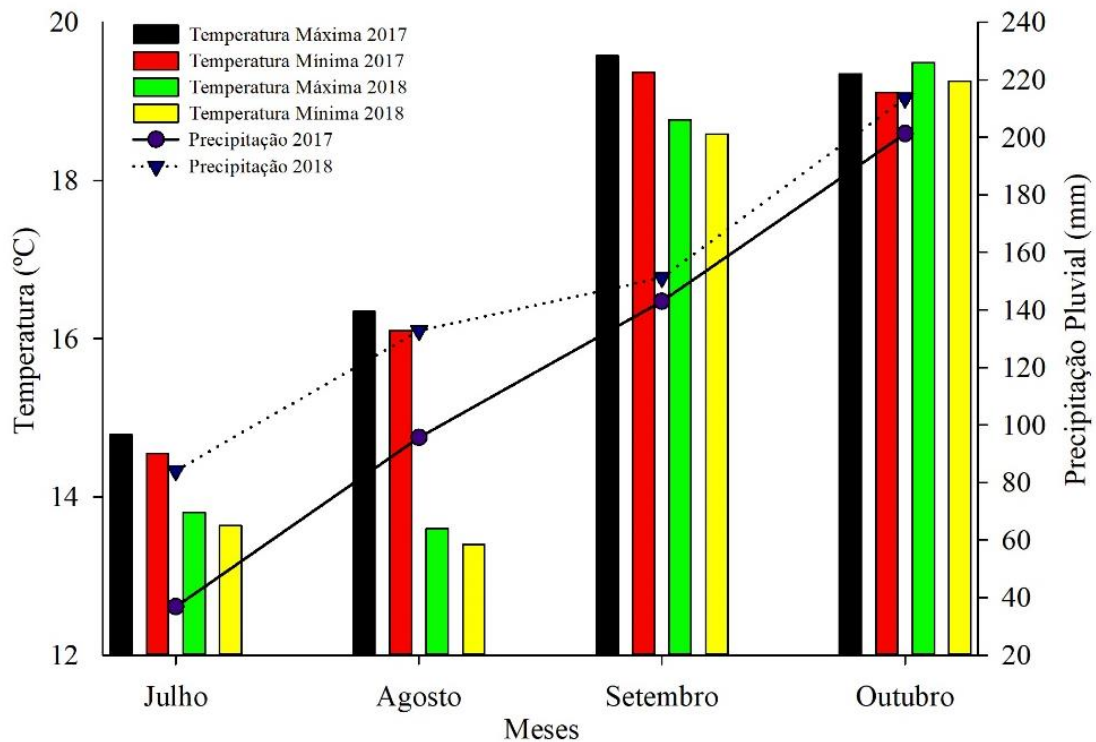


FIGURA 1. Temperaturas máxima e mínima, e precipitação pluvial para as safras 2017 e 2018 na EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados em ambas safras agrícolas. Foram utilizados os genótipos BRS Parrudo e TBIO Toruk e diferentes doses de N na semeadura "base", aplicados na emergência das plantas e em cobertura "sexta folha completamente expandida", seguindo a escala de Haun (1973).

Na safra agrícola de 2017 o experimento foi composto por 20 tratamentos, com três repetições. Cada parcela continha uma área total de 4,5 m² para ambas as cultivares. Na safra agrícola de 2018, o experimento conteve 12 tratamentos, com três repetições para a cultivar BRS Parrudo e quatro repetições para a cultivar TBIO Toruk, onde cada parcela

continha uma área total de 4,14 m² e 5,04 m² respectivamente, conforme mostra a Tabela 1.

TABELA 1. Tratamentos com diferentes doses de N (kg ha⁻¹) aplicados na base e as doses de N (kg ha⁻¹) aplicados em cobertura, na forma de ureia, em ambas as safras agrícolas.

Ano Safra	Dose Base	Dose Cobertura
2017	0	0
	15	20
	30	40
	45	60
2018	0	0
	15	40
	30	80
	45	---

Realizou-se previamente a dessecação da área com o herbicida de ação total a base de glifosato (3 L ha⁻¹) e com o herbicida de contato não seletivo a base de paraquat (1,5 L ha⁻¹). Para o controle de doenças, aplicou-se os fungicidas sistêmicos Fox (0,5 L ha⁻¹) e Opera Ultra (0,75 L ha⁻¹) (REUNIÃO, 2019).

4.2.2 Variáveis analisadas

Determinação de reflectância do dossel com o sensor manual Greenseeker

O sensor Greenseeker[®] permite a obtenção do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), equação 1. O aparelho foi posicionado de forma paralela às linhas da cultura, a uma altura que variou entre 0,8 e 1,0 m acima do topo do dossel. As leituras foram realizadas pelo deslocamento linear do equipamento sobre a unidade experimental. As coletas dos dados iniciaram na emergência da cultura e foram realizadas até o enchimento de grãos (Haun, 1973).

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad \text{(Equação 1)}$$

onde: NIR =infravermelho próximo; R= Vermelho visível.

Produtividade de biomassa e teor de nitrogênio (N) na massa seca da parte aérea da planta

Nos estádios fenológicos de sexta folha completamente expandida e florescimento pleno (safra agrícola 2017 e 2018) e alongamento dos entrenós (safra agrícola 2018), foram coletadas plantas de trigo, em uma área de 0,25m² em cada parcela. Estas foram secas, e posteriormente pesadas, para se determinar a biomassa seca da parte aérea. Para a avaliação do teor de N, as amostras foram moídas e posteriormente analisadas pelo método de Kjeldahl, descrito por Tedesco *et al.* (1995).

Produtividade de grãos

Colheu-se a área útil da parcela, correspondente às oito linhas centrais, retirando as duas linhas das bordaduras. Após, quantificou-se o peso de grãos por unidade experimental e extrapolou-se para produtividade de grãos em kg ha⁻¹, a uma umidade de 13%.

Eficiência agrônômica de uso do nitrogênio (EAN)

A eficiência agrônômica de uso do N (EAN) foi determinada pela equação 2 (Baligar *et al.*, 2001).

$$EAN = \frac{(RF - RNF)}{QNA} \dots\dots\dots(Equação 2)$$

onde, RF= produtividade de grão das parcelas que receberam N, RNF= produtividade das parcelas sem N, e QNA= quantidade de N aplicado em relação com o tratamento testemunha e tratamento que recebeu aplicação de N.

4.2.3 Análise estatística

Submeteu-se os dados obtidos à análise estatística descritiva, análise de variância, e teste de médias por Tukey (5%). Para as variáveis quantitativas, fez-se análise de regressão, e para as variáveis qualitativas, fez-se a análise de correlação linear de Pearson.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produtividade de grãos na cultura do trigo é limitada por outros fatores além da adubação nitrogenada, como pela interação entre genótipo x ambiente e fatores morfológicos, fisiológicos e bioquímicos (Nguyen & Kant, 2018).

Houve diferença estatística significativa entre os tratamentos, para ambos os anos, nas duas cultivares, para a produtividade de grãos (Figura 2). O tratamento que obteve maior rendimento, para ambas as cultivares nas duas safras, foi o de 45 kg ha⁻¹ de N na base mais 80 kg ha⁻¹ de N em cobertura, totalizando uma dose de 125 kg ha⁻¹ de N. As recomendações de adubação para a cultura do trigo são de 15 a 20 kg ha⁻¹ de N na base e 80 kg ha⁻¹ de N em cobertura (SBCS, 2016).

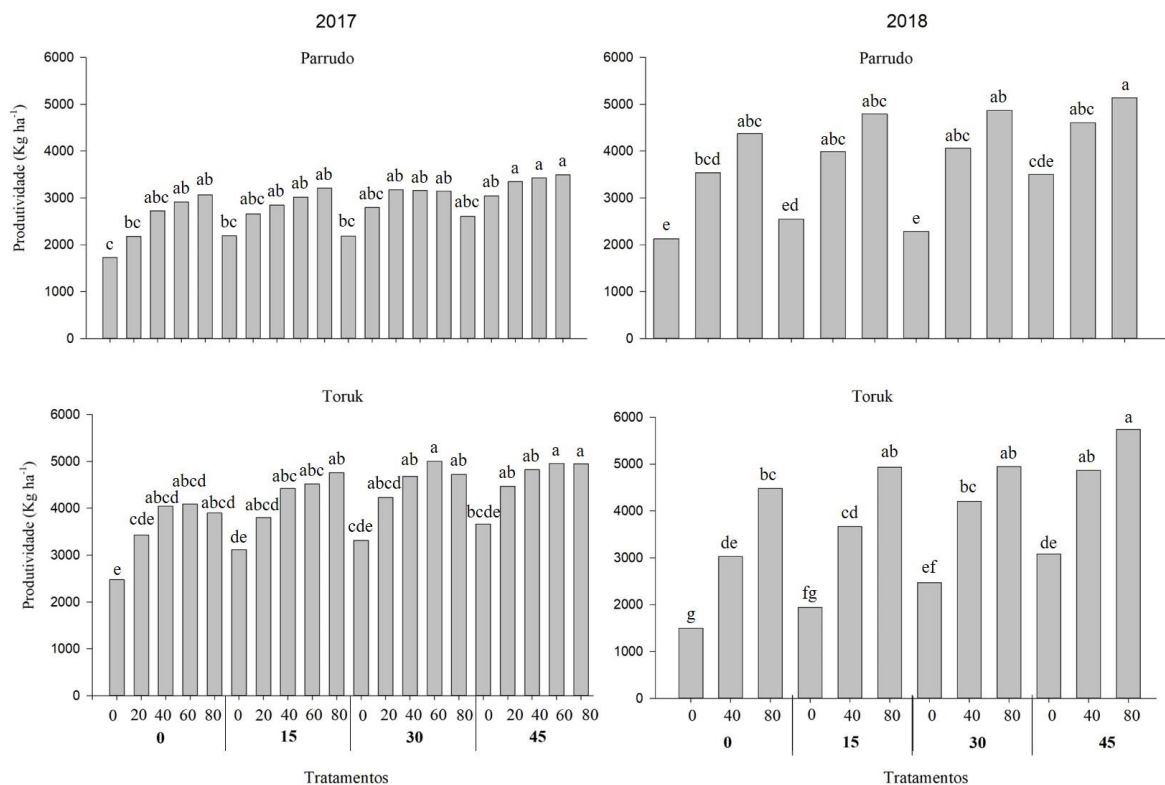


FIGURA 2. Produtividade de grãos (kg ha⁻¹), para as cultivares de trigo BRS Parrudo e TBIO Toruk, nas safras de 2017 e 2018, em função de diferentes doses de N na base e em cobertura. Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada cultivar, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ($p < 0,05$).

Na safra 2018 houve um incremento na produtividade de grãos em relação à safra 2017, para a BRS Parrudo, em todos os tratamentos. Essa variação se explica pelas condições meteorológicas variadas entre os anos, onde a precipitação pluvial foi superior em todo o ciclo da cultura, principalmente durante os estádios vegetativos (Apêndice 1).

Além de afetar a geração e a expansão de novas células, por desfavorecer a divisão meristemática, a redução da água disponível para plantas afeta principalmente a fotossíntese (Fatima *et al.*, 2018). Logo, por menores que sejam os períodos de restrição hídrica, pode-se haver uma diminuição nos teores de massa fresca da planta.

Utilizando as doses totais aplicadas na cultura, fez-se a análise de regressão, a fim de verificar o grau de relação entre produtividade em relação as doses de nitrogênio aplicadas (Figura 2). Observou-se que há uma alta dependência entre as variáveis, e os maiores valores de coeficiente de determinação foram obtidos na safra de 2018, 0,91 e 0,97 para a BRS Parrudo e TBIO Toruk, respectivamente. Apesar de ser implantado sob palhada de soja, que é uma importante fixadora de nitrogênio no solo, houve uma resposta linearmente crescente a adubação nitrogenada.

Ao analisar diferentes níveis de adubação nitrogenada, também para a cultura do trigo, Dalezios & Eskridge, (2018) obtiveram aumento da produtividade até a dose de 150 kg ha⁻¹ de N. Com aplicações superiores, não houve incremento na produtividade de grãos. Verificou-se também que com o aumento do N aplicado, em cobertura na cultura de trigo, houve um incremento linear nas concentrações dos nutrientes P, Ca e S (Gallego *et al.*, 2019). Percebe-se que o aumento da produtividade, está estreitamente relacionado ao conteúdo de água disponível no solo, que além de suprir as necessidades da planta, auxilia na absorção de maiores quantidades de N (Soratto, Carvalho & Arf, 2004).

Com base nos gráficos de regressão (Figura 3) pode-se verificar, também, que há um aumento linear nas produtividades de grão, para as duas cultivares em ambas as safras, em relação ao aumento das doses de fertilizantes nitrogenados. Para a cultivar BRS Parrudo o aumento de produtividade, em geral, era cerca de duas vezes o valor da dose, já para a cultivar TBIO Toruk, esse aumento era em torno de 1,1 para a primeira safra e, 1,7 para a segunda safra.

Liu *et al.* (2016) observaram incremento na produtividade de grãos de trigo, quando se aumentavam os teores de N aplicado, em diferentes regiões da China. Entretanto, como as dosagens nessas regiões são superiores às utilizadas no Rio Grande do Sul, houve uma estabilização da produtividade da cultura quando se aplicavam altos teores de N, o que não foi observado no presente estudo (Liu *et al.*, 2016), os autores usaram modelos de platô de produtividade, juntamente com o teor de proteína nos grãos, para recomendar níveis de N mais baixos dos que estavam sendo utilizados, contribuindo, desta forma, para uma maior sustentabilidade destes sistemas de cultivo.

As diferenças observadas entre os anos, principalmente para a cultivar TBIO Toruk, pode se dever à disponibilidade hídrica durante a condução do experimento. No ano de 2018, houve uma maior precipitação pluvial durante os primeiros meses de desenvolvimento da cultura, o conteúdo de água no solo está diretamente relacionado à absorção de nutrientes pelas raízes das plantas. Em ensaios que utiliza a adubação nitrogenada aliada à irrigação, observou-se que, quanto com o incremento nas lâminas de água aplicadas tinha-se um aumento nas produtividades de grão e também o acúmulo de N no grão da cultura (Mon *et al.*, 2016).

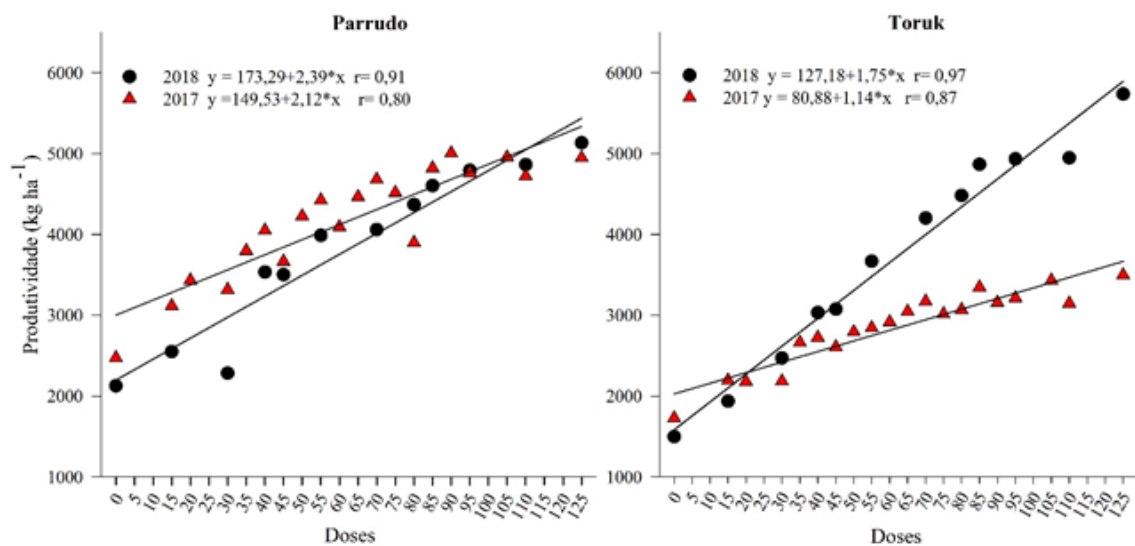


FIGURA 3. Análise de regressão entre as doses totais de N e a produtividade das cultivares BRS Parrudo e TBIO Toruk, nas safras agrícolas 2017 e 2018.

Para a biomassa no estágio fenológico da sexta folha completamente expandida (Figura 4), onde as plantas só haviam recebido a adubação na semeadura, a dose que alcançou maiores teores de massa seca foram as de 30 e 45 kg ha⁻¹, para ambas as cultivares, nas duas safras agrícolas avaliadas. No início do desenvolvimento, após utilizar a reserva da semente, as plantas necessitam de nutrientes para continuarem o seu desenvolvimento. O N é um macronutriente essencial para a formação da molécula da clorofila, e para a produção de diversos componentes metabólicos, que são essenciais para a multiplicação e para o metabolismo celular.

Observa-se que na safra 2017, para ambas as cultivares, a produção de biomassa foi superior que o ano de 2018. Este fato pode ser explicado pela menor precipitação pluvial e pelas maiores temperaturas, em relação ao ano posterior (Figura 1). Como a grande maioria das culturas, o trigo necessita de boa quantidade de chuva no início de seu ciclo, onde pequenos déficits podem ter ocasionado os menores teores de biomassa no estágio da 6ª folha completamente expandida.

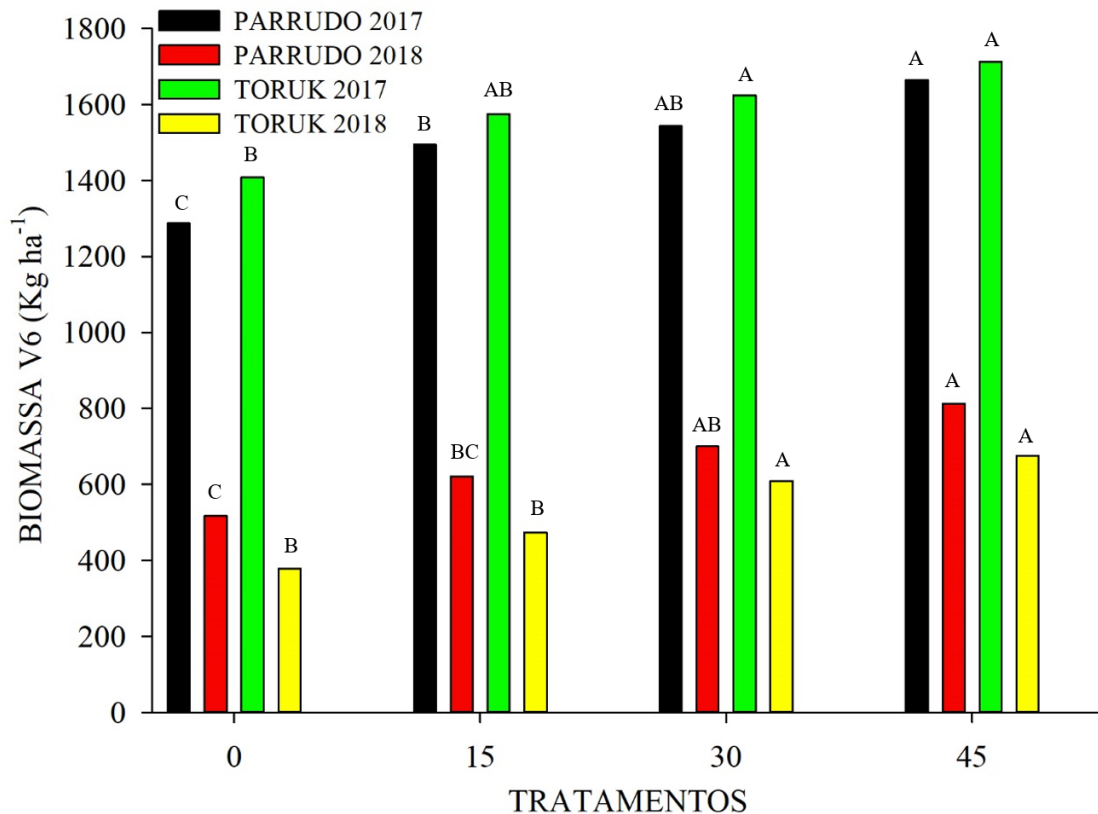


FIGURA 4. Produtividade de biomassa no estágio fenológico de sexta folha (V6) em função das doses de N aplicadas na emergência das plantas, para as cultivares de trigo BRS Parrudo e TBIO Toruk, nas safras agrícolas 2017 e 2018. Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada cultivar e ano, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Nas avaliações de biomassa no estágio de florescimento, a safra de 2018 apresentou maiores médias em relação a safra de 2017 (Figura 5). Essa diferença está atrelada as menores temperaturas, que ocorreram na segunda safra (Figura 1). As temperaturas ótimas para o desenvolvimento da cultura do trigo são de, aproximadamente, 18 a 24°C (Stone & Nicolas, 1994). Entretanto, pequenas oscilações de temperatura podem ocasionar diferenças de produtividade de biomassa e de grãos. As maiores médias de produtividade de biomassa no florescimento do trigo, para a cultivar TBIO Toruk, foram alcançadas pelos tratamentos de 15 e 30 kg ha⁻¹ de N na base e 80 em cobertura. Já as que não receberam nada de adubação nitrogenada, excluindo-se apenas a dose de 15 Kg ha⁻¹ na cultivar BRS Parrudo para a safra de 2017, foram as que obtiveram menores médias.

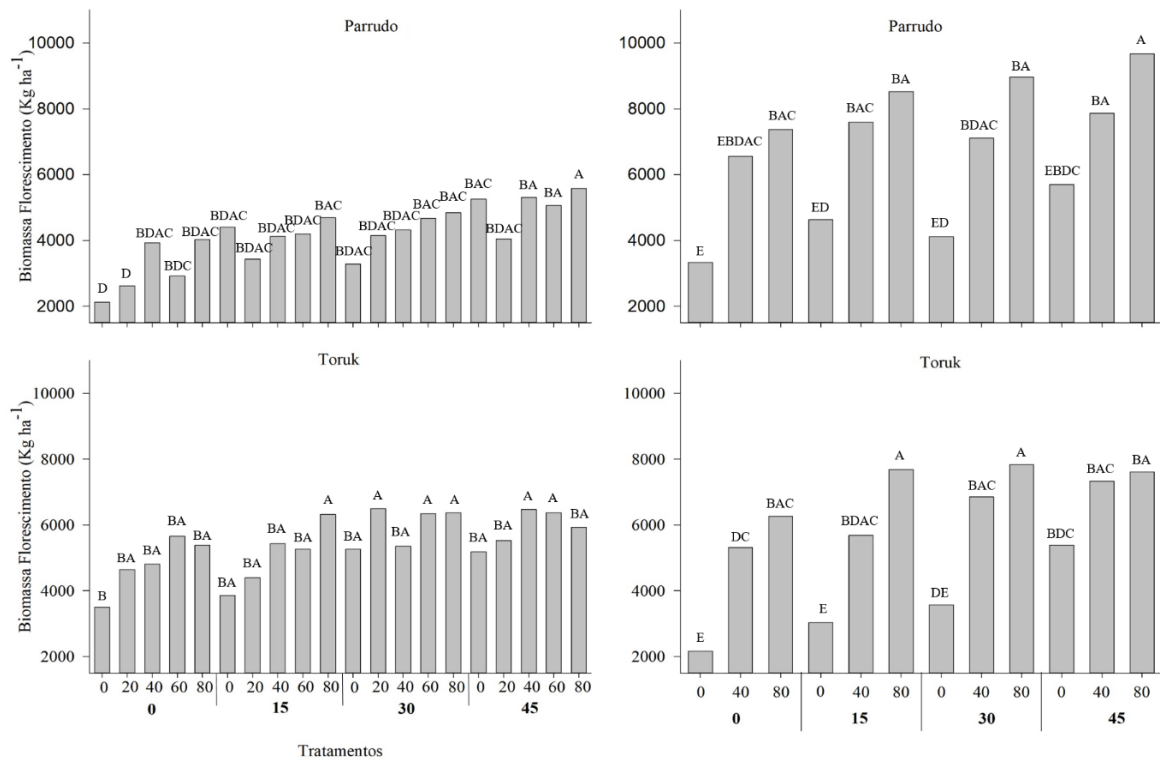


FIGURA 5. Produtividade de biomassa no estágio fenológico de florescimento, para as cultivares de trigo BRS Parrudo e TBIO Toruk, para as safras agrícolas 2017 e 2018, em função de diferentes doses de N, aplicados na emergência das plantas e em cobertura. Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada cultivar, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Ao se analisar a correlação entre as variáveis, verificou-se que o NDVI, a partir do estágio fenológico de segundo nó visível na safra de 2017 (Tabela 2), correlacionou-se fortemente com a biomassa no florescimento e com a produtividade, onde se encontrou 0,5 nos estádios de sétima folha completamente expandida (V7) para a cultivar TBIO Toruk, e no estágio de emborrachamento (Emb), na cultivar BRS Parrudo. O conteúdo de N na biomassa da parte aérea é importante, pois está relacionado a mudanças na alocação de carbono, entre o caule e as espigas, e também, entre o carbono estrutural (Hoogmoed & Sandras, 2018).

Nas avaliações de NDVI no estágio de enchimento de grãos as correlações com a produtividade de grãos, para as duas cultivares, foi superior a 0,9, que se caracteriza como uma alta correlação. Estes resultados são importantes, pois auxiliam na estimativa de produtividade da cultura do trigo.

TABELA 2. Análise de correlação linear de Pearson para as variáveis NDVI, Biomassa no Florescimento (BF), Nitrogênio no tecido (N) e Produtividade de grãos, na safra 2017.

Estádios de desenvolvimento	Biomassa Florescimento		Nitrogênio no tecido		Produtividade	
	TORUK	PARRUDO	TORUK	PARRUDO	TORUK	PARRUDO
V6.8	0.67*	0.77*	0.19	-0.18	0.63*	0.50*
V7.1	0.84*	0.85*	0.50*	0.04	0.89*	0.71*
2° Nó	0.87*	0.83*	0.56*	0.47*	0.92*	0.96*
Emb	0.83*	0.65*	0.62*	0.63*	0.92*	0.95*
Flor	0.82*	0.68*	0.66*	0.69*	0.91*	0.96*
BF (kg ha ⁻¹)	.	.	0.60*	0.201	0.85*	0.75*
N (% no tecido)	.	.	.	.	0.61*	0.58*

Médias seguidas de (*) foram significativas a 5%. V6.8, estágio fenológico de sexta folha completamente expandida e sétima folha não expandida; V7.1, estágio de sétima folha completamente expandida; 2°Nó, estágio fenológico de segundo nó visível; Emb, emborrachamento; Flor, florescimento; BF, biomassa no florescimento, e N, nitrogênio no tecido.

O coeficiente de correlação entre os índices de vegetação e a biomassa no florescimento, também foram elevados na safra 2018 (Tabela 3). Com exceção do estágio de florescimento, os coeficientes foram superiores a 0,9. Quando se fez a correlação entre o NDVI e a produtividade de grãos, para todas as avaliações, com exceção da cultivar BRS Parrudo no estágio de florescimento, todos os coeficientes foram superiores a 0,91. Há também uma correlação muito alta entre a biomassa no florescimento e a produtividade de grão, para as duas cultivares.

TABELA 3. Análise de correlação linear de Pearson para as variáveis NDVI, Biomassa no Florescimento (BF), Porcentagem de Nitrogênio no tecido (% N) e Produtividade de grãos, na safra 2018.

Estádios de desenvolvimento	Biomassa Florescimento		Nitrogênio no tecido		Produtividade	
	TORUK	PARRUDO	TORU K	PARRUD O	TORU K	PARRUD O
2°Nó	0.96*	0.93*	0.43	0.85*	0.95*	0.93*
3°Nó	0.97*	0.94*	0.55	0.88*	0.97*	0.95*
Emb	0.96*	0.94*	0.60*	0.82*	0.94*	0.95*
Esp	0.96*	0.94*	0.63*	0.86*	0.94*	0.95*
Flor	0.95*	0.93*	0.63*	0.78*	0.97*	0.94*
BF (kg ha ⁻¹)	.	.	0.48	0.79*	0.97*	0.98*
N (% no tecido)	.	.	.	.	0.47	0.86*

Médias seguidas de (*) foram significativas a 5%. 2°Nó, estágio fenológico de segundo nó visível; Emb, emborrachamento; Esp, espigamento; Flor, florescimento; BF, biomassa no florescimento, e N, nitrogênio no tecido.

Os altos coeficientes de correlação encontrados, nas duas safras para as duas cultivares, significam que há uma forte relação entre as variáveis analisadas, e pode auxiliar na tomada de decisão e na estimativa de produtividade de grãos.

Não houve diferença estatística significativa para a eficiência agronômica do Nitrogênio (EAN), esta variável representa a quantidade de grãos de trigo que são produzidos, kg ha^{-1} , para cada kg de nitrogênio aplicado (Drechsel *et al.*, 2015). Por ter sido implantado sob palha de soja, o nitrogênio que foi fixado pela cultura antecessora pode ter suprido, em partes, as necessidades do trigo.

4.4 CONCLUSÃO

O aumento nas doses de N contribui para o aumento nas produtividades de biomassa e de grãos, para as cultivares TBIO Toruk e BRS Parrudo. As doses que se mostraram mais eficientes para o aumento, tanto no teor de biomassa, quanto na produtividade de grãos, foram as de 30 e 45 kg ha^{-1} de N na base combinada a 80 Kg ha^{-1} de N em cobertura.

As leituras de NDVI no estágio de florescimento são as que melhor se relacionam com a biomassa e a produtividade de grãos. Assim sendo, o uso de sensores que fornecem como resultado o índice NDVI, se tornam bons estimadores dessas variáveis.

4.5 REFERÊNCIAS

- BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K.; HE, Z.L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in soil science and plant analysis**. Nova York, v.32, p. 921-950, 2001.
- BASSO, B. et al. Variable rate nitrogen fertilizer response in wheat using remote sensing. **Precision Agriculture**. Amsterdam, v. 17, p. 168–182, 2016.
- BERGAMASCHI, H. (Org) Clima da Estação Experimental da UFRGS e região de abrangência. UFRGS. Porto Alegre. 2003.
- CHETAN, F. et al. Influence of soil tillage upon weeds, production and economical efficiency of corn crop. **Agrolife scientific journal**. Bucareste, v. 5, p. 36-44. 2016.

DALEZIOS, N.R.; ESKRIDGE, K. Variable-rate nitrogen fertilization of winter wheat under high spatial resolution. **Precision Agriculture**. Amsterdam, v.19, p.570–587, 2018.

DRECHSEL, P. (Org) **Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification**. International Fertilizer Industry Association, International Water Management Institute, International Plant Nutrition Institute, and International Potash Institute. 1th. ed., 270 p. 2015.

ELSAYED, S.; BARMEIER, G.; SCHMIDHALTER, U. Passive Reflectance Sensing and Digital Image Analysis Allows for Assessing the Biomass and Nitrogen Status of Wheat in Early and Late Tillering Stages. **Frontiers Plant Science**. Berna, v. 9, p. 1-15, 2018.

FATIMA, M. et al Drought Effect and Tolerance Potential of Wheat: A Mini-Review. **International Journal of Nanotechnology and Allied Sciences**. Narowal, v. 2, p. 16-21, 2018.

FINNEY, D.M.; WHITE, C.M.; KAYE, J.P. Biomass production and carbon/nitrogen ratio influence ecosystem services from cover crop mixtures. **Organic agriculture and agroecology**. v. 108, p. 39–52, 2016.

FILHO, M.C.M.T. et al. Doses, fontes e épocas de aplicação de nitrogênio em trigo irrigado em plantio direto. **Pesquisa agropecuária brasileira**. Brasília, v. 45, p. 797-804, 2010.

GALLEGO, J.A.F. et al. Low-cost assessment of grain yield in durum wheat using RGB images. **European Journal of Agronomy**. v. 105, p. 146–156, 2019.

GONGA, H. et al; Effects of tillage practices and microbial agent applications on dry matter accumulation, yield and the soil microbial index of winter wheat in North China. **Soil & Tillage Research**. Amsterdam, v. 184, p. 235–242, 2018.

HAUN, J.R. Visual quantification of wheat development. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, n.1, p. 116-119, 1973.

HEROLDOVÁ, M. et al. Influence of no-tillage versus tillage system on common vole (*Microtus arvalis*) population density. *Pest Management Science* v. 74, p. 1346–1350, 2017.

HOOGMOED, M.; SANDRAS, V.O. Water stress scatters nitrogen dilution curves in wheat. **Frontiers in Plant Science**. Berna, v.9, p.1-11, 2018.

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

KUHN, N.J. et al. Conservation tillage and sustainable intensification of agriculture: regional vs. global benefit analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. Amsterdam, v. 216, p. 155-165, 2016.

LEGHARI, S.J. et al. Role of Nitrogen for Plant Growth and Development: A review. **Advances in Environmental Biology**. Amman, v. 10, p. 209-218, 2016.

LIU, H. et al. Optimal nitrogen input for higher efficiency and lower environmental impacts of winter wheat production in China. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. Amsterdam, v. 224, p. 1–11, 2016.

LU, D. et al. Integrated crop-N system management to establish high wheat yield population. **Field Crops Research**. Amsterdam, v. 191, p. 66–74, 2016.

SBCS – SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016. 376 p.

MON, J. et al. Interactive effects of nitrogen fertilization and irrigation on grain yield, canopy temperature, and nitrogen use efficiency in over head sprinkler-irrigated durum wheat. **Field Crops Research**. Amsterdam, v. 191, p. 54–65, 2016.

NGUYEN, G.N.; KANT, S. Improving nitrogen use efficiency in plants: effective phenotyping in conjunction with agronomic and genetic approaches. **Functional Plant Biology**. Camberra, v. 45, p. 606–619, 2018.

REUNIÃO da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale. Informações técnicas para trigo e triticale - safra 2019. Brasília: EMBRAPA, 240 p., 2018.

SORATTO, R.P.; CARVALHO, M.A.C.; ARF, O. Teor de clorofila e produtividade do feijoeiro em razão da adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 39, p. 895-901, 2004.

STONE, P.J. e NICOLAS, M.E. Wheat cultivars vary widely in their responses of grain yield and quality to short periods of post-anthesis heat-stress. **Australian Journal of Plant Physiology**. Camberra, v. 21, p. 887–900, 1994.

STRECK, E.V., et al. Solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS: EMATER/RS-ASCAR, 2018. 251 p.

TEDESCO, M.J. (Org) **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. Ed., Porto Alegre. 1995. (Boletim Técnico).

ZÖRB, C.; LUDEWIG, U.; HAWKESFORD, M.J. Perspective on wheat yield and quality with reduced nitrogen supply. **Trends in Plant Science**. Amsterdam, v. 23, p. 1029-1037, 2018.

5 CAPÍTULO 3

Índices de vegetação obtidos por veículo aéreo não tripulado (VANT) e sua relação com a produtividade de grãos e biomassa de parte aérea para a cultura do trigo

5.1 INTRODUÇÃO

A crescente utilização de VANTs no campo da agricultura vem ganhando evidência nos últimos anos, pois são muitos os benefícios para produtores e prestadores de serviço pela facilidade de uso, porém há necessidade de um maior conhecimento nesta área para viabilizar o uso em grande escala (Chen, Zhang & Tao, 2018). A coleta destas informações em tempo real, e de forma não destrutiva, possibilitam também a compreensão de processos fisiológicos que ocorrem com as plantas, como o uso do nitrogênio (N) (Magney *et al.*, 2016; Zhanga *et al.*, 2018).

Os avanços tecnológicos introduzidos nas lavouras pela AP, como os sistemas de posicionamento global (GPS), máquinas para aplicações em taxa variável, sensoriamento remoto (SR), estão auxiliando os produtores em diversos setores da propriedade, desde a automação agrícola e acompanhamento de produtividade até o uso de sensores para estimativa do estado nutricional de plantas (Khanal, Fulton & Shearer, 2017).

Uma das ferramentas do sensoriamento remoto utilizadas são os sensores montados em VANTs e um dos seus principais benefícios é a flexibilidade temporal, e espacial, em relação ao uso de imagens de satélite. As coletas de dados podem ser realizadas a qualquer hora do dia, além de possibilitar a captura de imagens em diferentes condições de luminosidade (Wal *et al.*, 2013; Jin *et al.*, 2017).

Os VANTs utilizados na agricultura, de maneira geral, são equipados com câmeras que são empregados no monitoramento dos cultivos e também na aplicação de insumos. As câmeras que vão a bordo destas plataformas podem ser classificadas como espectral, multiespectral e hiperespectral. Cada uma delas fornece diferentes valores de bandas espectrais que poderão fornecer diferentes respostas para o produtor (Mogili & Deepak, 2018).

Os sensores se baseiam nas características e nas mudanças de reflectância dos espectros eletromagnéticos das plantas para detectar doenças, mudanças de temperatura,

alterações no conteúdo de biomassa, entre outros (Lee & Ehsani, 2015). Os dados obtidos com base nas imagens, que posteriormente darão origem aos IVs, estão relacionados às bandas espectrais que o sensor detecta. Cada banda se relaciona com diferentes parâmetros das plantas, como teor de água, pigmentos, teor de açúcar e carboidratos, conteúdo de proteínas, entre outros (Khanal, Fulton & Shearer, 2017). A partir das imagens coletadas pelos VANTs, é possível se criar índices de vegetação (IV). Estes IV, possibilitam a verificação do vigor das plantas, bem como auxiliam no manejo das áreas de cultivo. Entretanto, é necessária a validação destes índices com características do dossel, medidas *in situ* como a produtividade de biomassa de parte aérea, índice de área foliar e produtividade de grãos (Xue & Su, 2017).

O objetivo foi avaliar os diferentes índices de vegetação, obtidos a partir de imagens obtidas por VANTs e relacioná-los com as variáveis de biomassa seca da parte aérea e produtividade de grãos e relacionando com o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), obtido por sensor proximal.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Localização e características da área de estudo

O experimento foi conduzido na safra agrícola de 2017 na Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), no município de Eldorado do Sul (RS). A área experimental está situada na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul, a uma altitude média de 46 metros acima do nível do mar. O clima é do tipo Cfa, conforme a classificação de Koppen (IPAGRO, 1979).

A precipitação pluvial média anual em Eldorado do Sul é de 1440 mm e a temperatura média do ar mensal varia entre 14 e 25°C (Bergamaschi *et al.*, 2003). O solo é caracterizado como Argissolo Vermelho Distrófico Típico (Streck *et al.*, 2018).

5.2.2 Delineamento experimental e Tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, as cultivares de trigo utilizadas foram BRS Parrudo e TBIO Toruk. O experimento conteve 20 tratamentos (Tabela 1), com três repetições, sendo eles diferentes doses de adubação nitrogenada na semeadura, aplicado na emergência das plantas, e em cobertura, onde a aplicação foi realizada no estágio fenológico de sexta folha completamente expandida, segundo a escala de Haun (1973). As unidades experimentais continham uma área total de 4,5 m².

TABELA 1. Tratamentos com diferentes doses de N (kg ha⁻¹) na base, em cobertura, para os anos safra de 2017.

Dose Base (kg ha⁻¹)	Dose Cobertura (kg ha⁻¹)
0	0
	20
	40
	60
	80
15	0
	20
	40
	60
	80
30	0
	20
	40
	60
	80
45	0
	20
	40
	60
	80

5.2.3 Tratos Culturais

A cultura do trigo foi semeada em sucessão a cultura da soja, onde se realizou previamente a dessecação com o herbicida de ação total a base de glifosato (3 L ha⁻¹) e com o herbicida de contato não seletivo a base de paraquat (1,5 L ha⁻¹). Para o controle de

doenças, em ambos os anos, aplicou-se os fungicidas sistêmicos Fox (0,5 L ha⁻¹) e Opera Ultra (0,75 L ha⁻¹). (REUNIÃO, 2018).

5.2.4 Variáveis analisadas

Determinação do NDVI com sensor proximal

O sensor Greenseeker[®] faz a leitura da reflectância do dossel vegetativo, originando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Equação 1). O aparelho foi posicionado de forma paralela às linhas da cultura, a uma altura que variou entre 0,8 e 1,0 m acima do topo do dossel. As leituras foram realizadas pelo deslocamento linear do equipamento sobre a unidade experimental. As coletas dos dados iniciaram na emergência da cultura e foram realizadas até o enchimento de grãos (Haun, 1973).

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad \text{(Equação 1)}$$

onde: NIR =reflectância no infravermelho próximo; R= reflectância no vermelho.

Determinação de diferentes índices de vegetação por meio de imagens aéreas

Foram coletadas imagens com o auxílio de VANT modelo DJI Matrice 100[®], o qual possuía a bordo duas câmeras, uma multiespectral Sequoia Parrot[®], que captura imagens nos espectros do infravermelho próximo (NIR, 790 nm), vermelho (660 nm), verde (550 nm), e red edge (735 nm), e uma câmera Zenmuse X3, a qual capta imagens no espectro vermelho (~660 nm), verde (~550 nm) e azul (~480 nm).

As imagens foram co-registradas, então geradou-se os ortomosaicos no software PhotoScan[®]. Após, as imagens foram analisadas com o auxílio do programa eCognition Developer 64[®], onde se fez a média dos pixels de cada banda, em cada parcela do experimento, para todas as avaliações. Foram extraídos os valores digitais médios das bandas dos espectros obtidos, para então calcular os diferentes índices de vegetação (Tabelas 2 e 3). Os voos foram realizados em datas próximas às coletas de biomassa, sendo que, para a coleta no estágio de seis folhas completamente expandidas, o voo ocorreu no

dia 27/07/2017 e, para a coleta de biomassa no florescimento, bem como para a estimativa da produtividade de grãos, a data de voo utilizada foi de 13/09/2017. Salienta-se que para a primeira data, o voo foi realizado somente com a câmera RGB (Zenmuse X3), e para as demais, utilizou-se as duas câmeras.

TABELA 2. Índices de vegetação calculados com base nas imagens da câmera Zenmuse X3® (RGB).

ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	EQUAÇÃO	REFERÊNCIA
Excesso de verde I	$ExVI = [(2 * G) - R - B]$	Mao <i>et al.</i> , 2003
Excesso vermelho - Excesso verde	$ExcRV = [ExV - (1,4 * R) - G]$	Mao <i>et al.</i> , 2003
Índice da diferença normalizada	$IDN = \frac{G - R}{G + R}$	Perez <i>et al.</i> , 2000
Índice de vegetação Verde-Vermelho	$IVVR = \frac{R - G}{R + G}$	
Índice de vegetação Azul-Vermelho	$IVAV = \frac{R - B}{R + B}$	
VARI	$VARI = \frac{G - R}{G + R - B}$	Gitelson <i>et al.</i> , 2002
Índice de vegetação ajustada ao solo	$SAVI = \frac{[(1 + L) * (G - R)]}{G + R + L}$	Huete, 1988
Índice da razão simples	$IRS = \left(\frac{G}{R}\right)$	Carter, 1994
Índice de verde normalizado	$IVN = \frac{G}{R + G + B}$	
Índice de folha verde	$IFV = \frac{[(2 * G) - R - B]}{[(2 * G) + R + B]}$	Gitelson <i>et al.</i> , 1996

TABELA 3. Índices de vegetação calculados com base nas imagens da câmera Sequoia Parrot®.

ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	EQUAÇÃO	REFERÊNCIA
Índice de vegetação por diferença normalizada	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	Rouse <i>et al.</i> , 1974
Índice de veg. diferença normalizada pelo verde	$GNDVI = \frac{NIR - G}{NIR + G}$	Gitelson <i>et al.</i> , 1996
Índice de veg. pela razão do verde	$IVRV = \frac{NIR}{G}$	Buschmann & Nagel, 1993
Índice veg. por diferença de verde	$IVDV = NIR - G$	Tucker, 1979
Índice de clorofila verde	$ICV = \frac{NIR}{G - 1}$	Gitelson <i>et al.</i> , 2005
Índice veg. ajustada ao solo verde	$SAVIV = \frac{[1,5 * (NIR - G)]}{NIR + G + 0,5}$	Sripada <i>et al.</i> , 2006
Índice normalizado pelo verde	$INV = \frac{G}{NIR + RE + G}$	Sripada <i>et al.</i> , 2006
Índice Normalizado por NIR	$INNIR = \frac{NIR}{NIR + RE + G}$	Sripada <i>et al.</i> , 2006
Índice de vegetação pela razão do RE	$IVRRE = \frac{NIR}{RE}$	Jasper <i>et al.</i> 2009
Índice de veg. pela razão do Red edge e verde	$IVRREV = RE - G$	Cao <i>et al.</i> , 2013 (modificado de Tucker, 1979)
GNDVI pelo RE	$GNDVIRE = \frac{RE - G}{RE + G}$	Gitelson <i>et al.</i> , 1996
Índice de clorofila RE	$ICRE = \frac{NIR}{RE - 1}$	Gitelson <i>et al.</i> , 2005
Índice de diferença duplo modificado	$IDDM = \frac{NIR - RE}{RE - G}$	Le Maire <i>et al.</i> 2004
Índice de veg. de alcance dinâmico verde	$IVADV = \frac{[0,12 * (NIR - G)]}{[0,12 * (NIR + G)]}$	Cao <i>et al.</i> , 2013 (modificado de Gitelson, 2004)
Índice de veg. Por dif. Normalizada pelo RE	$NDRE = \frac{(NIR - RE)}{(NIR + RE)}$	Gitelson <i>et al.</i> , 1996
Índice de vegetação melhorado	$IVM = \frac{[2,4 * (NIR - R)]}{(NIR + R + 1)}$	Liu & Huete, 1995
Índice de resistência atmosférica visível	$IRAVIS = \frac{(RE - R)}{(RE + R)}$	
Índice de clorofila pelo RE	$ICRE = \frac{NIR}{RE} - 1$	Gitelson <i>et al.</i> , 2005

Produtividade de biomassa da parte aérea

Nos estádios fenológicos de seis folhas completamente expandidas e pleno florescimento, foram coletadas plantas em área de 0,25m² em cada parcela. Estas foram secas, e posteriormente pesadas, para se estimar a quantidade de massa seca de parte área por hectare.

Produtividade de grãos

Para a estimativa de produtividade de grãos, foi colhida a área útil da parcela, correspondente às oito linhas centrais, retirando-se as duas linhas das bordaduras. Após, foi quantificado o peso de grãos por unidade experimental e então foram extrapolados para produtividade de grãos em kg ha⁻¹, a uma umidade de 13%.

5.2.5 Análise estatística

Submeteu-se os dados obtidos à análise estatística descritiva e análise de variância. Para as variáveis quantitativas, foi avaliada a análise de regressão e, para as variáveis qualitativas, foi determinada a correlação linear de Pearson.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O uso do NDVI para o monitoramento e manejo dos cultivos e para a estimativa da produtividade de grãos é muito utilizado atualmente na agricultura. Portanto, verificar sua relação com as demais variáveis torna-se importante, para que haja um balizador para os demais índices de vegetação avaliados a partir de sensores acoplados em VANTs.

Os valores dos coeficientes de correlação entre os índices de vegetação, obtidos com a câmera Sequoia foram altos, quando relacionados com o NDVI obtido pelo sensor Greenseeker, com a produtividade de biomassa no estágio de florescimento e também com a produtividade de grãos (Tabela 4). Cao *et al.* (2015), ao avaliarem a relação entre diferentes índices de vegetação e a quantidade de massa seca de parte aérea de plantas de trigo de inverno, observaram valores de *r* acima de 0,75. Os autores constataram que a utilização de sensores que gerem mais de um índice, ou utilizem mais de duas bandas do

espectro, é importante para que haja uma melhor aferição do estado nutricional da cultura, possibilitando, assim, que seja realizado um manejo mais específico e que atenda a demanda das áreas de estudo (Cao *et al.*, 2015).

TABELA 4. Correlação de Pearson entre os diferentes índices de vegetação obtidos pela câmera Sequoia com o NDVI obtido com o sensor Greenseeker, produtividade de biomassa da parte aérea no florescimento (BF) e produtividade de grãos (PROD), nas cultivares de trigo TBIO Toruk e BRS Parrudo.

IV	NDVIG		BF		PROD	
	TOR	PAR	TOR	PAR	TOR	PAR
NDRE	0,95	0,98	0,81	0,71	0,90	0,93
NDVI	0,97	0,97	0,78	0,70	0,89	0,96
GNDVI	0,97	0,99	0,80	0,69	0,89	0,94
IVRV	0,97	0,98	0,80	0,69	0,89	0,93
IVDV	0,97	0,98	0,80	0,70	0,89	0,94
ICV	0,97	0,98	0,80	0,69	0,89	0,93
SAVIV	0,97	0,99	0,80	0,69	0,89	0,94
INV	-0,97	-0,99	-0,80	-0,68	-0,89	-0,94
INNIR	0,97	0,98	0,81	0,70	0,89	0,94
IVRRE	0,95	0,97	0,81	0,71	0,89	0,92
IVRREV	0,97	0,98	0,77	0,67	0,86	0,94
GNDVI RE	0,97	0,99	0,78	0,65	0,88	0,93
ICRE	0,95	0,97	0,81	0,71	0,89	0,92
IDDM	0,96	0,92	0,81	0,74	0,89	0,90
IVAD V	0,97	0,99	0,80	0,69	0,89	0,94
IVM	0,97	0,97	0,78	0,70	0,89	0,96
IRA VIS	0,96	0,93	0,76	0,67	0,87	0,94
ICRE	0,95	0,97	0,81	0,71	0,89	0,92

NDVIG: NDVI Greenseeker; BF: Biomassa no Florescimento; PROD: Produtividade de grãos; TOR: TBIO Toruk; PAR: BRS Parrudo. Todas as correlações foram significativas a 1% ($p < 0,01$).

Os índices GNDVI, NDRE e IDDM obtiveram os maiores valores do coeficiente de correlação para as variáveis produtividade de biomassa no florescimento e produtividade de grãos (tabela 4). As relações, para todos os índices, foram superiores com a produtividade de grãos, se comparadas à produtividade de biomassa no florescimento. Este fato pode ser explicado pela saturação que grande parte dos índices manifestam quando a planta atinge seu máximo acúmulo de biomassa. Observa-se que há um aumento

nos valores do NDVI até o estágio fenológico do florescimento e, após, há uma diminuição destes valores, até que a planta atinja a maturação completa (Duan *et al.*, 2017).

Observa-se que os coeficientes de correlação foram menores quando avaliou-se as variáveis com os índices obtidos somente na região do visível do espectro, se comparados aos valores obtidos pela câmera multiespectral. Entretanto, os coeficientes de correlação observados para a produtividade de grãos, quando avaliados pela câmera X3, foram superiores, chegando a 0,98 (Tabela 5).

Os resultados das correlações também foram diferentes para as cultivares sendo superiores, na maioria dos casos, na cultivar BRS Parrudo. Este fato se relaciona aos componentes que compõem as folhas de cada cultivar, estes são característicos de cada genótipo e influenciam diretamente na reflectância de cada banda, como, por exemplo, o teor de clorofila e/ou conteúdo de água. Este pode ser um dos motivos, pelo qual não houve diferença entre as correlações para a cultivar TBIO Toruk para produtividade de biomassa no estágio de sexta folha (V6) (Tabela 5), e a cultivar BRS Parrudo apresentou coeficientes altos.

Câmeras com espectro RGB também foram utilizadas em estudos que avaliaram a relação entre índices de vegetação com a biomassa seca total de plantas de milho. Ballesteros *et al.* (2018) encontraram valores altos, mas não superiores a 0,8, sugerindo que apenas um índice para explicar os resultados de biomassa pode não ser suficiente, visto que podem sofrer interferências de outros fatores como o solo, palhas de culturas anteriores, entre outros.

Cao *et al.* (2015) citam que a avaliação de plantas ainda em seus estágios fenológicos iniciais, com sensores aéreos, pode ser afetada, uma vez que há uma grande porção de solo ainda não coberto pelas folhas. Este pode ser o motivo pelo qual não houve significância na correlação entre os índices de vegetação e produtividade de biomassa no estágio de sexta folha para a cultivar TBIO Toruk (Tabela 5).

TABELA 5. Correlação de Pearson entre os diferentes índices de vegetação obtidos pela câmera RGB com NDVI do sensor Greenseeker, produtividade de biomassa na sexta folha, produtividade de biomassa do florescimento e produtividade de grãos.

	NDVIG		BV6		BF		PROD	
	TOR	PAR	TOR	PAR	TOR	PAR	TOR	PAR
ExcV	0,89	0,80	0,42 ^{ns}	0,83	0,56	0,72	0,72	0,85
ExcRV	0,94	0,98	0,48 ^{ns}	0,85	0,76	0,70	0,89	0,98
IDN	0,93	0,98	0,47 ^{ns}	0,86	0,73	0,71	0,88	0,98
IVVR	-0,93	-0,98	-0,47 ^{ns}	-0,86	-0,73	-0,71	-0,88	-0,98
IVARV	-0,83	-0,96	-0,20 ^{ns}	-0,67	-0,73	-0,63	-0,85	-0,93
VARI	0,93	0,98	0,47 ^{ns}	0,87	0,73	0,71	0,88	0,98
SAVI	0,93	0,98	0,47 ^{ns}	0,86	0,73	0,71	0,88	0,98
IRS	0,93	0,98	0,48 ^{ns}	0,87	0,73	0,71	0,88	0,98
IVN	0,91	0,87	0,51 ^{ns}	0,86	0,70	0,73	0,86	0,91
IFV	0,91	0,87	0,51 ^{ns}	0,86	0,70	0,73	0,86	0,91

NDVIG: NDVI Greenseeker; BV6: Biomassa em sexta folha; BF: Biomassa no Florescimento; PROD: Produtividade de grãos; TOR: TBIO Toruk; PAR: BRS Parrudo. Coeficientes seguidos de ^{ns} não apresentaram diferença estatística, as demais correlações foram significativas a 1% ($p < 0,01$).

Segundo Callegari-Jacques (2003), valores de coeficientes de correlação acima de 0,55 são considerados altos e de 0,8 são muito altos e, desta forma, todos os índices, com exceção dos índices RGB para a variável produtividade de biomassa da parte aérea no estágio de sexta folha da cultivar TBIO Toruk, foram classificados como altos ou muito altos.

No caso dos índices INV, IVVR e IVARV, que apresentaram coeficiente de correlação negativos inferiores a -0,6, explicados pela operação matemática utilizada no índice. Todavia, estes índices podem ser utilizados para estimar as variáveis.

Os valores de reflectância na região do espectro do infravermelho próximo (NIR) tendem a aumentar ao longo do ciclo da cultura, em proporções maiores que os espectros do visível, que tem um padrão oposto, ou seja, tendem a diminuir ao longo do ciclo da cultura (Elvanidi *et al.*, 2018). Desta forma, os valores dos coeficientes de correlação entre os índices obtidos pela câmera Sequoia[®] se mostraram superiores para produtividade de biomassa no florescimento, em relação aos valores fornecidos pela câmera Zenmuse X3[®].

Com base nos coeficientes de correlação de Pearson, com maiores valores calculados entre os índices de vegetação e as variáveis produtividade de biomassa no florescimento, NDVI Greenseeker e produtividade de grãos, fez-se análises de regressão, a afim de verificar o comportamento destes dados. É possível observar que a regressão entre produtividade de grãos e o NDVI obtido a partir do sensor Greenseeker, avaliado no estágio de florescimento, apresentou aumento linear (Figura 1). Logo, os maiores valores de NDVI corresponderam às maiores produtividades de grão. Pode-se observar também que os valores do coeficiente de determinação (R^2), para as duas cultivares, foram altos, sendo de 0,92 para a cultivar BRS Parrudo e 0,82 para a TBIO Toruk.

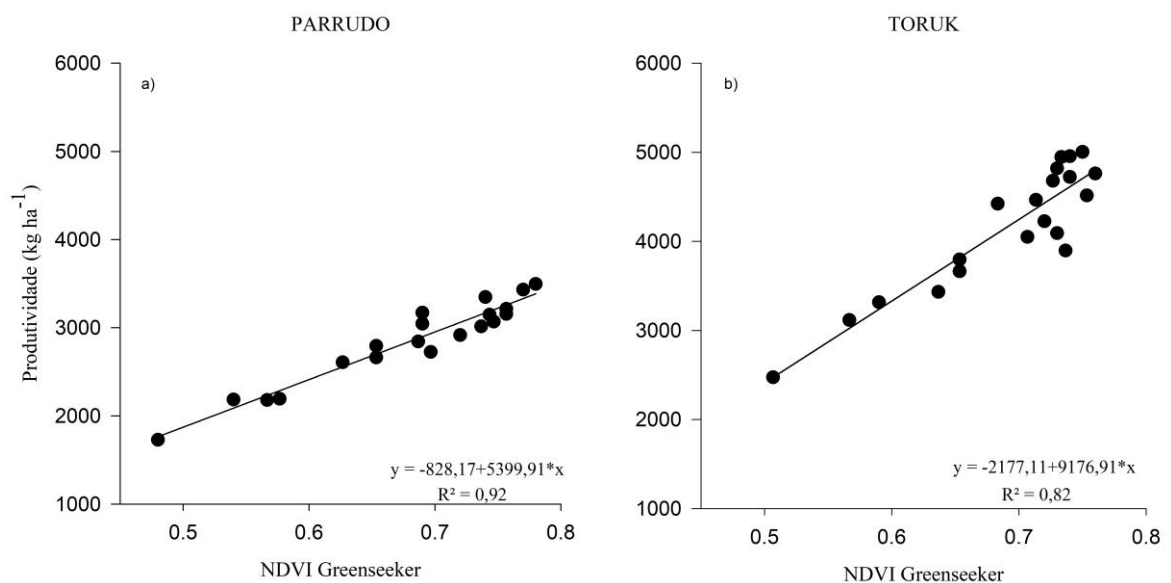


FIGURA 1. Análise de regressão entre o índice NDVI obtido pelo sensor Greenseeker, no estágio de florescimento, e a produtividade de grãos para as cultivares BRS Parrudo (a) e TBIO Toruk (b).

O emprego do índice NDVI para estimativa de produtividade de grãos é bem conhecido e utilizado em diversas culturas, uma vez que este índice se relaciona fortemente com o conteúdo de biomassa de parte aérea. A biomassa no estágio fenológico de florescimento, por sua vez possui alta relação com o potencial produtivo da cultura do trigo. Os valores do coeficiente de correlação para a regressão entre a produtividade de grãos e os índices de vegetação NDVI, SAVI e ExcRV, também foram altos (Figura 2), sendo superiores a 0,87 para a cultivar BRS Parrudo e, aproximadamente, 0,8 para a

cultivar TBIO Toruk, sendo que o índice ExcRV foi o que obteve os maiores valores de R^2 , 0,95 e 0,79, respectivamente.

Avaliações realizadas durante o estágio de florescimento do trigo resultam em altas relações com a produtividade da cultura, cerca de 0,82 (Duan *et al.*, 2017; Guan *et al.*, 2019), demonstrando que, quando as plantas se encontram no estágio fenológico de florescimento, a estimativa a produtividade de grãos da cultura do trigo é precisa, uma vez é neste estágio que há um alto acúmulo de biomassa, que se relaciona fortemente com a produtividade de grãos.

Como já mencionado, a biomassa refere-se ao conteúdo de compostos presentes nas folhas, e o índice ExcRV leva em consideração, para seu cálculo, os espectros do visível (vermelho, verde e azul). Desta forma, explica-se o bom desempenho do índice em relação à biomassa no florescimento, visto que abrange boa parte dos comprimentos de onda que são refletidos pelas folhas (Woebbecke *et al.*, 1995).

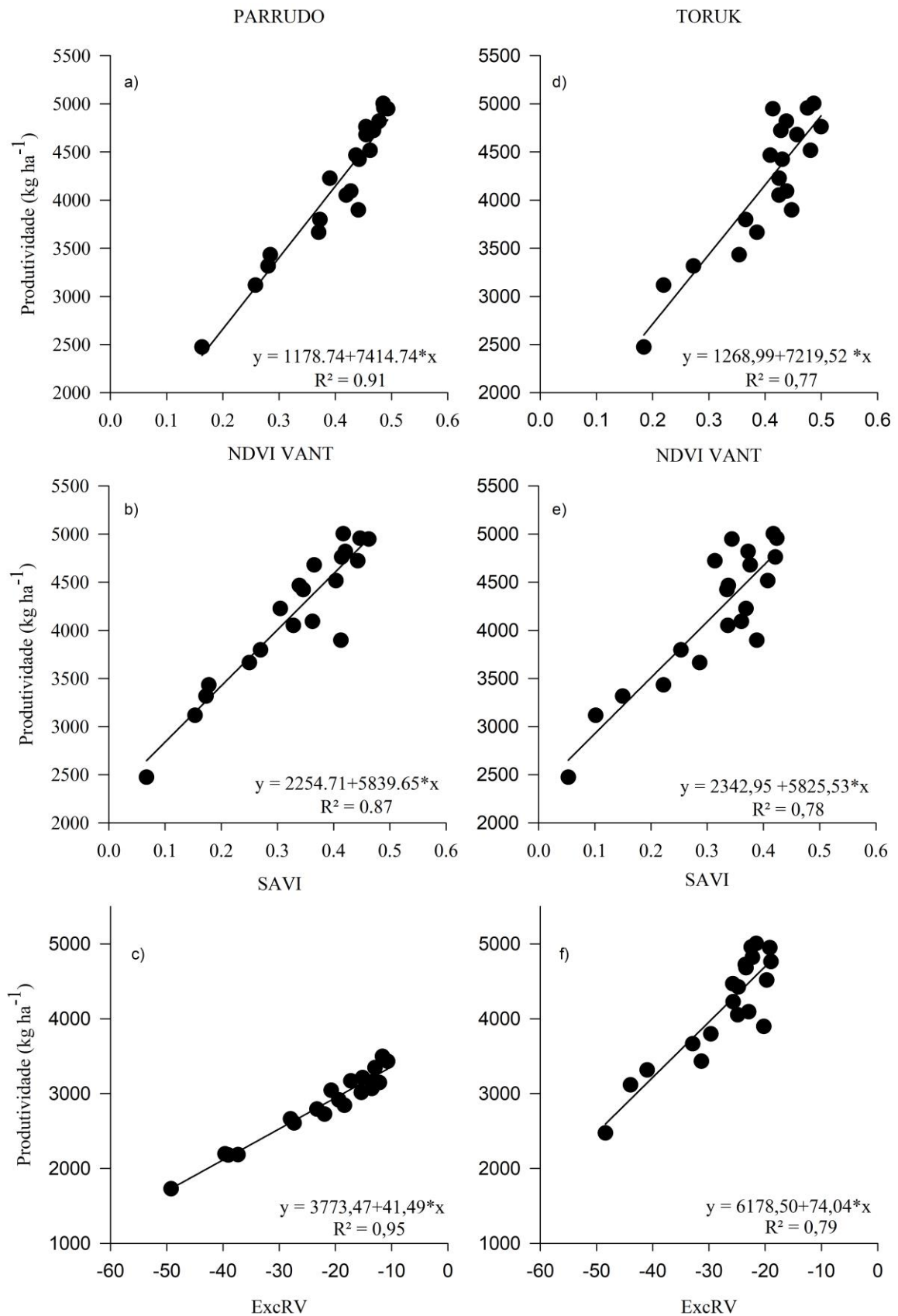


FIGURA 2. Análise de regressão entre produtividade de grãos e índices NDVI VANT (a) SAVI (b) e ExcRV (c), no estágio de florescimento, para a cultivar BRS Parrudo, e; índices NDVI VANT (d) SAVI (e) e ExcRV (f), para a cultivar

TBIO Toruk. Sendo que NDVI VANT foi obtido com a câmera Sequoia e os demais com câmera RGB.

Os coeficientes de determinação obtidos entre a produtividade de biomassa no florescimento e os índices não alcançaram valores tão altos quanto os obtidos pela produtividade, mas ainda continuam sendo bons, variando entre 0,46 e 0,64 (Figura 3). O índice IDDM foi superior aos demais, para ambas as cultivares. Este índice de vegetação leva em consideração os espectros de banda do infravermelho, “red edge” e verde, que representam as porções de clorofila e de biomassa das folhas, ou seja, quanto maiores os níveis destes componentes, maior será o índice, e conseqüentemente, o valor da correlação.

Os resultados apontam que os coeficientes de determinação foram superiores na cultivar TBIO Toruk para os índices IDDM e ExcRV. Já o índice IFV obteve maior R^2 na cultivar BRS Parrudo (Figura 2). Este índice de vegetação é o único, dentre os índices apresentados na Figura 3, que leva em consideração a banda espectral do azul, que possui menor comprimento de onda. Como já citado, as características dos componentes das folhas de cada cultivar interferem na maneira com que cada espectro é refletido pelas mesmas.

Gallego *et al.* (2019) verificaram que há diferença entre as reflectâncias de diferentes genótipos de trigo, porém ressaltam que é necessário se fazer um estudo minucioso e específico das características e espectros de reflectância para cada cultivar, a fim de que se consiga realizar a diferenciação destas no campo.

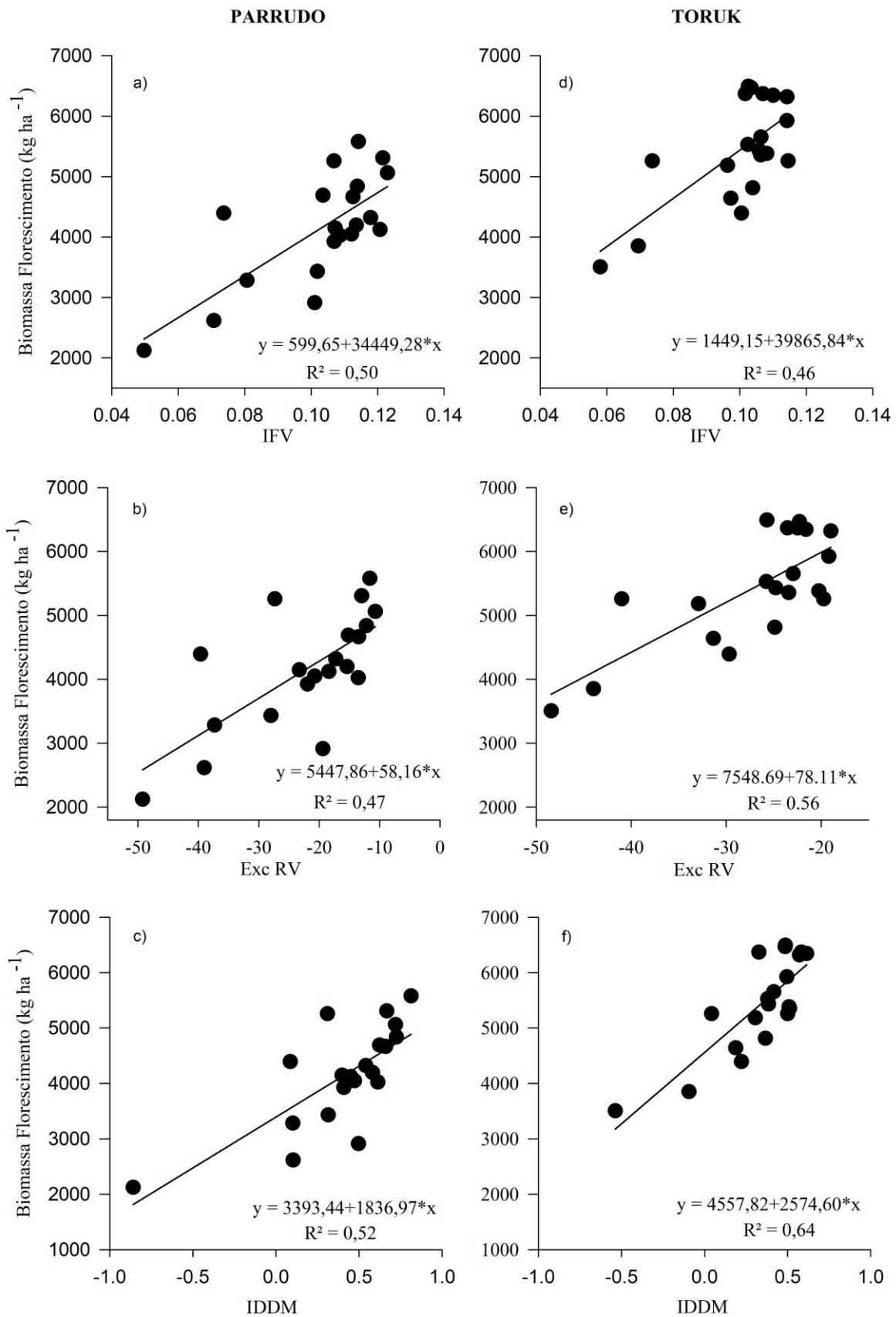


FIGURA 3. Análise de regressão entre a produtividade de biomassa no florescimento e os índices IFV (a) Excesso de RE e V (b) e IDDM (c), para a cultivar BRS Parrudo, e; IFV (d) Excesso de RE e V (d) e IDDM (f), para a cultivar TBIO

Toruk. O IDDM foi obtido com a câmera Sequoia e os demais com câmera RGB.

5.4 CONCLUSÕES

O uso de câmeras, tanto multiespectrais quanto RGB, a bordo de VANTs é uma alternativa para avaliações rápidas, não destrutivas e a qualquer momento em áreas de produção agrícola, trazendo para produtor rural e prestadores de serviços uma maior praticidade no acompanhamento do desenvolvimento de suas lavouras e auxiliando na tomada de decisão de diferentes manejos.

Com base nestes dados, é possível atestar que os índices de vegetação utilizados neste estudo são importantes fontes de predição das variáveis biomassa no florescimento e produtividade de grãos para as cultivares BRS Parrudo e TBIO Toruk. Destacam-se os índices NDVI obtido pela câmera Sequoia e os ExcRV e SAVI obtidos pela câmera RGB, para estimativa de produtividade de grãos. E, para a estimativa de produtividade de biomassa no florescimento destacam-se os índices IFV e ExcRV obtidos pela câmera RGB e IDDM, obtido com a câmera Sequoia.

As avaliações de produtividade de biomassa no estágio de sexta folha completamente expandida, obtidas com a câmera RGB apresentaram boas correlações somente para a cultivar BRS Parrudo, com destaque aos índices VARI e IRS.

5.5 REFERÊNCIAS

BALLESTEROS, R. et al. Combined use of agro-climatic and very high-resolution remote sensing information for crop monitoring. **International Journal Applied Earth Observation and Geoinformation**. Amsterdam, v. 72, p. 66–75, 2018.

BANNARI, A. et al. A review of vegetation indices. **Remote Sensing Reviews**. London v. 13, p. 95-120, 1995.

BERGAMASCHI, H. (Org) Clima da Estação Experimental da UFRGS e região de abrangência. UFRGS. Porto Alegre. 2003.

BUSCHMANN, C.; NAGEL, E. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. **International Journal of Remote Sensing**. Amsterdam, v. 14, p. 711–722, 1993.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artemed. 2003.

CAO, Q. et al. Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems. **Computers and Electronics in Agriculture**. Amsterdam, v. 112, p. 54–67, 2015.

CAO, Q. et al. Nondestructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. **Field Crops Research**. Amsterdam, v. 154, p. 133–144, 2013.

CARTER, G.A. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. **International Journal of Remote Sensing**. Amsterdam, v. 15, p. 697-703, 1994.

CHEN, Y.; ZHANG, Z.; TAO, F. Improving regional winter wheat yield estimation through assimilation of phenology and leaf area index from remote sensing data. **European Journal of Agronomy**. Amsterdam, v. 101, p. 163–173, 2018.

DUAN, T. et al. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. **Field Crops Research**. Amsterdam, v. 210, p. 71–80, 2017.

ELVANIDI, A. et al. Hyperspectral machine vision as a tool for water stress severity assessment in soilless tomato crop. **Biosystems engineering**. Amsterdam, v. 165, p. 25-35, 2018.

GALLEGO, J.A.F. et al. Low-cost assessment of grain yield in durum wheat using RGB images. **European Journal of Agronomy**. Amsterdam, v. 105, p. 146–156, 2019.

GITELSON, A.A.; KAUFMAN, Y.J.; MERZLYAK, M.N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environmental**. New York, v. 58, p. 289–298, 1996.

GITELSON, A.A. et al. Novel algorithm for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**. New York v. 80, p.76–87, 2002.

GITELSON, A.A. et al. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**. Santa Cruz, v. 32, p. 1-4, 2005.

GUAN, S. et al. Assessing correlation of high-resolution NDVI with fertilizer application level and yield of rice and wheat crops using small UAVs. **Remote Sensing**. Basel, v. 11, p. 112-131, 2019.

HAUN, J.R. Visual quantification of wheat development. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, n.1, p. 116-119, 1973.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 25, p. 295-309, 1988.

JASPER, J.; REUSCH, S.; LINK, A. Active sensing of the N status of wheat using optimized wave-length combination: Impact of seed rate, variety and growth stage. In: HENTEN, E.J.V. (Ed) **Precision agriculture**. Wageningen: Academic Publishers, 2009. p. 23–30.

JIN, X. et al. Estimates of plant density of wheat crops at emergence from very low altitude UAV imagery. **Remote Sensing of Environment**. New York, v. 198, p. 105–114, 2017.

KASAMPALIS, D.A. et al. Contribution of Remote Sensing on Crop Models: A Review. **Journal of imaging**. Basel, v. 4, p. 52, 2018.

KHANAL, S.; FULTON, J.; SHEARER, S. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**. Amsterdam, v. 139, p. 22-32, 2017.

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

LE MAIRE, G.; FRANCOIS, C.; DUFRENE, E. Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. **Remote Sensing of Environmental**. New York, v. 89, p. 1–28, 2004.

LEE, W.S.; EHSANI, R. Sensing systems for precision agriculture in Florida. **Computers and Electronics in Agriculture**. Amsterdam, v. 139, p. 22-32, 2017.

LIU, H.Q.; HUETE, A.R. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. Basel, v. 33, p. 457–465, 1995.

MAGNEY, T.S. et al. Proximal NDVI derived phenology improves in-season predictions of wheat quantity and quality **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam, v. 217, p. 46–60 2016.

MAO, W.; WANG, Y.; WANG, Y. Real-time detection of between-row weeds using machine vision. **American society of agricultural and biological engineers**. Las Vegas, 2003.

MOGILI, U.R.; DEEPAK, B.B.V.L. Review on Application of Drone Systems in precision Agriculture. **Procedia Computer Science**. Amsterdam, v. 133, p. 502–509, 2018.

PEREZ, A.J. et al. Color and shape analysis techniques for weed detection in cereal fields. **Computer and Electronics in Agriculture**. Amsterdam, v. 25, p. 197–212, 2000.

REUNIÃO da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale. Informações técnicas para trigo e triticale - safra 2019. Brasília: EMBRAPA, 240 p., 2018.

- ROUSE, J.W. et al. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. In: Symposium of ERTS, 3. 1974, Greenbelt, Maryland NASA, 1974, p. 309–317.
- SRIPADA, R.P. et al. Aerial color infrared photography for determining early in-season nitrogen requirements in corn. **Agronomy Journal**. Madison v. 98, p. 968–977, 2006.
- STRECK, E.V., et al. Solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS: EMATER/RS-ASCAR, 2018. 251 p.
- TUCKER, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environmental**. New York, v. 8, p. 127–150, 1979.
- WAL, T.V. et al. Fieldcopter: unmanned aerial systems for crop monitoring services. **Precision Agriculture** v. 13, p. 169–175, 2013.
- WOEBBECKE, D.M. et al. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. **American society of agricultural and biological engineers**. Las Vegas, v. 38, p. 259–269, 1995.
- XUE, J. e Su, B Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. **Journal of Sensors**. Pamplona, v. 2017, p. 1-17, 2017.
- ZHANGA, H.Y. et al. Remotely assessing photosynthetic nitrogen use efficiency with in situ hyperspectral remote sensing in winter wheat. **European Journal of Agronomy**. Amsterdam, v. 101, p. 90–100, 2018.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sensores de vegetação que a AP trouxe para o campo são essenciais para o sucesso e para o gerenciamento de uma fazenda, auxiliando os produtores nas tomadas de decisão. Estas ferramentas se mostraram eficientes na coleta de dados a fim de se avaliar a qualidade dos cultivos de soja e de trigo.

Os índices de vegetação, obtidos tanto por sensores manuais quanto por VANTs, foram importantes fontes de informação sobre as plantas e ajudaram no acompanhamento do crescimento e desenvolvimento das mesmas. Estes índices se mostraram bons estimadores de produtividade de biomassa no florescimento e produtividade de grãos na cultura do trigo.

Houve a saturação do índice NDVI ainda nos estádios vegetativos da soja (V9), enquanto em trigo, esta saturação ocorreu no florescimento.

De maneira geral, as avaliações com os sensores de vegetação realizadas durante os estádios fenológicos do florescimento foram as que apresentaram maiores relações com a produtividade de grãos, para as culturas do trigo e da soja.

A cultura do trigo respondeu ao incremento na adubação nitrogenada, aumentando a biomassa de parte aérea e a produtividade de grãos. Pode-se captar estes aumentos com os sensores utilizados.