

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

TALES CAMARGOS ABRANTES

**ANÁLISE DA DERIVA SIMULADA DE HERBICIDAS AUXÍNICOS EM SOJA  
ATRAVÉS DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO RGB OBTIDOS POR VANT**

Porto Alegre

2019

TALES CAMARGOS ABRANTES

**ANÁLISE DA DERIVA SIMULADA DE HERBICIDAS AUXÍNICOS EM SOJA  
ATRAVÉS DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO RGB OBTIDOS POR VANT**

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto para obtenção do  
Título de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Área de Concentração: Sensoriamento Remoto Aplicado.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Wilson Mendes Jr.

Porto Alegre

2019

TALES CAMARGOS ABRANTES

**ANÁLISE DA DERIVA SIMULADA DE HERBICIDAS AUXÍNICOS EM SOJA  
ATRAVÉS DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO RGB OBTIDOS POR VANT**

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Aldo Merotto Júnior – FAGRO/UFRGS

---

Prof. Dra. Denise Cybis Fontana – FAGRO/UFRGS

---

Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves – DEG/UFLA

---

Prof. Dr. Cláudio Wilson Mendes Júnior (Orientador) – PPGSR/UFRGS

Aprovado em 19 de fevereiro de 2019

*Aos tios Cida e Osmar,  
alicerces  
de quem sou.*

## AGRADECIMENTOS

*Ao meu orientador Prof. Dr. Cláudio Wilson Mendes Jr., pela orientação, confiança e tempos a mim demandados, e pela forte amizade que soubemos construir;*

*ao Prof. Dr. Christian Bredemeier e ao Prof. Dr. Aldo Merotto Jr., idealizadores do projeto que culminou nesta Dissertação de Mestrado, por acreditarem no esforço deste trabalho, pela parceria construída, apoio e recursos fornecidos, sem os quais este estudo não teria sido possível; e ao Grupo de pesquisadores e apoiadores do Departamento de Plantas de Lavoura, os quais também demandaram certo tempo e esforço na implementação do projeto e coleta de dados;*

*ao Laboratório de Modelagem Ricardo Norberto Ayup Zouain – LabModel;*

*ao Laboratório de Geoprocessamento e Análise Ambiental – Lagam; e*

*à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, por toda infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta Dissertação;*

*à CAPES, pela bolsa de estudos em nível de pós-graduação;*

*aos meus Tios Cida e Osmar, meu irmão Pablo e minhas primas Vii e Val, pelo incentivo, apoio, crença e amor incondicionais;*

*aos meus pais Marly e Ivanilza, pela vida;*

*especialmente aos SC10, meus irmãos;*

*aos demais amigos e familiares que contribuíram com energias positivas para que os objetivos vislumbrados fossem atingidos;*

*Sou super grato!*

*“Nossa espécie está  
descobrimdo agora os  
instrumentos para dar forma ao  
próprio destino. Cabe a nós  
decidir  
quem nos tornaremos.”*

*David Eagleman*

## RESUMO

Objetivou-se avaliar a fitotoxicidade e o efeito no rendimento de grãos da soja causados pela deriva de herbicidas auxínicos através da aplicação de índices de vegetação (IV) em imagens obtidas por um sensor RGB embarcado em Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT). Verificou-se ainda a relação do rendimento de grãos com o grau de fitotoxicidade produzido pelas diferentes doses dos herbicidas avaliados. Para isso, foram administrados tratamentos com Dicamba e duas formulações 2,4-D (sal de dimetilamina e sal de colina) simulando a ocorrência de deriva em lavoura de soja sensível. Os resultados indicaram que as doses recomendadas para cultivares de soja resistentes a Dicamba; 2,4-D sal de dimetilamina e 2,4-D sal de colina capazes de reduzir em 50% o rendimento de grãos foram de 73,81 ( $R^2 = 0,99$ ); 556,77 ( $R^2 = 0,87$ ) e 485,31 g e.a. ha<sup>-1</sup> ( $R^2 = 0,94$ ), respectivamente. Fitotoxicidade de 4% aos 8 dias após o tratamento (DAT) com Dicamba, nas doses de 1 e 5%, resultou em reduções de 12 e 13% no rendimento de grãos, respectivamente. Tratamentos com 2,4-D não produziram fitotoxicidade na dose de 1%, indicando um baixo acréscimo no rendimento de grãos. Tratamentos com Dicamba nas doses acima de 40% reduziram o rendimento da soja a zero. Em contraste, apenas a dose de 100% das formulações 2,4-D produziu resultado semelhante. Os índices MGRVI e MPRI apresentaram performances semelhantes às avaliações de fitotoxicidade realizadas visualmente para a estimativa do impacto causados pelos herbicidas no rendimento de grãos da soja. Cinco dos seis índices RGB (ExG, ExGR, MGRVI, MPRI e RGBVI) avaliados demonstraram alta relação com as perdas em rendimento de grãos produzidas pelas doses de deriva simulada do Dicamba e formulações 2,4-D. A aplicação de IVs em imagens obtidas pelo sensor RGB forneceu uma maneira simples e direta de detecção de sintomas de fitotoxicidade na cultura da soja, possibilitando ainda estimar o efeito no rendimento de grãos. A metodologia aplicada neste estudo pode ser considerada uma técnica simples e de baixo custo, que pode ser facilmente replicada, além de permitir repetidas e alta frequência de observações.

*Palavras-chave: VANT, Drone, Planta Daninha, Dicamba, Remote Sensing.*

## ABSTRACT

We evaluated the auxin herbicide drift effect on soybean injury and yield loss first by vegetation indices (VI) applied on images from an RGB sensor on-board an Unmanned Aerial Vehicle (UAV), second by visual injury degree analysis. Dicamba treatments and two forms (dimethylamine salt and choline salt) of 2,4-D were performed, simulating the occurrence of drift in susceptible-soybean crops. The results indicated that using the herbicides recommended doses for soybean resistant cultivars of Dicamba; 2,4-D dimethylamine salt and 2,4-D choline salt doses are capable of reducing by 50% yield were 73.81 ( $R^2 = 0.99$ ); 556.77 ( $R^2 = 0.87$ ) e 485.31 g e.a. ha<sup>-1</sup> ( $R^2 = 0.94$ ), respectively. Visual injury of 4% at 8 days after treatment (DAT) with Dicamba, doses of 1 and 5%, indicated 12 and 13% yield loss, respectively. Treatments with 2,4-D produced no injury at the dose of 1%, indicating a subtle increase in grain yield. Dicamba treatments at doses above 40% reduced soybean yield to zero. In contrast, only the 100% dose of 2,4-D formulations shown similar results. The MGRVI and MPRI indices showed similar performances to the phytotoxicity assessments (visual injury) for estimating the herbicides effects on soybean yield losses. Five RGB indices (ExG, ExGR, MGRVI, MPRI e RGBVI) evaluated were substantially correlated with yield losses produced by the simulated drift of Dicamba and 2,4-D formulations. The spectral ratio method by RGB indices, provided a simple yet straightforward way to detect soybean injury and was substantially correlated with yield loss from Dicamba and 2,4-D, which is relatively easy to use. This tool provides a low-cost and simple way to replication with repeatable observations and high frequency.

*Key-words: UAV, Drone, Weed, Dicamba, Remote Sensing.*



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Localização e caracterização da área do estudo.....	20
Figura 2. Níveis de aquisição de dados por Sensoriamento Remoto. ....	22
Figura 3. Reflectância espectral média característica da folha vegetal verde sadia. 26	
Figura 4. Fluxograma dos procedimentos metodológicos e hierarquia de processamento das imagens. ....	36
Figura 5. Rendimento de grãos da soja ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função de diferentes níveis percentuais de deriva do Dicamba ( $100\% = 560 \text{ g e.a. ha}^{-1}$ ); 2,4-D sal de dimetilamina ( $100\%=1005 \text{ g e.a. ha}^{-1}$ ) e 2,4-D sal de colina ( $100\% = 1005 \text{ g e.a. ha}^{-1}$ ). Parâmetros das equações na Tabela 2. ....	44
Figura 6. Variação no grau de fitotoxicidade (%) em função da dose (%) de deriva simulada dos respectivos herbicidas para as avaliações realizadas aos 8, 15 e 56 dias após o tratamento (DAT). ....	47
Figura 7. Relação entre o rendimento de grãos da soja e o grau de fitotoxicidade associada com o efeito da deriva dos respectivos herbicidas aos 8, 15 e 56 DAT. .	49
Figura 8. Perfil da variabilidade na resposta dos índices de vegetação (proporcional ao Controle) em relação à dose de deriva simulada dos respectivos herbicidas aos 8, 16 e 64 dias após o tratamento. <sup>1</sup> Valores negativos indicam redução e valores positivos acréscimo. ....	50
Figura 9. Relação entre o grau de fitotoxicidade e a resposta dos índices de vegetação causada por exposição aos respectivos herbicidas, ao longo dos DAT avaliados. ....	53
Figura 10. Relação entre rendimento de grãos da soja e a resposta dos índices de vegetação causada por exposição aos respectivos herbicidas, ao longo dos DAT avaliados. <sup>1</sup> Valores relativos ao Controle.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Sumário dos índices de vegetação derivados do sensor RGB – espectro do visível. ....	41
Tabela 2. Parâmetros do ajuste ao modelo não-linear sigmoidal do tipo logístico <sup>1</sup> utilizada para determinação do nível de deriva (%) dos respectivos herbicidas, necessário para reduzir em 50% (DL <sub>50</sub> ) o rendimento de grãos da soja. ....	45
Tabela 3. Parâmetros derivados pelo modelo linear <sup>1</sup> para estimativa do grau de fitotoxicidade associado com as doses de deriva simulada dos respectivos herbicidas aos 8, 16 e 64 dias após o tratamento (DAT) a partir da aplicação dos respectivos Índices de Vegetação.....	54
Tabela 4. Parâmetros derivados pelo modelo linear <sup>1</sup> para estimativa do rendimento de grãos da soja a partir dos respectivos Índices de Vegetação associados com o efeito da deriva dos respectivos herbicidas aos 8, 16 e 64 dias após o tratamento (DAT). Rendimento (relativo ao Controle) médio de 4.580,73kg • ha <sup>-1</sup> .....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2,4-D - *2,4-Dichlorophenoxyacetic acid*

ALS - Acetolactato Sintase

AP – Agricultura de Precisão

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

CRI1 - *Carotenoid Reflectance Index 1*

EEA-UFRGS - Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

EVI - *Enhanced Vegetation Index*

ExG – *Excess Green*

ExGR – *Excess Green minus Excess Red*

GNSS - *Global Navigation Satellite System*

GUIVE - Grupo Universitário de Investigação em Herbologia

IFOV - *Instantaneous Field of View*

IVM - Infravermelho Médio

IVP – Infravermelho Próximo

MGRVI - *Modified Green Red Vegetation Index*

MPRI - *Modified Photochemical Reflectance Index*

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

PDI - Processamento de Imagens Digitais

PRI - *Photochemical Reflectance Index*

RGB - Red/Green/Blue

RGBVI - *Red Green Blue Vegetation Index*

RPA - *Remotely Piloted Aircraft*

SAVI - Índice de Vegetação Ajustado ao Solo

SfM - *Structure from Motion*

SR – Sensoriamento Remoto

SWIR - *Short-Wave Infrared*

UAS - *Unmanned Aircraft Systems*

UAV - *Unmanned Aircraft/Airborne Vehicle*

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

URA – Umidade Relativa do Ar

VANT - Veículo Aéreo Não-Tripulado

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
1.1. Objetivos.....	18
1.1.1. <i>Objetivo geral</i> .....	18
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	18
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO .....	19
3. REFERENCIAL TEÓRICO .....	21
3.1. Aquisição de dados por Sensoriamento Remoto .....	21
3.1.1. <i>Veículo Aéreo Não-Tripulado – VANT</i> .....	23
3.1.2. <i>Comportamento espectral da vegetação</i> .....	24
3.1.3. <i>Índices de Vegetação</i> .....	27
3.2. Herbicidas auxínicos .....	29
3.2.1. <i>Sintomatologia e mecanismos de ação</i> .....	30
3.2.2. <i>Deriva de herbicidas auxínicos</i> .....	32
3.3. Sensoriamento Remoto aplicado ao estudo do efeito de herbicidas em soja... 34	
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1. Experimento de campo.....	36
4.2. Aquisição de dados .....	38
4.3. Processamento de Imagens Digitais (PDI).....	39
4.4. Análises estatísticas .....	42
5. RESULTADOS .....	43
5.1. Dose-resposta dos herbicidas .....	43
5.2. Fitotoxicidade .....	46
5.3. Índices de Vegetação .....	49
6. DISCUSSÕES .....	58
6.1. Dose-resposta aos herbicidas .....	58
6.2. Fitotoxicidade e relação com o rendimento de grãos.....	58
6.3. Índices de Vegetação, fitotoxicidade e rendimento de grãos.....	61
7. CONCLUSÕES .....	67
Agradecimentos.....	68
Referências .....	69

## 1. INTRODUÇÃO

A soja é uma das culturas anuais de maior importância mundial. No Brasil, a área plantada de soja na safra 2016/17 cresceu 2%, saltando de 33,3 milhões de hectares na safra 2015/16 para 33,9 milhões, e a produção avançou de 95,4 milhões para 114,1 milhões de toneladas, respectivamente (CONAB, 2017). Este crescimento, entre outras causas, pode ser atribuído principalmente ao favorecimento das condições climáticas em praticamente todas as regiões produtoras do país (CONAB, 2017). Novamente influenciado pelas variáveis edafoclimáticas, de acordo com os dados do último levantamento da CONAB (2018) para a safra 2017/18 foi registrado um aumento de 3,7% em área plantada e de 4,6% na produção da soja em relação à safra anterior. Assim, o Brasil ainda manteve o posto de segundo maior produtor mundial de soja.

Para além do favorecimento das condições climáticas, o país tem avançado anualmente no desenvolvimento de novas cultivares e empregado técnicas que contribuem significativamente para a otimização da produção, bem como a liberação para o plantio de cultivares transgênicas resistentes a herbicidas, a utilização de ferramentas do Sensoriamento Remoto (SR) e da Agricultura de Precisão (AP).

O cultivo de soja transgênica resistente a herbicidas é realizado em diversos países do mundo. No Brasil, por exemplo, a adoção da soja transgênica resistente ao herbicida glifosato (Roundup Ready) aumentou rapidamente ao longo dos anos, passando de 4,7 para 31 milhões de hectares plantados da safra 2003/04 para a safra 2015/16, correspondendo a mais de 94% da área cultivada com essa cultura (ISAAA, 2015, CÉLERES, 2016). O rápido aumento do cultivo de culturas transgênicas resistente ao glifosato foi devido, principalmente, ao fato de que esta tecnologia simplifica o processo de controle de plantas daninhas e apresenta baixo custo em relação às demais opções (ZHOU *et al.*, 2016). Também se justifica como forma de racionalizar o uso de pesticidas e da possibilidade de obtenção de plantas menos suscetíveis a condições de estresses (MONQUERO, 2005).

As plantas transgênicas são uma alternativa importante para a agricultura, uma vez que essa tecnologia pode promover o aumento da produção e a diminuição do uso de produtos fitossanitários (ISAAA, 2015). Contudo, a utilização de soja

transgênica resistente ao glifosato resultou na evolução de plantas daninhas resistentes a este herbicida no Brasil e em vários outros locais do mundo (SHANER; LINDENMEYER; OSTLIE, 2012; ZHOU *et al.*, 2016). O primeiro caso de resistência ao glifosato foi relatado na Austrália para o *Lolium multiflorum* em 1996 e, atualmente são 35 espécies de plantas daninhas resistentes a este herbicida, presentes principalmente na cultura da soja, milho e trigo (HEAP, 2018).

Atualmente, a utilização de herbicidas alternativos ao glifosato visando a obtenção de rotação de mecanismos de ação é a principal forma de prevenção e controle da resistência a herbicidas em culturas produtoras de grãos como a soja e milho (DAN *et al.*, 2010). Outra alternativa para viabilizar a inclusão de maior número de mecanismos de ação é o desenvolvimento de cultivares transgênicas resistentes à classe dos herbicidas auxínicos ou mimetizadores de auxina. Como exemplo, se pode citar o desenvolvimento dos eventos Enlist resistente a 2,4-D (WRIGHT *et al.*, 2010; ZHOU *et al.*, 2016) e Xtend resistente a Dicamba (BEHRENS *et al.*, 2007).

A introdução da soja resistente a Dicamba e 2,4-D aumentará rapidamente o uso destes herbicidas no manejo e controle de plantas daninhas nos próximos anos. Apesar da eficiência comprovada, a ocorrência de deriva de Dicamba e 2,4-D é apontada como um dos problemas relacionados à utilização dessa tecnologia (DALLA; ADALIN; MORAES, 2018).

Em geral, a deriva ocorre como resultado do carreamento dos herbicidas através do vento, que não atingem o local desejado, em função da volatilidade ou deriva de vapor do herbicida (HENRY *et al.*, 2004). O fenômeno pode ser influenciado principalmente por fatores abióticos como temperatura e umidade relativa do ar (URA) (EGAN; BARLOW; MORTENSEN, 2014; MUELLER; WRIGHT; REMUND, 2013). Por sua vez, a resposta da soja ao efeito dos herbicidas pode ser função do tipo de ingrediente ativo e demais constituintes (*e.g.* sal) presentes nas formulações dos mesmos. Ainda, a cultivar e o estágio de desenvolvimento das plantas também são fatores-chave (DALLA; ADALIN; MORAES, 2018; EGAN; BARLOW; MORTENSEN, 2014).

Existem diversas formulações de herbicidas auxínicos no mercado mundial, os quais regularmente têm sido relacionados a ocorrência de deriva. Visando contornar este problema, como parte dos seus programas tecnológicos para desenvolvimento

de cultivares resistentes a herbicidas, a Dow AgroSciences e a Monsanto/BASF estão introduzindo novas formulações com a premissa de que exista menor nível de volatilidade (Dow AgroSciences 2011).

Países produtores de soja como o Brasil já estão aderindo a essas novas tecnologias. Como exemplo, recentemente, foi autorizado o registrado para comercialização do 2,4-D Enlist™ *Colex-D*® junto ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2019). De acordo com a empresa que desenvolveu o produto, o *Colex-D*® é um sal quaternário de colina para o 2,4-D (Dow AgroSciences, 2011) que apresenta maior estabilidade e menor susceptibilidade à volatilização do que outras formulações de 2,4-D (PETERSON *et al.*, 2016; SOSNOSKIE *et al.*, 2015). Com isso, existe, portanto, a necessidade de avaliação através de métodos expeditos do efeito da deriva das novas formulações desses herbicidas em cultivo de soja susceptível, para que se possa inferir sobre as consequências da sintomatologia existente.

A principal característica da sintomatologia dos herbicidas auxínicos é o alto impacto visual causado por estes herbicidas em plantas sensíveis e em cultivos não-alvo, que pode variar entre clorose dos brotos terminais, “encarquilhamento” ou enrugamento das folhas do dossel e epinastia das folhas ou caule (CHRISTOFFOLETI *et al.*, 2015; DALLA; ADALIN; MORAES, 2018; SCHWARTZ-LAZARO *et al.*, 2017). Há uma maior preocupação sobre a ocorrência da deriva de Dicamba para cultivos não-alvo porque este herbicida é extremamente ativo em culturas sensíveis, mesmo em baixas doses (HUANG *et al.*, 2016). Em altas concentrações o Dicamba pode provocar rachaduras no caule, morte terminal e até morte da planta (GRIFFIN *et al.*, 2013; SOLOMON; BRADLEY, 2014). Estima-se que, o risco de danos aos cultivos e a potencial perda em produtividade da lavoura será talvez maior para aqueles produtores que não estão cientes do uso da tecnologia por parte dos produtores circunvizinhos ou que optarem por não aderir ao uso de variedades resistentes ao herbicida (EGAN; BARLOW; MORTENSEN, 2014). Assim sendo, a detecção precoce dos sintomas de injúria nas culturas sensíveis como a soja se faz de fundamental importância no manejo dessas lavouras (HUANG *et al.*, 2016).

Ao se diagnosticar sintomas de injúria provocados por deriva de Dicamba e 2,4-D é quase impossível se estimar a dose recebida pelas plantas de soja lesionadas,



especialmente se o evento for resultado de volatilização e a fonte desconhecida. Nesse sentido, a relação direta entre a dose de deriva do herbicida e o rendimento de grãos da soja é, portanto, de valor limitado para os profissionais que avaliam a ocorrência de deriva a nível de campo. Apesar disso, a quantificação do grau de fitotoxicidade realizada visualmente no campo e sua relação com o rendimento de grãos da soja ainda é uma prática bastante usual entre os pesquisadores (KNISS, 2018). O problema inerente a essa prática reside no fato de que, essas metodologias podem ser subjetivas, conseqüentemente, conduzindo ao mal julgamento sobre os reais efeitos da deriva de herbicidas auxínicos no rendimento de grãos em cultivos de soja sensível. Pensando-se nisso, a combinação de técnicas e ferramentas do Sensoriamento Remoto (SR) apresentam-se como alternativas promissoras, como o uso de sensores portáteis ou embarcados em Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANT).

A utilização de sensores embarcados em VANT para o monitoramento de culturas produtoras de grãos como soja tem crescido ao longo dos últimos anos (HUNT; DAUGHTRY, 2018). Além do favorecimento à minimização de custos, se comparado com os métodos tradicionais de obtenção de dados providos por SR (*e.g.* satélites e aeronaves tripuladas), a utilização de VANT apresenta ainda as seguintes vantagens potenciais: amostragem a baixas altitudes, possibilitando aquisição de dados com maior resolução espacial; imageamento sob demanda e possibilidade de se usar sensores com as mais diversas configurações, como aqueles que possuem apenas bandas do RGB (espectro visível) (HUNT; DAUGHTRY, 2018; JANNOURA *et al.*, 2015; ZHANG; WALTERS; KOVACS, 2014).

A aplicação de dados hiper e multiespectrais já demonstrou alta eficácia na detecção de sintomas de fitotoxicidade e predição de perdas em cultivos de soja causada por herbicidas (HUANG *et al.*, 2016; YAO *et al.*, 2012; ZHAO *et al.*, 2015). Poderia um sensor RGB, possuindo apenas bandas do Azul, Verde e Vermelho, prover informação suficiente que permita a identificação e estimativa dos danos provocados por deriva de Dicamba e 2,4-D? Existe a possibilidade de se estabelecer relações de dose-resposta em cultivo de soja para a estimativa do grau de fitotoxicidade causados por estes herbicidas através da aplicação de índices de vegetação (IV) derivados de imagens de um sensor RGB? O conteúdo da informação

provida por índices de vegetação RGB é satisfatório para a previsão do impacto no rendimento de grãos de soja acometida por deriva de Dicamba e 2,4-D? Ainda, é possível discriminar se um cultivo de soja sensível foi atingido por deriva de Dicamba ou 2,4-D?

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. *Objetivo geral*

O objetivo geral deste estudo foi avaliar o grau de fitotoxicidade e o efeito no rendimento de grãos da soja causados pela deriva de herbicidas auxínicos através da aplicação de índices de vegetação em imagens obtidas por um sensor RGB (*Red – Vermelho/ Blue – Azul/ Green – Verde*) de baixo custo embarcado em VANT.

### 1.1.2. *Objetivos específicos*

Para se alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram listados:

- i) estimar as doses de Dicamba e formulações 2,4-D sal de dimetilamina e sal colina que impactam no rendimento de grãos de soja susceptível a estes herbicidas, mensurável sob condições de deriva simulada;
- ii) quantificar a relação entre sintomas de fitotoxicidade e redução no rendimento de grãos da soja; e
- iii) avaliar o potencial de uso de índices de vegetação aplicados a imagens adquiridas por sensor RGB de baixo custo embarcado em VANT para se estimar o grau de fitotoxicidade e o efeito no rendimento de grãos da soja causado por deriva de Dicamba e formulações 2,4-D.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO

O estudo foi conduzido na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA–UFRGS), localizada entre os km 38,0 e 41,3 da rodovia BR–290, em ambas as margens, com sede no município de Eldorado do Sul, RS, Brasil. A EEA–UFRGS está situada na região climática da Depressão Central do Rio Grande do Sul, em uma altitude média de 46 m ao nível do mar, entre as latitudes 30° 04' 30" e 30° 07' 30" Sul e as longitudes 51° 39' 18" e 51° 42' 18" Oeste – Datum SIRGAS 2000 (Figura 1). A área (campo experimental) utilizada vem sendo manejada em sistema de plantio direto há aproximadamente 20 anos, com sistema de rotação de culturas com milho e soja na estação estival (verão – de dezembro a março) e aveia, trigo ou azevém na estação hiberna (inverno – de junho a setembro).

O clima da região é subtropical de verão úmido quente - *Cfa* na classificação de Köppen (IPAGRO, 1979). A precipitação pluvial média anual é de 1.440 mm, com temperaturas médias mensais variando entre 14 e 25° C nos meses mais frios (junho e julho) e quentes (janeiro e fevereiro), respectivamente (BERGAMASCHI *et al.*, 2003).

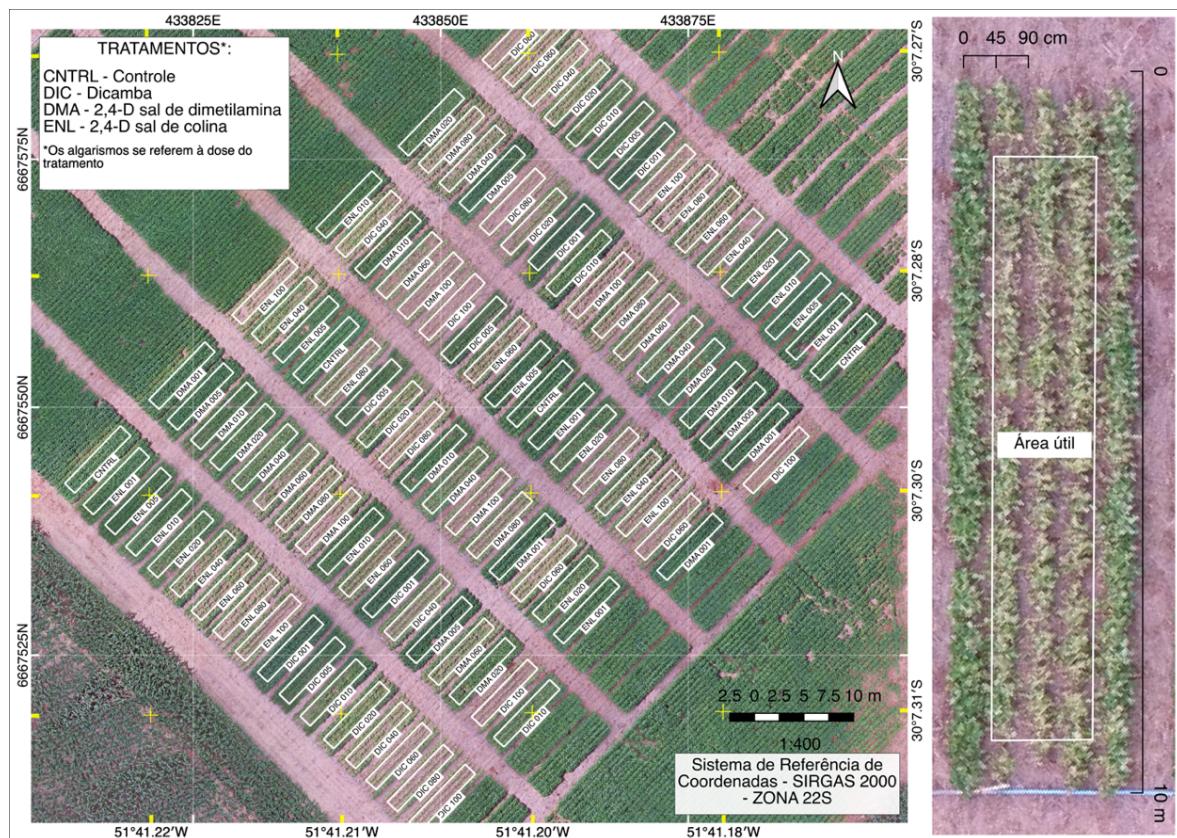


Figura 1. Localização e caracterização da área do estudo.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico-metodológico deste trabalho foi estruturado em três subcapítulos, com a finalidade de facilitar sua compreensão. O primeiro abrange conceitos, o uso e aplicações de sistemas de aquisição de dados por SR, como o VANT, e traz algumas abordagens sobre o comportamento espectral da vegetação e aplicações de IVs na cultura da soja. O segundo subcapítulo conceitua os herbicidas auxínicos, sua sintomatologia e mecanismo de ação, e cita estudos sobre deposição e deriva destes herbicidas associados ao cultivo da soja. Por fim, o terceiro subcapítulo aborda a aplicação de dados providos por SR no estudo do efeito de herbicidas em cultivo de soja.

#### 3.1. Aquisição de dados por Sensoriamento Remoto

Os níveis de aquisição de dados por SR estão diretamente relacionados ao veículo, plataforma ou sistema de suporte usado para a operação de um sistema sensor (NOVO, 2010). Desta forma, o instrumento de SR coleta informações sobre um objeto ou fenômeno (alvo) dentro do campo de visada instantâneo (IFOV) do sistema sensor, sem estar em contato físico direto com o mesmo (JENSEN, 2009). O instrumento pode estar localizado a apenas poucos centímetros acima deste alvo (níveis laboratorial, terrestre e/ou de campo) e/ou a bordo de uma aeronave tripulada ou não (nível suborbital) ou de um satélite (nível orbital) (Figura 2).

Satélites são as fontes mais tradicionais de aquisição de dados por SR. Contudo, existem algumas limitações de uso das imagens adquiridas a partir dessas plataformas, como o alto custo de se colocar essas plataformas em órbita e os problemas inerentes à atmosfera terrestre. No caso dos sensores ópticos, estes problemas estão relacionados aos processos de absorção e espalhamento da radiação eletromagnética emitida pelo Sol e aquela que é refletida pelos alvos da superfície terrestre, devido a presença de constituintes atmosféricos, tais como nuvens, aerossóis, gases e partículas em suspensão. Já com relação as “plataformas de detecção de base terrestre” (e.g. tripés, torres e guindastes), estas dificilmente são

transportadas de um local para outro, não permitem a geração de mapas de superfície em “tempo real” e impossibilitam a medição de parâmetros da planta de várias parcelas por vez (SANKARAN *et al.*, 2015). Atualmente, para contornar essas limitações tem se investido no uso de sensores terrestres (portáteis ou acoplados em equipamentos, como implementos agrícolas) ou sensores multiespectrais, além de câmeras digitais modificados ou de cor verdadeira (RGB) embarcados em um VANT.

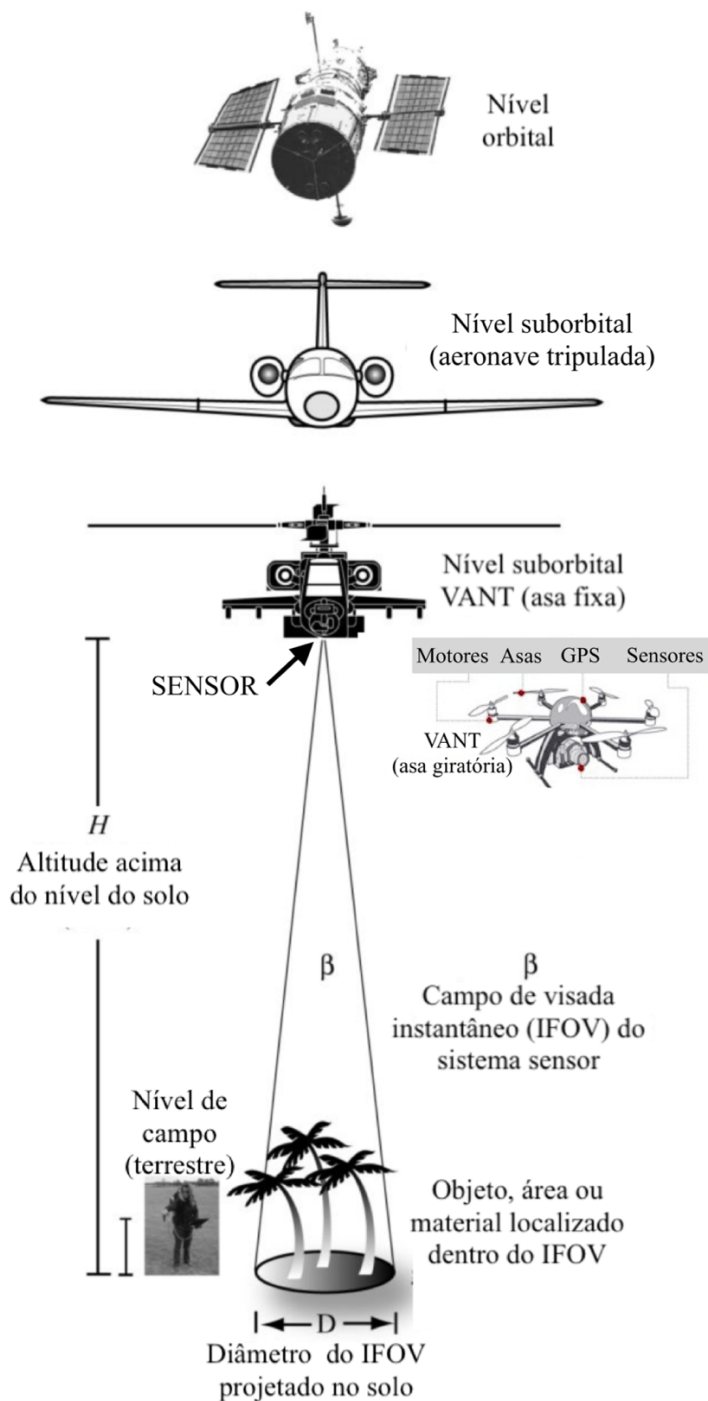


Figura 2. Níveis de aquisição de dados por Sensoriamento Remoto.

Fonte: adaptado de Jensen (2009).

### 3.1.1. Veículo Aéreo Não-Tripulado – VANT

Veículo Aéreo Não-Tripulado – VANT, popularmente chamado de drone (TANG; SHAO, 2015), é uma denominação dada para aeronaves sem piloto a bordo. Na literatura internacional podem ser encontradas algumas variações do termo, que dependem do seu uso e aplicações, como *Unmanned Aircraft/Airborne/Aerial Vehicle* – UAV (BENDIG *et al.*, 2015; HARDIN; JENSEN, 2011), *Unmanned Aircraft Systems* – UAS (HAGHIGHATTALAB *et al.*, 2016) e *Remotely Piloted Aircraft* – RPA (WATTS; AMBROSIA; HINKLEY, 2012). No SR, um VANT se refere ao sistema que compreende, além da aeronave, uma estação de pilotagem remota, os enlaces de comando e controle (*datalink*), sensores embarcados (WATTS; AMBROSIA; HINKLEY, 2012), e quaisquer outros componentes necessários com características para aquisição de dados espectrais.

Sistemas de SR que utilizam VANTs como plataformas se tornaram ferramentas importantes no preenchimento de lacunas para coleta de dados, complementando as capacidades de aeronaves tripuladas, bem como sistemas de detecção por satélite. Nas últimas décadas, houve uma larga evolução de formas, tamanhos, configurações e funcionalidades nos VANTs (TANG; SHAO, 2015), impulsionados principalmente por usos militares, aplicações civis de reconhecimento de terra e para fins de coleta de dados científicos, que têm se tornado cada vez mais úteis (WATTS; AMBROSIA; HINKLEY, 2012).

Inicialmente, essas aeronaves foram disponibilizadas para medições e tomadas de imagens gerais de áreas de produção agrícola e florestal. Recentemente, o avanço na qualidade de câmeras e sensores tem indicado sua utilização no diagnóstico de estresses em culturas agrícolas (BAOFENG *et al.*, 2016), e também no controle de plantas daninhas (BRIGHT *et al.*, 2016; LÓPEZ-GRANADOS *et al.*, 2016), expandindo ainda mais o leque de aplicações na AP.

Dentre algumas das características promissoras dos VANTs são destaque: a longa duração do voo, a melhoria da segurança da missão, a repetibilidade do voo devido à melhoria dos pilotos automáticos e a redução dos custos operacionais quando comparados às aeronaves tripuladas (WATTS; AMBROSIA; HINKLEY, 2012).

As vantagens potenciais da plataforma, no entanto, são função de diversos fatores, como aeronaves, tipos de sensores, objetivos da missão, além de todos os trâmites legais de regulamentação operacional da plataforma específica.

Em comparação com outras plataformas de aeronaves tripuladas com o mesmo sensor embarcado empregadas em AP, pode se listar como principais vantagens na utilização de VANTs: i) amostragem a baixas altitudes; ii) possibilidade do uso de sensores de calibração da luz incidente e iii) criação de modelos de altura de dossel a partir de nuvem de pontos baseado em estrutura-de-movimento (do inglês *Structure from Motion* – SfM) (HUNT; DAUGHTRY, 2018). Além disso, um VANT proporciona outras vantagens associadas à aquisição de dados por SR há muito demandadas pelos agricultores: maior resolução espacial, imageamento sob demanda, flexibilidade na frequência de revisita, e disponibilização de informações quase que em tempo real (referido no inglês como “*on the go*”) (JANNOURA *et al.*, 2015; TIAN *et al.*, 2017; ZHANG; WALTERS; KOVACS, 2014).

### 3.1.2. Comportamento espectral da vegetação

Desde a década de 1960 o SR tem se tornado uma ferramenta importante no estudo da vegetação por meio de fotografias aéreas, com destaque principalmente para a agricultura (GROFF *et al.*, 2013) e estudos florestais. Atualmente, também são utilizados sensores terrestres que permitem estabelecer relações entre atributos do solo (KUIAWSKI *et al.*, 2017), da cultura, e vários parâmetros agrônômicos (GROFF *et al.*, 2013; MILLER *et al.*, 2018). Para compreender como essas relações ocorrem é indispensável o entendimento de como a vegetação se comporta espectralmente, ou seja, qual a resposta espectral da vegetação dada pelos sensores ao interagir com a radiação eletromagnética incidente.

O comportamento espectral da vegetação é influenciado pelo comportamento espectral das folhas, ramificações, de uma planta isoladamente ou de um conjunto de plantas (PONZONI; DISPERATI, 1995), sombras, além dos objetos abaixo do dossel (componentes de fundo), como o solo e água, por exemplo. Contudo, a folha se configura como o objeto mais importante, pois sua resposta espectral numa dada



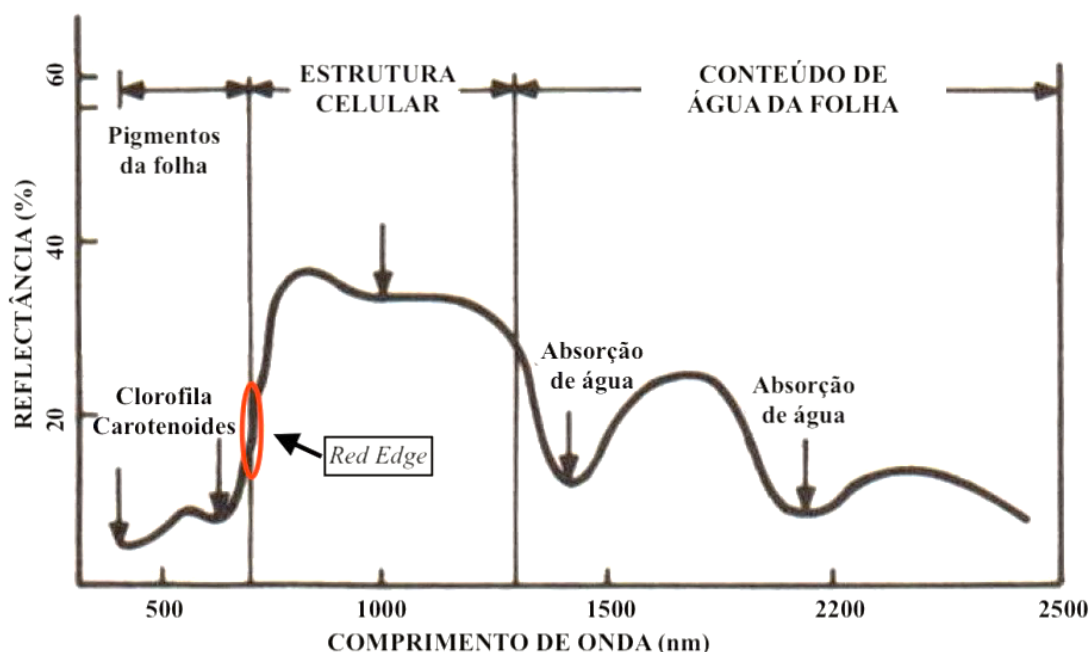
circunstância representa uma “boa aproximação” da assinatura espectral de folhas verdes (NOVO, 2010); é nela que se processam todas as reações fotoquímicas da planta, além de outras reações vitais, como a respiração e transpiração (MOREIRA, 2004).

As características espectrais da vegetação podem ser relacionadas ao comprimento de onda do fluxo de radiação eletromagnética incidente, e sua resposta espectral captada pelos sensores é função do fluxo de energia radiante refletida (reflectância), absorvida (absortância) e transmitida (transmitância) (JENSEN, 2009; NOVO, 2010). As técnicas de fluorescência, Visível, Infravermelho Próximo (IVP), hiper/multiespectrais e espectroscópicas térmicas são baseadas nesses princípios, embora cada uma tenha suas características únicas (SANKARAN *et al.*, 2015).

A diferente reflectância entre superfícies é a base de tecnologias de imagens utilizadas no manejo de culturas agrícolas. A reflectância é definida como a razão entre o fluxo de radiação refletida e a radiação incidente (JENSEN, 2009; NOVO, 2010). É uma grandeza física utilizada no SR como forma de identificar a curva de acúmulo de biomassa das culturas ao longo do ciclo, sem que haja contato físico com a mesma (MOLIN, 2001).

O princípio de funcionamento do sensor é baseado nas bandas de absorção da radiação pelas plantas, relacionadas à presença de pigmentos, como clorofila e carotenoides, suas características estruturais e conteúdo de água, ditos como fatores dominantes, controladores da reflectância foliar (JENSEN, 2009) (Figura 3). Na região espectral do Visível (~ 480 – 680 nm) a reflectância não ultrapassa 10% da radiação incidente, caracterizando-se pela absorção acentuada produzida pelos pigmentos presentes nas folhas (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012). O comprimento de onda aproximadamente entre 700 e 1300 nm representa o IVP, onde ocorre alta reflectância pela vegetação, chegando a até 50% da radiação incidente. Esta reflectância sofre influência da estrutura celular interna da folha, tamanho e formato da célula e ocorrência de espaços intercelulares (AMARAL; MOLIN, 2011; CAMPBELL; WYNNE, 2011; SHANAHAN *et al.*, 2008; SLATON; HUNT; SMITH, 2001). Essa região do espectro é marcada por descontinuidades, onde ocorrem múltiplas reflexões e refrações, indicando a potencialidade de derivação de índices de reflectância para a determinação da sintomatologia de herbicidas, por exemplo.

As faixas do espectro eletromagnético do Visível e do IVP foram definidas como indicadores de deficiências nutricionais e estresses nas plantas, por apresentarem relação com a condição do dossel (CARTER; KNAPP, 2001). A correlação existente entre a reflectância na faixa de 680 nm e a concentração de clorofila nas folhas, assim como entre a reflectância na região do IVP e a quantidade de biomassa presente no dossel, é determinante na estimativa do estado nutricional de uma planta, o qual se relaciona com a concentração de clorofila e a produção de biomassa de uma comunidade vegetal (BAKER, 2008; SHANAHAN *et al.*, 2008; SOLARI *et al.*, 2008).



**Figura 3.** Reflectância espectral média característica da folha vegetal verde sadia.

Outras porções do espectro da radiação eletromagnética, como Infravermelho Médio (IVM) ou Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR, do inglês *Short-Wave Infrared*) e micro-ondas, têm sido relacionadas a problemas agrícolas (HATFIELD *et al.*, 2008). Há uma forte relação entre a reflectância do IVM (~ 1300 – 2500 nm) e a quantidade de água presente nas folhas de um dossel. À medida que o conteúdo de água diminui, a reflectância no IVP também diminui, e em contrapartida a reflectância no IVM se eleva consideravelmente. Essa relação é baseada nas zonas de absorção de água

líquida na atmosfera (Figura 3) localizadas entre o IVP e o IVM: 970; 1190; 1450; 1940 e 2700 nm (JENSEN, 2009).

A identificação das zonas de absorção da radiação pela planta e o entendimento do comportamento espectral da vegetação por meio da curva média da sua assinatura espectral constituem a base para a derivação de IVs em SR. A derivação de IVs é uma técnica de aritmética de bandas de fácil replicação, além de ser uma forma de reduzir a dimensão dos dados para análise, com ampla aplicabilidade em AP. É um processo bastante rápido, que permite o ajuste e suavização de imagens muito ruidosas, ou ainda para se obter realces de toda a área de uma imagem, bem como de alvos específicos de interesse, como cultivos de soja, por exemplo. O uso de IVs em SR ainda apresenta algumas vantagens, como a minimização dos efeitos de inclinação do sensor em relação à fonte de radiação, iluminação (sombreamento) e topografia do terreno (MENESES *et al.*, 2012).

### 3.1.3. Índices de Vegetação

Os sensores baseados em SR orbital são dispositivos amplamente utilizados para se avaliar as condições e estimar parâmetros biofísicos da vegetação, incluindo o estado fisiológico de culturas agrícolas, como as de grãos, por exemplo. No entanto, não está claro como esses sensores funcionam sob radiação solar variável e cobertura de nuvem, devido à sua complexidade, e conseqüente, carência de pesquisas sobre sua variabilidade temporal (BENEDUZZI *et al.*, 2017). Assim, é de suma importância que se efetue correções sob as condições da radiação ambiente usando alvos de referência (*e.g.* *Spectralon® Targets*, Labsphere Inc., National Institute of Standards and Technology, NIST) para compensar a variação desta entre dias (SANKARAN *et al.*, 2015) ou mesmo dentro de um mesmo dia, entre intervalos de tempo de aquisição de dados ou sob alterações na cobertura de nuvens. Essas variações da radiação também podem ser parcialmente compensadas usando índices físicos (medidas radiométricas adimensionais que determinam características físicas presentes nos alvos), como IVs, ou através de sensores de calibração da radiação incidente (ZHANG; KOVACS, 2012).

A compreensão da reflectância da folha conduziu à derivação de vários IVs para quantização de parâmetros agrônômicos, como área foliar, cobertura vegetal, biomassa, tipo de cultivo, estado nutricional e rendimento (HATFIELD *et al.*, 2008). Atualmente, os índices NDVI, EVI (*Enhanced Vegetation Index*; Índice de Vegetação Realçado em português) e SR (*Simple Ratio*; RS – Razão Simples em português) são os IVs mais comumente utilizados na avaliação de parâmetros fisiológicos (CEREZINI *et al.*, 2016; KUIAWSKI *et al.*, 2017) e biofísicos (YIHYUN KIM *et al.*, 2012), e em estudos sobre a variabilidade espacial (CRUSIOL *et al.*, 2017) e temporal em cultivos de soja (BENEDUZZI *et al.*, 2017; FONTANA *et al.*, 2015; OLIVEIRA; FERREIRA; DANTAS, 2016).

Com os recentes avanços tecnológicos e à medida que novos equipamentos são desenvolvidos, outros IVs, como os baseados apenas no espectro do Visível (índices RGB), estão sendo derivados, cada qual com suas especificidades de uso e aplicações. Esses novos IVs surgem com uma proposta de sanar deficiências de outros índices, como a saturação ocasionada por valores mais elevados de NDVI (FONTANA *et al.*, 2015; HUETE; HUIQING LIU; VAN LEEUWEN, 1997), por exemplo. Além disso, apresentam como vantagem potencial a leveza dos equipamentos e o baixo custo de aquisição.

Realizando uma análise comparativa entre os resultados de índices RGB (apenas espectro do visível) com o NDVI (espectro do visível e infravermelho) na cultura da soja, Gitelson *et al.* (2002) demonstraram que a resposta do NDVI foi mais afetada. Isso porque a cultura da soja possui um dossel altamente heterogêneo, provocando alta variabilidade na reflectância do infravermelho próximo, que tem relação principalmente com a estrutura celular da planta. Por outro lado, os índices de vegetação de imagens RGB são presumidamente independentes da arquitetura da planta. Diferentemente do NDVI, índices RGB descrevem apenas as propriedades do espectro Visível, que é dependente da reflectância de pigmentos da superfície do dossel fotografado (ADÃO *et al.*, 2017; RIGON *et al.*, 2016).

Embora o uso de câmeras RGB convencionais tenha a principal vantagem de baixo custo e leveza, elas também envolvem certas imprecisões que devem ser consideradas e analisadas (AASEN; BOLTEN, 2018). Em um estudo realizado por Yun *et al.* (2016), os métodos de calibração de reflectância utilizados produziram altos

coeficientes de determinação, variando de 0,80 a 0,90; ainda assim, indicando a necessidade de um método de ajuste ao modelo de regressão linear para monitoramento multi-temporal de lavouras de soja utilizando-se imagens RGB. No entanto, é importante ressaltar que a calibração radiométrica desses tipos de câmeras é extremamente complexa e carece de robustez. Ainda que se tenha acesso aos dados brutos das imagens, a instabilidade do sensor e a variação na resposta sob diferentes temperaturas continua sendo um agravante (RIBEIRO-GOMES *et al.*, 2017). Nesse sentido, pesquisas têm direcionado maiores esforços para tentar encontrar uma maneira que facilite o uso e aplicações dessas câmeras com VANTs (BALLESTEROS *et al.*, 2018). Assim sendo, a aplicação de índices RGB pode apresentar-se uma como alternativa em potencial.

### 3.2. Herbicidas auxínicos

O controle de plantas daninhas é uma atividade de gestão de importância global, tanto em cultivos agrícolas quanto em terras não-agricultáveis. Contudo, ao longo dos anos, essa prática tem se deparado com inúmeros desafios, tais como: danos e passivos ambientais causados por práticas de controle, resistência de plantas a herbicidas, taxas aceleradas de dispersão de plantas daninhas através do comércio global e um número crescente de impactos relacionados às mudanças climáticas e no uso da terra e cobertura do solo (PETERSON *et al.*, 2016).

O controle de plantas daninhas de folha larga em cultivos de soja e milho com aplicações em pós-emergência pode ser realizado principalmente com herbicidas inibidores da enzima Acetolactato Sintase (ALS), que possuem várias vantagens em relação às demais opções de utilização. Entretanto, têm sido reportados diversos casos de plantas daninhas resistentes a estes herbicidas limitando a utilização destes produtos (HEAP, 2018). No Brasil, a resistência de buva (*Conyza bonariensis*) a glifosato (VARGAS *et al.*, 2007) e inibidores da ALS retrata esta ocorrência, e atualmente é um dos principais problemas para a produção de soja, com reflexos diretos na perda de produtividade e aumento dos custos de produção.

A utilização de herbicidas alternativos ao glifosato, visando a obtenção de rotação de mecanismos de ação de herbicida, é a principal forma de prevenção e

controle da resistência a herbicidas em culturas produtoras de grãos como soja e milho (DAN *et al.*, 2010). Uma das alternativas para viabilizar a inclusão de maior número de mecanismos de ação é o desenvolvimento de cultivares transgênicas resistentes à classe dos herbicidas auxínicos ou mimetizadores de auxina, como os eventos Enlist resistente a 2,4-D (WRIGHT *et al.*, 2010; ZHOU *et al.*, 2016) e Xtend resistente a Dicamba (BEHRENS *et al.*, 2007).

### 3.2.1. Sintomatologia e mecanismos de ação

A soja é frequentemente cultivada em áreas adjacentes àquelas tratadas com herbicidas auxínicos (PETERSON *et al.*, 2016), como Dicamba e 2,4-D. Geralmente nessas situações, o maior agravante reside no fato de que, mesmo em baixas doses, alguns destes herbicidas desencadeiam aumentos anormais nos processos metabólicos da planta (VIDAL; MEROTTO JR., 2001), os quais têm como consequência a divisão e alongamento celular acelerado e desordenado nas partes novas das plantas, ativando seu metabolismo e levando ao seu esgotamento. Por outro lado, em concentrações muito elevadas, esses herbicidas inibem a divisão celular e o crescimento, geralmente nas regiões meristemáticas da planta atingida, as quais acumulam tanto assimilados provenientes da fotossíntese quanto o herbicida transportado pelo floema (VIDAL; MEROTTO JR., 2001). Dessa maneira, ocorre a liberação de etileno que, por sua vez, é responsável pela produção dos principais sintomas característicos de epinastia associados a estes herbicidas (OLIVEIRA JR., 2011; VIDAL, MEROTTO JR., 2001). Além disso, quando as plantas são atingidas por deriva, os sintomas vão gradualmente aumentando em relação à fonte que espalha o herbicida, tornando difícil ver diferenças na altura das plantas (ROBINSON *et al.*, 2013).

A sintomatologia dos herbicidas auxínicos pode variar entre a clorose dos brotos terminais, “encarquilhamento” ou enrugamento das folhas do dossel e epinastia das folhas ou caule (SCHWARTZ-LAZARO *et al.*, 2017). Em altas concentrações de Dicamba, por exemplo, pode ocasionar rachaduras no caule, morte terminal e até morte da planta (GRIFFIN *et al.*, 2013; SOLOMON, BRADLEY, 2014). De acordo com

Dalla *et al.* (2018), os herbicidas auxínicos podem promover grande impacto visual em plantas sensíveis e em cultivos não-alvo. O risco de danos aos cultivos e a potencial perda em produtividade da lavoura será talvez maior para aqueles produtores que escolherem não estar informados sobre as práticas de manejo realizadas nos campos circundantes, ou que optarem por não usar variedades resistentes em regiões caracterizadas pelo uso dessa tecnologia (EGAN; BARLOW; MORTENSEN, 2014). Assim sendo, a detecção precoce dos sintomas de injúria nas culturas sensíveis como a soja se faz de fundamental importância no manejo dessas lavouras (HUANG *et al.*, 2016).

A formulação de um herbicida pode influenciar diretamente a sua absorção e translocação. Geralmente, a absorção do éster é mais rápida que a das formulações amina (PETERSON *et al.*, 2016). Ao mesmo tempo, cultivos como o de algodão e soja indicaram ser consideravelmente mais sensíveis a ésteres versus a deriva simulada de 2,4-D na formulação amina (EGAN; BARLOW; MORTENSEN, 2014).

A aplicação de Dicamba na formulação diglicolamina reduziu a deriva deste herbicida em 94,0% em comparação com a formulação dimetilamina (EGAN; MORTENSEN, 2012). Por sua vez, na formulação dimetilamina, a extensão e gravidade da deriva foi significativamente correlacionada com a temperatura do ar, indicando riscos elevados caso o Dicamba seja aplicado precocemente em pleno verão (EGAN; MORTENSEN, 2012). Em contraste, o movimento por volatilização e deriva de sais de 2,4-D, sobretudo, depende da força da associação entre o ânion e o cátion de 2,4-D, bem como a estabilidade desse cátion. Sais que se dissociam prontamente terão volatilização que geralmente se aproxima do ácido, especialmente se o cátion for suscetível à perda. Este é o caso dos sais de dimetilamina do 2,4-D, em que o íon dimetilamina está sujeito à maior volatilização. Os sais com uma dissociação mais baixa e contra-íons mais estáveis, como o sal de colina, terão significativamente menos volatilização e perda por deriva (PETERSON *et al.*, 2016).

Existem atualmente no mercado diversas formulações de herbicidas auxínicos. Como parte dos seus programas tecnológicos para desenvolvimento de cultivares resistentes a herbicidas, a Dow AgroSciences e a Monsanto/BASF estão introduzindo novas formulações com baixo nível de volatilidade (Dow AgroSciences 2011). Como exemplo, a Dow vem promovendo o *Collex-D*<sup>®</sup>, um sal quaternário de colina para o

2,4-D (Dow AgroSciences, 2011), que apresenta maior estabilidade e menor susceptibilidade à volatilização do que outras formulações de 2,4-D (PETERSON *et al.*, 2016; SOSNOSKIE *et al.*, 2015).

### 3.2.2. Deriva de herbicidas auxínicos

A introdução da soja resistente (*i.e.*, transgênica ou geneticamente modificada) aos herbicidas Dicamba e 2,4-D aumentará o uso de herbicidas auxínicos no manejo e controle de plantas daninhas resistentes a herbicidas nos próximos anos, aumentando assim o risco de deriva em culturas sensíveis/não-alvo (DALLA *et al.*, 2018). Mesmo em baixas doses, herbicidas auxínicos apresentam grande eficiência no controle de plantas daninhas de folha larga. No entanto, a ocorrência de deriva e as consequências para culturas sensíveis vem sendo um dos problemas relacionados à utilização de culturas transgênicas resistentes a herbicidas auxínicos. Esse fenômeno de deriva ocorre como resultado do carreamento de herbicidas através do vento, que pode ser função da volatilidade e deriva de vapor do herbicida. Este último é principalmente uma função da volatilização que ocorre após as partículas do herbicida atingirem o local pretendido e pode ser influenciado por vários fatores abióticos, como temperatura e URA (EGAN; MORTENSEN, 2012; MUELLER; WRIGHT; REMUND, 2013).

Existe maior preocupação sobre a ocorrência da deriva de Dicamba para cultivos não-alvo porque este herbicida é extremamente ativo em culturas sensíveis, mesmo em baixas doses (HUANG *et al.*, 2016). Ao se diagnosticar sintomas de injúria provocados por deriva de Dicamba, é quase impossível se estimar a dose recebida pelas plantas de soja lesionadas, especialmente se o evento for resultado de volatilização e a fonte desconhecida. Nesse sentido, a relação direta entre a dose de Dicamba e o rendimento de grãos da soja é, portanto, de valor limitado para os profissionais que avaliam a ocorrência de deriva a nível de campo. Ainda assim, a quantificação do grau de fitotoxicidade e sua relação com o rendimento de grãos da soja ainda é uma prática bastante usual entre os pesquisadores (KNISS, 2018). O problema inerente a essa prática reside no fato de que, essas metodologias podem



ser subjetivas, conseqüentemente, conduzindo ao mal julgamento sobre os reais efeitos da deriva de herbicidas auxínicos no rendimento de grãos em cultivos de soja sensível.

O efeito da ocorrência da deriva de 2,4-D ou de contaminações presentes no tanque do equipamento de aplicação vem sendo estudado como forma de entendimento de suas conseqüências para culturas sensíveis. Determinações de campo indicaram que deposição causada pelo vento em aplicações de 2,4-D compreende de 0,1 a 9% da dose aplicada (CARLSEN; SPLIID; SVENSMARK, 2006). Ainda, a simulação de efeitos de deriva é sugerida como pertinente com aplicações de 0,001 das doses recomendadas (EGAN; BARLOW; MORTENSEN, 2014). Em soja, deposições de 2,4-D nas doses de 11,2; 56 ou 112 g ha<sup>-1</sup> aplicadas no estágio V3 resultaram em injúria de 5, 23 e 33%, respectivamente (ANDERSEN *et al.*, 2004), sendo que somente a dose de 112 g ha<sup>-1</sup> resultou em redução no rendimento de grãos da cultura. Esta dose representa de 10 a 20% da dose recomendada deste herbicida para a cultivar Enlist, o que dificilmente poderá ocorrer em uma situação de campo.

Um estudo de Robinson *et al.* (2013) demonstrou que as doses de 2,4-D necessárias para causar 20% de injúria em aplicações realizadas em V2, V5, e R2 foram de 77, 29 e 109 g ha<sup>-1</sup>. Neste mesmo estudo, observou-se que injúria de 35% aos 14 DAT foi responsável por uma redução de cerca de 10% no rendimento de grãos. Estes resultados indicam baixo efeito de fitointoxicação em doses razoáveis de 2,4-D caso a cultura seja acometida por algum evento de deriva.

Baseado no exposto, existe, portanto, a necessidade de avaliação através de métodos expeditos do efeito de deriva de Dicamba e 2,4-D em culturas sensíveis como a soja, para que se possa inferir sobre as conseqüências da sintomatologia existente. A correlação entre a sintomatologia observada e o efeito no rendimento de grãos da cultura consiste em um procedimento experimental capaz de fornecer as informações necessárias para esta análise. No entanto, em condições de lavoura, a ocorrência da sintomatologia não é uniforme e pode ocorrer em áreas extensas dificultando sua avaliação.

Atualmente, dados de SR têm sido amplamente utilizados para a determinação da fertilização a ser aplicada em cultivos agrícolas e na identificação de plantas daninhas para realização de medidas de controle (MEROTTO JR. *et al.*, 2012).

Baseado nisso, a utilização de dados espectrais obtidos por sensores embarcados em VANTs é apontada como uma alternativa viável para a determinação do nível de injúria causado por herbicidas em soja. Da mesma maneira, esta metodologia pode permitir a análise de uma extensa área, com a integração da variabilidade existente, e assim apontar para uma quantificação precisa das consequências da deriva de herbicidas.

### 3.3. Sensoriamento Remoto aplicado ao estudo do efeito de herbicidas em soja

Ao longo dos últimos anos, tem sido crescente o número de estudos reportando a aplicação de dados providos por SR para a detecção de sintomas provocados por herbicidas em cultivos de soja. Em geral, a maioria desses estudos foram realizados a nível de campo (manual ou portátil) com sensor portátil (THELEN; KRAVCHENKO; LEE, 2006); a nível laboratorial, utilizando sensores hiperespectrais (HENRY *et al.*, 2004; HUANG *et al.*, 2016); ou através de sensores multiespectrais embarcados em aeronaves tripuladas (HUANG *et al.*, 2015; HUANG; THOMSON, 2010; ORTIZ *et al.*, 2011).

O uso combinado de sensor de campo com aqueles embarcados em aeronaves tripuladas é uma técnica empregada na detecção dos níveis de injúria cultivos agrícolas (THELEN; KRAVCHENKO; LEE, 2006). A grande vantagem da aplicação combinada dessas tecnologias é que dados coletados em campo podem ser úteis para a correção de imprecisões nas leituras realizadas por sensores de base aérea (JENSEN, 2009). Ainda, a aplicação de índices de vegetação, como o NDVI, minimiza os efeitos causados por diferença de iluminação ou distorções influenciadas pela topografia do terreno. Baseando-se nesses princípios, no estudo de Thelen *et al.* (2006), foi reportado significativa relação do efeito do glifosato em soja sobre a resposta do NDVI derivado de sensor multiespectral a bordo de uma aeronave tripulada. Resultados apresentados por Huang e Thomson (2010) também revelaram a capacidade do NDVI e do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI, do inglês *Soil Adjusted Vegetation Index*) no monitoramento da resposta da soja ao estresse induzido por glifosato em diferentes estádios fenológicos.

Avaliações de sintomas causados por herbicidas realizadas por sensores hiperespectrais geralmente apresentam certa vantagem em relação àqueles adquiridos por sensores de campo ou multiespectrais. Isso porque, o elevado número de bandas espectrais possibilita a identificação de pequenas variações e descontinuidades no espectro permitindo distinguir entre plantas saudáveis e plantas danificadas (HENRY *et al.*, 2004). Ainda assim, alguns resultados avaliando o efeito do Dicamba em soja sugerem que existe certa limitação na identificação precoce da dose de deriva que atingiu as dependências da planta (HUANG *et al.*, 2016). No entanto, independentemente da dose, a aplicação de índices de vegetação a partir de dados hiperespectrais foram favoráveis na diferenciação entre a soja saudável e danificada por Dicamba de 24 a 72 horas após o tratamento (HUANG *et al.*, 2016).

Além dos efeitos de fitotoxicidade ao glifosato, índices de vegetação foram indicados como altamente correlacionados com a altura da planta e rendimento de grãos da soja, embora pouco correlacionados com o teor de clorofila, independentemente do tempo decorrido após o tratamento (HUANG *et al.*, 2015). Isto sugere que índices de vegetação poderiam ser usados para determinação da fitotoxicidade ao Dicamba e 2,4-D, e para predição da redução do rendimento devido aos danos provocados por estes herbicidas na cultura da soja.

Com base no exposto, tecnologias geoespaciais usadas para mapeamento podem ser combinadas com algoritmos e técnicas de SR para decisões de gerenciamento em cultivos susceptíveis acometidos por algum evento de deriva de Dicamba e 2,4-D. A partir disso, os produtores podem criar zonas de gerenciamento, possibilitando a tomada de decisões mais assertivas a partir da detecção de um evento de deriva (HENRY *et al.*, 2004).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para facilitar a compreensão, os procedimentos metodológicos aplicados neste estudo foram sumarizados no fluxograma de trabalho da Figura 4.

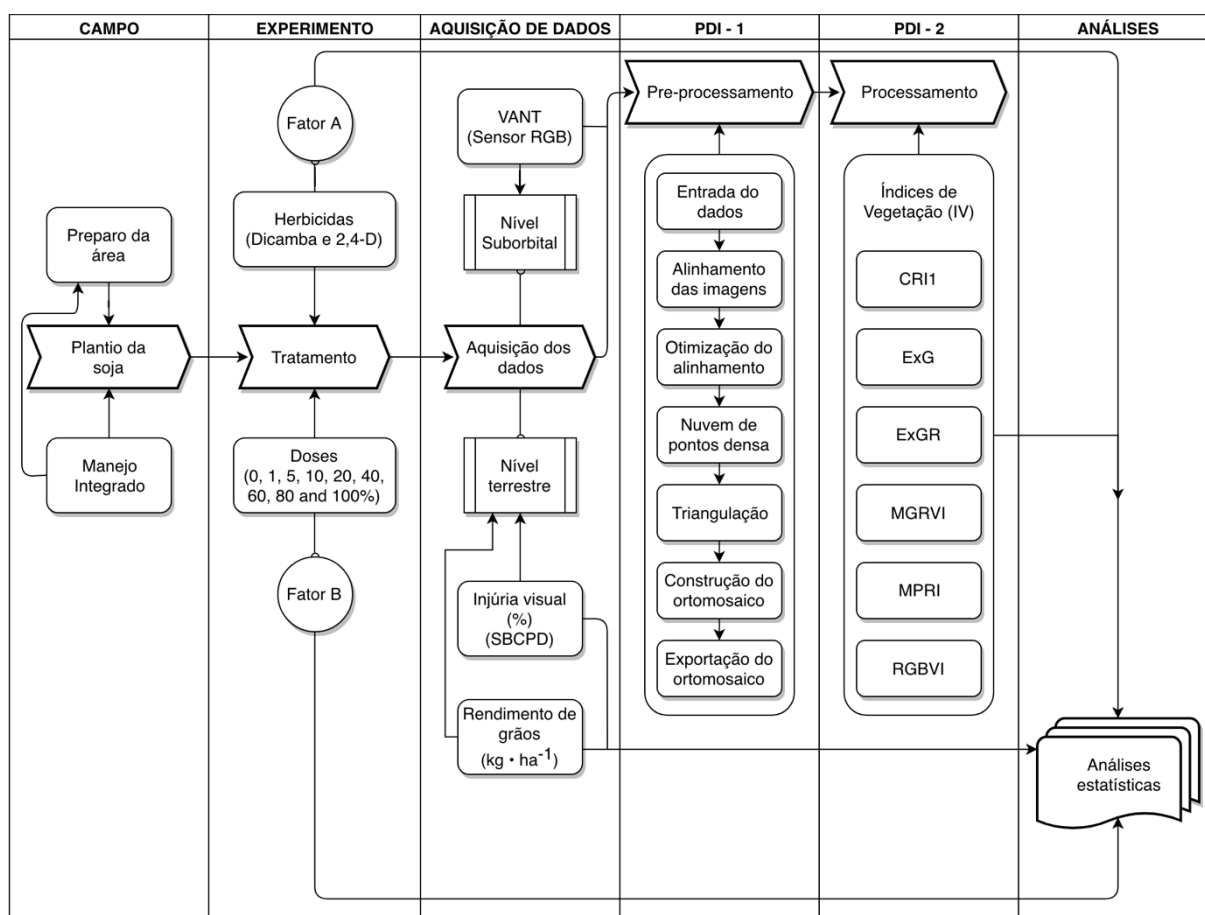


Figura 4. Fluxograma dos procedimentos metodológicos e hierarquia de processamento das imagens.

### 4.1. Experimento de campo

A avaliação do efeito dos herbicidas auxínicos em soja sensível (não-alvo) se deu através da simulação de diferentes níveis (doses) de ocorrência de deriva, com aplicação dos tratamentos via pulverizador costal pressurizado com  $\text{CO}_2$ , munido de bicos AFXR 110-02; mantido à pressão constante de 200 kPa e calibrado para vazão de  $200 \text{ L ha}^{-1}$ . A cultivar de soja plantada foi a BMX Potência RR (Brasmax – GDM Genética do Brasil). O experimento foi conduzido em delineamento de blocos ao

acaso, com quatro repetições.

As unidades experimentais constituíram-se de parcelas com cinco linhas de plantio, com espaçamento de 0,45 m entre linhas e comprimento de 10 m lineares (Figura 1). Antecedendo a implantação da lavoura, foi realizado um manejo integrado, incluindo preparo da área (limpeza, adubação, etc.), tratamento das sementes com fungicida triadimenol ( $0,0027 \text{ L kg}^{-1}$  de sementes), inseticida imidacloprido ( $0,001 \text{ L kg}^{-1}$  de sementes) e inoculação com inoculante *Bradyrhizobium Japonicum* (estirpes SEMIA 5079 e 5080 (Nitragin Cell Tech HC)) na dose de  $0,003 \text{ L kg}^{-1}$  de sementes, aplicado momentos antes da semeadura. O controle de insetos-praga das unidades experimentais foi promovido via administração do inseticida biológico *Bacillus thuringiensis, var. kurstaki*, linhagem HD-I na dose de  $0,5 \text{ L ha}^{-1}$  (Dipel) e inseticida Karate Zeon 50. Ao longo do ciclo experimental, em adição aos tratamentos com os herbicidas, foi incluída prática de capina manual para controle de plantas daninhas. O experimento foi irrigado sempre que necessário.

A deriva simulada constituiu-se da administração dos herbicidas (Fator A) aplicados em pós-emergência, em diferentes doses de tratamento (Fator B). No Fator A considerou-se os respectivos herbicidas: Dicamba (sal de diglicolamina) *XtendiMax<sup>®</sup> VaporGrip<sup>®</sup> Technology* da Monsanto e duas formulações 2,4-D da Dow AgroSciences, as quais *Enlist<sup>TM</sup> Colex-D<sup>®</sup>* (sal de colina) e *DMA<sup>®</sup> 806 BR* (sal de dimetilamina). No Fator B foram consideradas as doses de 0 (zero), 1, 5, 10, 20, 40, 60, 80 e 100 % da dose máxima recomendada desses herbicidas para cultivares resistentes – dicamba:  $560 \text{ g e.a. ha}^{-1}$ ; 2,4-D sal de dimetilamina e 2,4-D sal de colina:  $1005 \text{ g e.a. ha}^{-1}$ .

Os tratamentos foram administrados no estágio vegetativo – V6 de desenvolvimento da soja, no início da manhã, em condições ambientais de temperatura entre 23 a 27 °C, URA entre 60 a 75%, e velocidade do vento inferior a  $1 \text{ m s}^{-1}$ . Para eliminar a interferência de plantas daninhas em todos os tratamentos e proporcionar apenas o efeito da fitointoxicação, foi realizado controle de invasoras por meio da administração do herbicida Glifosato Nortox (glifosato) na dose de  $1080 \text{ g ha}^{-1}$ .

## 4.2. Aquisição de dados

A avaliação dos tratamentos foi realizada utilizando-se dados espectrais (imagens digitais) adquiridos ao nível suborbital, com sensor RGB embarcado em VANT, da análise visual do grau de fitotoxicidade e do rendimento de grãos da soja.

O sistema VANT foi constituído por um sensor RGB modelo DJI™ ZenMuse X3 (câmera digital com 12 megapixels e sensor do tipo CMOS – *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) embarcado em um quadricóptero modelo DJI™ Matrice 100, prontamente equipado com sistemas inercial e Sistema Global de Navegação por Satélites (GNSS, do inglês *Global Navigation Satellite Systems*). Este equipamento foi cedido pelo Programa de Nucleação de Grupos de Pesquisa via financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), a partir do Edital 04/2016 – consórcio UERGS/UFRGS/UFSM. O planejamento do voo, totalmente automatizado, foi realizado no ambiente do aplicativo SkyDrones App (SkyDrones).

O grau de fitotoxicidade da soja associado ao efeito dos herbicidas foi determinado com base na escala percentual de avaliação visual da Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas (SBCPD, 1995), em que 0 (zero) indicou nenhuma injúria e 100% indicando destruição total da planta.

A coleta dos dados espectrais se deu aos 8, 16 e 64 dias após o tratamento (DAT), a análise de fitotoxicidade aos 8, 15 e 56 DAT e o rendimento de grãos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) foi calculado imediatamente após a colheita da soja, aos 65 DAT. Por questões logísticas as avaliações de fitotoxicidade e a coleta dos dados espectrais não puderam ser realizadas na segunda (15 e 16 DAT) e terceira (56 e 64 DAT) etapa de coleta dos dados.

Para quantização do rendimento de grãos foi realizada colheita manual da soja numa área de  $1,35 \text{ m}^2$  em cada unidade experimental. Após trilhagem das amostras em trilhadora estacionária, foi determinada a massa de grãos por unidade experimental. O rendimento em  $\text{kg ha}^{-1}$  foi obtido por extrapolação considerando o equivalente de  $130 \text{ g kg}^{-1}$  de umidade.

### 4.3. Processamento de Imagens Digitais (PDI)

O pré-processamento das imagens digitais adquiridas com o sensor RGB foi executado no *software* PhotoScan (Agisoft Inc.) obedecendo a seguinte hierarquia:

i) Entrada de dados: foram importadas as imagens, com seus respectivos ângulos de altitude, determinados pelo sistema de navegação inercial (IMU), e com as coordenadas do seu ponto central, medidas pelo GNSS também presente no VANT;

ii) Alinhamento de imagens: foram extraídos as características e os descritores correspondentes entre as imagens (Geotags). Após, calculou-se as posições das imagens entre si (orientação externa relativa) e com relação ao terreno (orientação externa absoluta), e determinou-se o modelo de nuvem de pontos esparsos. Essa nuvem de pontos possui no seu conjunto de dados os valores de Níveis Digitais (ND) das respectivas bandas espectrais do sensor (R – *red*, G – *green* e B – *blue*) e os dados de elevação da superfície imageada. A partir dessas informações, os pixels das imagens foram transformados de uma projeção cônica para uma perspectiva ortogonal. O processo de ortorretificação para toda a imagem foi realizado na etapa da construção da malha triangular (etapa v);

iii) Otimização de alinhamento: esta etapa foi executada para melhorar a precisão nos cálculos dos parâmetros internos e externos da câmera, com o objetivo de se corrigir eventuais distorções. Também foi obtida a precisão da georreferência nessa otimização do bloco de imagens, e se definiu o sistema de referência de coordenadas de exportação do ortomosaico (ortoimagem);

iv) Nuvem de pontos densa: baseado nas posições estimadas das imagens e nos pontos esparsos, foram determinados novos pontos de profundidade. Então, esses novos pontos foram combinados em uma nuvem de pontos densa;

v) Aerotriangulação: uma malha triangular irregular (TIN – *do inglês Triangular Irregular Network*) foi criada a partir da nuvem de pontos densa. Optou-se pela opção “*high*” para o número de faces da malha, possibilitando, assim, a geração máxima de facetas triangulares. Esse TIN representou as elevações da superfície, a partir das quais foi obtido o Modelo Digital de Superfície (MDS) da área do estudo;

vi) Construção do Ortofotomosaico: o ortomosaico foi exportado no sistema de coordenadas Universal Transverso de Mercator (UTM), Zona 22 S, no sistema de referência WGS84, com uma resolução espacial de 3 cm. O valor do ND do pixel de saída foi obtido pelo cálculo da média dos valores sobrepostos;

vii) Exportação do Ortofotomosaico Gerreferenciado: o ortomosaico da área do estudo foi exportado no formato Geotiff, com o mesmo sistema de referência e projeção cartográfica.

Após a geração dos ortomosaicos, já na etapa de processamento, foram derivados IVs atualmente aplicados no estudo de parâmetros biofísicos e bioquímicos da cobertura vegetal, os quais foram sumarizados na Tabela 1. Os IVs foram derivados aplicando-se aritmética de bandas no ambiente do *software* de código aberto QGIS 2.18 – versão Las Palmas.



Tabela 1. Sumário dos índices de vegetação derivados do sensor RGB – espectro do visível.

IV	Equação	Referência
Excesso de Verde ( <i>Excess Green</i> )	$ExG = 2G - R - B$	(MEYER; NETO, 2008; YUN <i>et al.</i> , 2016; ZHENG <i>et al.</i> , 2017)
Excesso de Verde menos Excesso do Vermelho ( <i>Excess Green minus Excess Red</i> )	$ExGR = ExG - (1,4R - G)$	(BALLESTEROS <i>et al.</i> , 2018; MEYER; NETO, 2008; ZHENG <i>et al.</i> , 2017)
Índice da Reflectância Fotoquímica Modificado ( <i>Modified Photochemical Reflectance Index</i> )	$MPRI = \frac{\rho G - \rho R}{\rho G + \rho R}$	(LI; LI; SUN, 2014)
Índice de Vegetação Vermelho-Verde Modificado ( <i>Modified Green Red Vegetation Index</i> )	$MGRVI = \frac{\rho G^2 - \rho R^2}{\rho G^2 + \rho R^2}$	(BENDIG <i>et al.</i> , 2015)
Índice de Vegetação RGB ( <i>Red Green Blue Vegetation Index</i> )	$RGBVI = \frac{\rho G^2 - (\rho B \times \rho R)}{\rho G^2 + (\rho B \times \rho R)}$	(BARETH <i>et al.</i> , 2016; BENDIG <i>et al.</i> , 2015)
Índice da Reflectância de Carotenoides 1 ( <i>Carotenoid Reflectance Index 1</i> )	$CRI1 = \frac{1}{\rho B} - \frac{1}{\rho G}$	(GITELSON <i>et al.</i> , 2002)

$\rho R$  é a reflectância no Vermelho;  $\rho G$  é a reflectância no Verde, e  $\rho B$  se refere à reflectância no Azul.

#### 4.4. Análises estatísticas

Inicialmente, os dados obtidos foram analisados quanto à sua normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e homocedasticidade (teste de Hartley). Posteriormente, os dados de rendimento foram submetidos à análise de variância ANOVA pelo teste F ao nível de 5% de significância. Considerou-se como hipóteses: H0: não houve diferença estatística entre o tipo/dose dos herbicidas; e H1: houve pelo menos um herbicida/dose que indicou desempenho distinto no rendimento de grãos em relação ao tipo/dose dos herbicidas.

Constatada significância estatística ( $p\text{-valor} \leq 0.05$ ) no desempenho do rendimento de grãos da soja, realizou-se a análise por regressão não-linear sigmoidal do tipo logístico com o uso do software SIGMAPLOT.v11, conforme a seguinte equação:  $Y = a/[1+(x/x_0)^b]$ , em que “Y” é o rendimento de grãos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ); “x” é o nível de deriva simulada (dose em percentagem) dos herbicidas; e, “a”, “x0” e “b” são parâmetros da equação. Neste caso, o coeficiente “a” se refere à diferença entre os pontos máximo e mínimo da curva, “x0” é a dose que proporciona 50% de resposta da variável ou DL50, e “b” é a declividade da curva. Os valores de DL50 foram obtidos através do cálculo aritmético que corresponde ao valor necessário para promover 50% da resposta da dose, de acordo com os parâmetros gerados nas equações das curvas.

A variabilidade dos dados dos IVs em relação às doses de deriva simulada dos respectivos herbicidas foi verificada utilizando-se de estatística descritiva. Para isso, realizou-se a normalização dos dados dos respectivos IVs considerando a média dos seus valores observados no Controle. Como valor de entrada, para cada IV correspondente foi considerada a média aritmética dos valores dos pixels contidos dentro da Área Útil ( $11,44 \text{ m}^2$ ) de cada unidade experimental (Figura 1).

A relação entre o grau de fitotoxicidade e IVs derivados do sensor RGB, respectivamente, com o rendimento de grãos da soja foi avaliada por análise de regressão linear utilizando-se o software de código aberto R.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Dose-resposta dos herbicidas

A análise ANOVA demonstrou interação significativa ( $p \leq 0,05$ ) entre herbicidas versus dose para as avaliações de rendimento de grãos da soja. Dessa maneira, as curvas de dose-reposta dos herbicidas avaliados foram ajustadas pela regressão não-linear sigmoidal do tipo logístico (Figura 5).

A cultivar de soja sensível/não-alvo utilizada neste estudo demonstrou tolerância a baixas doses da deriva simulada do 2,4-D tanto na formulação sal de dimetilamina quanto na formulação sal de colina. Em contraste, a soja foi altamente susceptível ao Dicamba mesmo quando exposta a baixas doses deste herbicida. Como consequência, o impacto na redução do rendimento de grãos da soja foi maior para o Dicamba do que para as formulações 2,4-D.

Os modelos ajustados estimaram que as doses de Dicamba; 2,4-D sal de dimetilamina e 2,4-D sal de colina capazes de reduzir em 50% o rendimento de grãos da soja, foram de 13,18 ( $R^2 = 0,99$ ); 55,40 ( $R^2 = 0,87$ ) e 48,29% ( $R^2 = 0,94$ ), respectivamente, das doses recomendadas desses herbicidas para cultivares resistentes (Tabela 2). Neste sentido, em geral, a cultivar de soja utilizada no estudo foi 4.2x e 3.7x mais susceptível ao Dicamba que às formulações 2,4-D sal de dimetilamina e sal de colina, respectivamente.

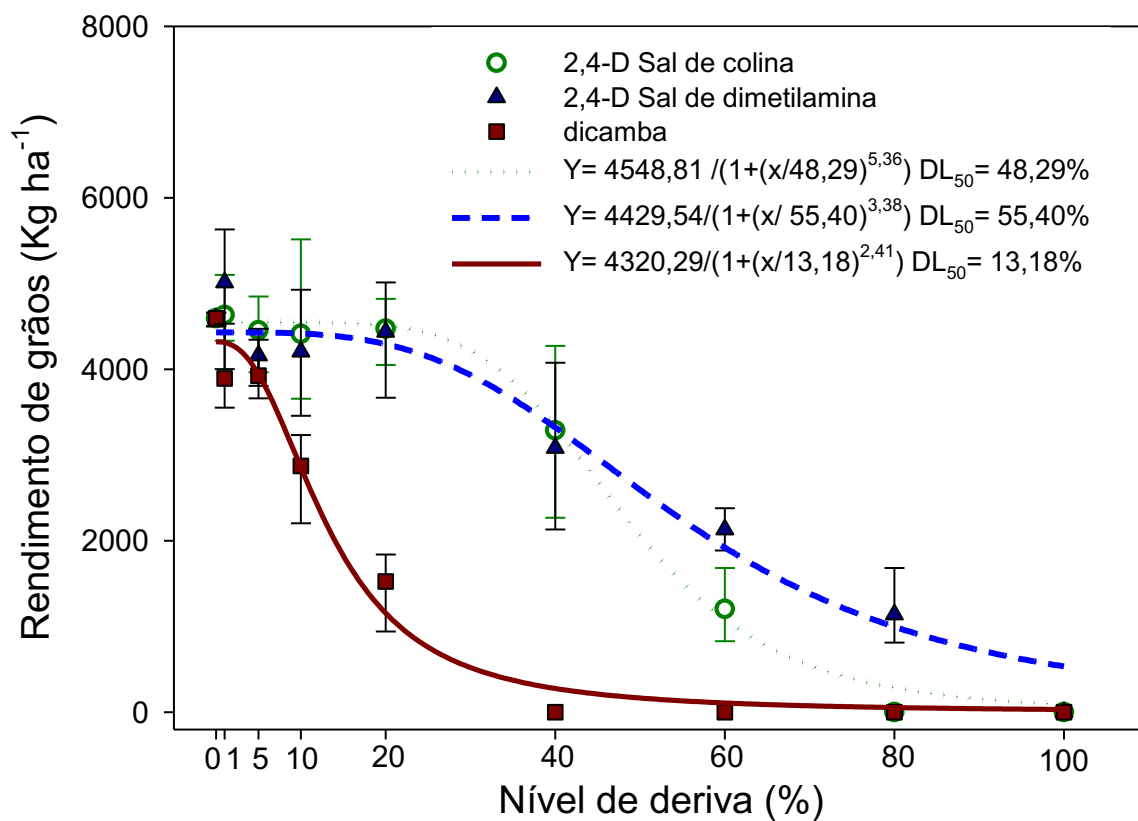


Figura 5. Rendimento de grãos da soja (kg ha<sup>-1</sup>) em função de diferentes níveis percentuais de deriva do Dicamba (100% = 560 g e.a. ha<sup>-1</sup>); 2,4-D sal de dimetilamina (100%=1005 g e.a. ha<sup>-1</sup>) e 2,4-D sal de colina (100% = 1005 g e.a. ha<sup>-1</sup>). Parâmetros das equações na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do ajuste ao modelo não-linear sigmoidal do tipo logístico<sup>1</sup> utilizada para determinação do nível de deriva (%) dos respectivos herbicidas, necessário para reduzir em 50% (DL<sub>50</sub>) o rendimento de grãos da soja.

Herbicida	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>x<sub>0</sub></b>	<b>DL<sub>50</sub></b>	<b>R<sup>2</sup></b>
	----- Rendimento de grãos (kg • ha <sup>-1</sup> ) -----				
Dicamba	4320,29 (113,85) <sup>2***3</sup>	2,41 (0,28) <sup>***</sup>	13,18 (0,79) <sup>***</sup>	13,18	0,99 <sup>***</sup>
2,4-D sal de dimetilamina	4429,54 (141,75) <sup>***</sup>	3,38 (0,64) <sup>***</sup>	55,40 (3,44) <sup>***</sup>	55,40	0,87 <sup>***</sup>
2,4-D sal de colina	4548,81 (114,36) <sup>***</sup>	5,36 (0,89) <sup>***</sup>	48,29 (1,94) <sup>***</sup>	48,29	0,94 <sup>***</sup>

<sup>1</sup>Equação logística de 3 parâmetros do tipo  $Y = a/[1+(x/x_0)^b]$ .

<sup>2</sup>Valores entre parênteses correspondem ao erro padrão da estimativa do parâmetro.

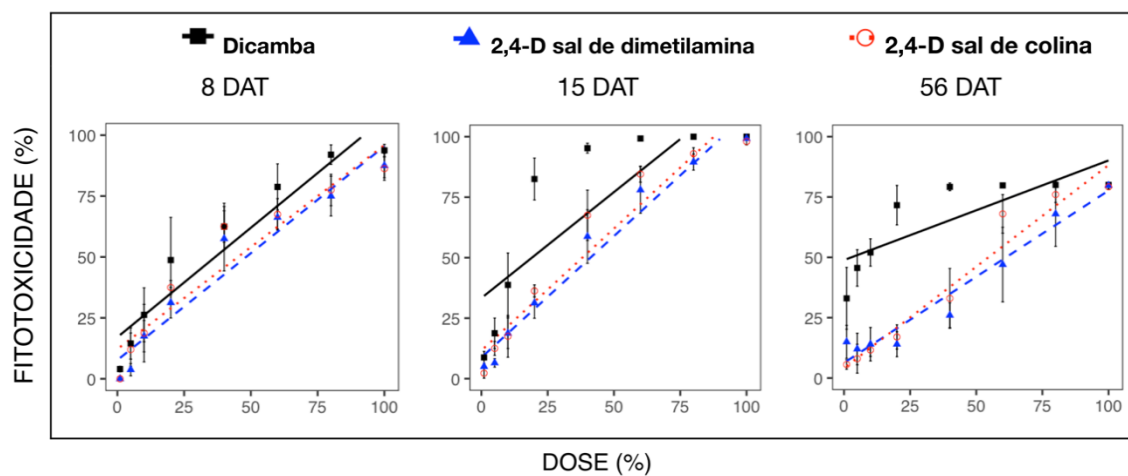
<sup>3</sup>Significância pelo teste 't' ao nível de: \*\*\*1%, \*\*5% e \*10% probabilidade do resíduo.

## 5.2. Fitotoxicidade

Os modelos de ajuste linear simples demonstraram alta ( $R^2 \geq 0,86$ ) relação linear entre o grau de fitotoxicidade e as doses de deriva simulada dos respectivos herbicidas nas avaliações realizadas aos 8 DAT. Nas avaliações realizadas mais tardiamente (15 e 56 DAT), os sintomas de fitotoxicidade causados pelo Dicamba tenderam a relações não-lineares, enquanto que a relação de linearidade aumentou nos tratamentos com 2,4-D (Figura 6).

Observou-se que nos tratamentos com Dicamba a relação entre fitotoxicidade e rendimento de grãos foi 2 e 8% maior aos 15 DAT ( $R^2 = 0,94$ ) comparativamente às avaliações realizadas aos 8 ( $R^2 = 0,86$ ) e 56 DAT ( $R^2 = 0,92$ ), respectivamente. Nos tratamentos com aplicação de 2,4-D essa relação aumentou na medida em que se passaram os DAT, produzindo  $R^2$  igual a 0,78 (8 DAT); 0,83 (15 DAT) e 0,85 (56 DAT) para 2,4-D sal de dimetilamina e  $R^2$  igual a 0,76 (8 DAT); 0,80 (15 DAT) e 0,89 (56 DAT) para 2,4-D sal de colina (Figura 7).

O grau de fitotoxicidade causado por exposição às doses de 1 e 5% do Dicamba variou de 4 (8 DAT) a 33% (56 DAT) e de 14,5 (8 DAT) a 45,6% (56 DAT), resultando numa redução média de 12 e 13% no rendimento de grãos da soja, respectivamente (Figuras 6 e 7). Em contraste, exposição à dose de 1% nos tratamentos com as formulações 2,4-D (dimetilamina e sal de colinas) indicou um pequeno (5,0 e 4,5%) acréscimo no rendimento de grãos da soja (Figura 7). Nessa dosagem, o grau de fitotoxicidade variou de 0 (8 DAT) a 15% (56 DAT) para os tratamentos com 2,4-D sal de dimetilamina e de 0 (8 DAT) a 5,6% (56 DAT) para tratamentos com 2,4-D sal de colina. As perdas no rendimento de grãos nos tratamentos com as formulações 2,4-D na dose de 5% foram superiores se comparadas às doses de 10 e 20% (2,4-D sal de dimetilamina e 2,4-D sal de colina).



DAT	Herbicida	----- Parâmetros da equação linear <sup>1</sup> -----			
		a	b	R <sup>2***</sup>	RMSE
8	Dicamba	0.1708	0.0090	0.86	0.13
	2,4-D sal de dimetilamina	0.0768	0.0088	0.90	0.10
	2,4-D sal de colina	0.1218	0.0084	0.88	0.11
15	Dicamba	0.3331	0.0088	0.67	0.21
	2,4-D sal de dimetilamina	0.0873	0.0100	0.94	0.09
	2,4-D sal de colina	0.1162	0.0101	0.91	0.11
56	Dicamba	0.4884	0.0041	0.60	0.12
	2,4-D sal de dimetilamina	0.0629	0.0071	0.88	0.09
	2,4-D sal de colina	0.0406	0.0084	0.93	0.08

<sup>1</sup>Equação linear do primeiro grau do tipo  $Y = a + bX$ .  
Significância pelo teste 't' ao nível de: \*\*\*1%, \*\*5% e \*10% de probabilidade do resíduo.

Figura 6. Variação no grau de fitotoxicidade (%) em função da dose (%) de deriva simulada dos respectivos herbicidas para as avaliações realizadas aos 8, 15 e 56 dias após o tratamento (DAT).

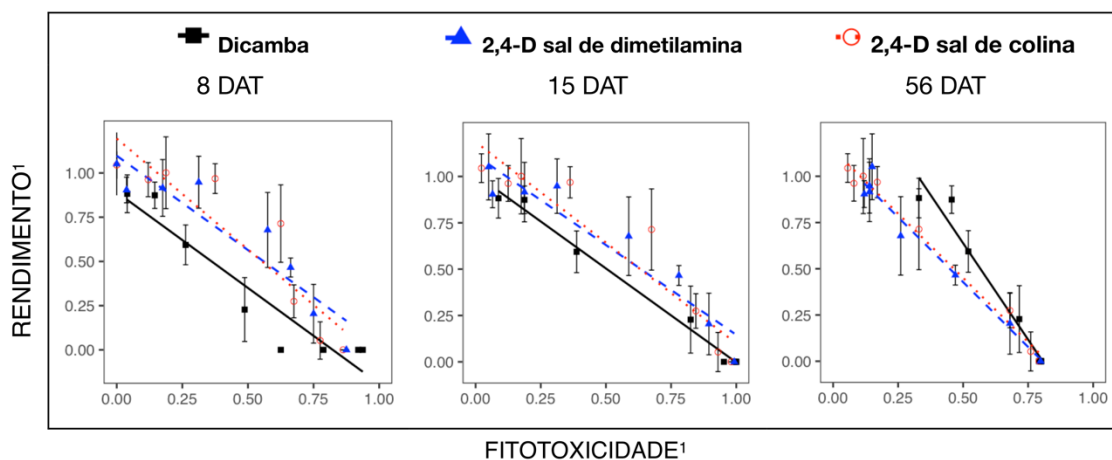
Exposição à dose de 20% do Dicamba produziu de 48,8 (8 DAT) a 71,6% (56 DAT) de fitotoxicidade e indicou drástica (80%) redução no rendimento de grãos da soja, sendo que exposição a doses superiores a 40% reduziram o rendimento de grãos a zero. Por sua vez, as maiores reduções no rendimento de grãos da soja registradas para os tratamentos com as formulações 2,4-D ocorreram a partir da

exposição às doses de 40% dos herbicidas, sendo que esse decréscimo no rendimento foi cerca de 2,0x superior nos tratamentos com 2,4-D sal de colina na dose de 60% e 4,0x superior na dose de 80%, em relação ao 2,4-D sal de dimetilamina (Figura 7).

O grau de fitotoxicidade nos tratamentos com 2,4-D sal de colina na dose de 60% foi de 67,5 (8 DAT); 84,5 (15 DAT) e 68,0% (56 DAT), enquanto que nos tratamentos com 2,4-D sal de dimetilamina as avaliações indicaram 66,3 (8 DAT); 78,0 (15 DAT) e 47,0% (56 DAT) de injúria. Isso significou dizer que, a soja foi visualmente mais susceptível ao 2,4-D sal de colina na dose de 60%.

A redução no rendimento de grãos da soja nas unidades experimentais submetidas aos tratamentos com 2,4-D, em média, não ultrapassou 10% entre as doses de 1 e 20%. Apenas a dose de 100% indicou rendimento de grãos igual a zero nos tratamentos submetidos à aplicação com as formulações 2,4-D. Apenas os tratamentos com 2,4-D sal de colina na dose de 10% não indicaram variação no rendimento de grãos em relação ao Controle.





DAT	Herbicida	---- Parâmetros da equação linear¹ ----			
		a	b	R²***	RMSE
8	Dicamba	0,8749	-1,0515	0,86	0,14
	2,4-D sal de dimetilamina	1,0912	-1,0521	0,78	0,18
	2,4-D sal de colina	1,1778	-1,2168	0,76	0,21
15	Dicamba	0,9983	-0,9957	0,94	0,10
	2,4-D sal de dimetilamina	1,1137	-0,9674	0,83	0,16
	2,4-D sal de colina	1,1720	-1,0592	0,80	0,19
56	Dicamba	1,6100	-1,9766	0,92	0,11
	2,4-D sal de dimetilamina	1,1033	-1,3272	0,85	0,15
	2,4-D sal de colina	1,1290	-1,3453	0,89	0,14

¹Equação linear do primeiro grau do tipo  $Y = a + bX$ .  
 aValores relativos ao Controle (rendimento médio igual a 4.580,73 kg ha<sup>-1</sup>).  
 Significância pelo teste 't' ao nível de: \*\*\*1%, \*\*5% e \*10% de probabilidade do resíduo.

Figura 7. Relação entre o rendimento de grãos da soja e o grau de fitotoxicidade associada com o efeito da deriva dos respectivos herbicidas aos 8, 15 e 56 DAT.

¹Valores relativos ao Controle.

### 5.3. Índices de Vegetação

A variabilidade na resposta dos IVs ao efeito dos tratamentos dos respectivos herbicidas em relação às doses de deriva simulada foi sumarizada na Figura 8.

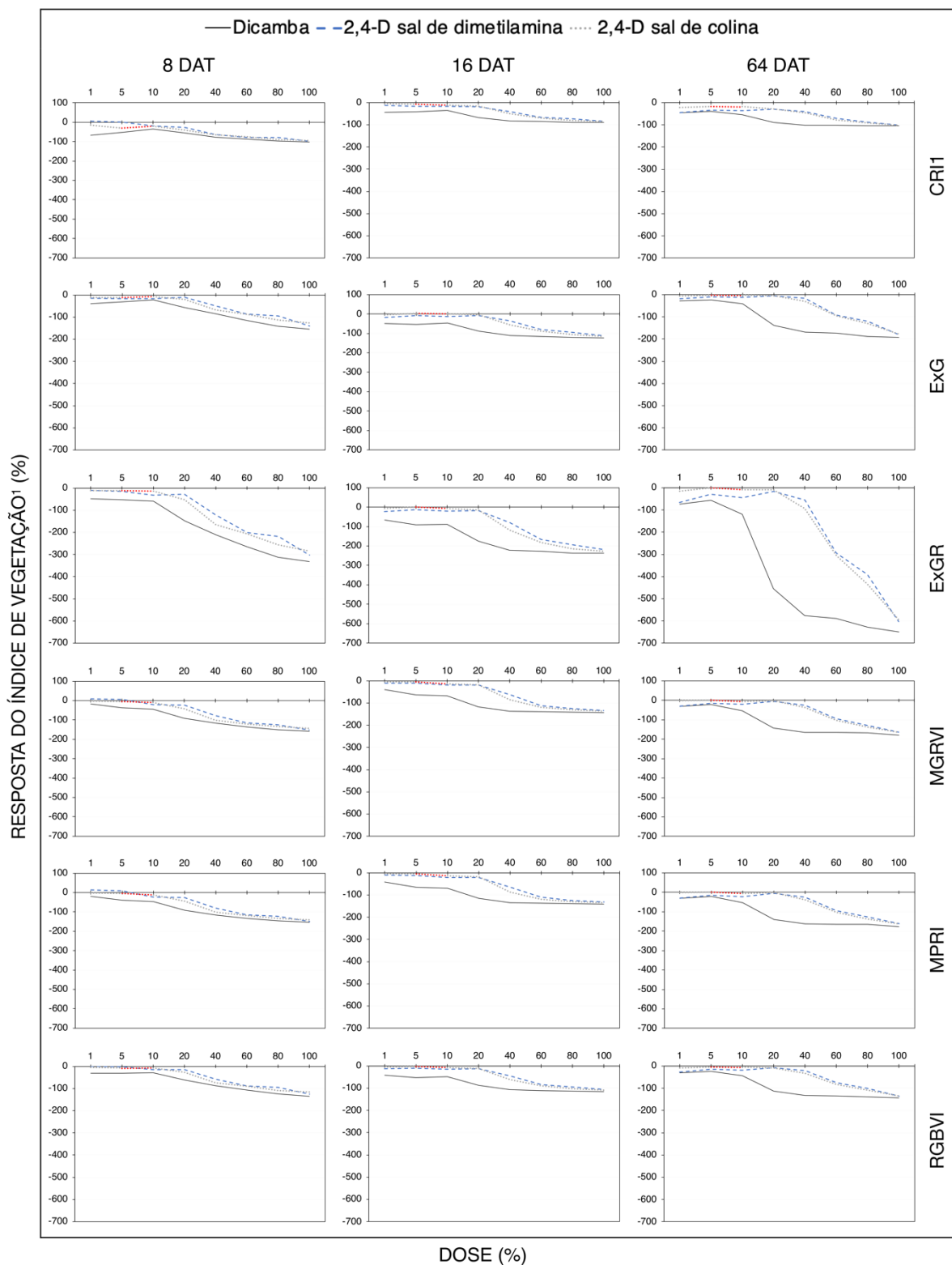


Figura 8. Perfil da variabilidade na resposta dos índices de vegetação em relação à dose de deriva simulada dos respectivos herbicidas aos 8, 16 e 64 dias após o tratamento. <sup>1</sup>Valores negativos indicam redução e valores positivos acréscimo.

Todos os tratamentos com Dicamba indicaram redução na reposta dos IVs ao efeito do herbicida ao longo dos DAT avaliados. Em contraste, os índices CRI1, MGRVI e MPRI, respectivamente, indicaram acréscimo na reposta dos IVs de 7, 10 e 13% na dose de 1% dos tratamentos com 2,4-D sal de dimetilamina aos 8 DAT. Observou-se ainda nos tratamentos com este herbicida que, na dose de 5% para o mesmo período avaliado, houve acréscimo de 0,03; 6,0 e 9,0% (CRI1, MGRVI e MPRI). Já os tratamentos com 2,4-D sal de colina resultaram em aumento de 1,8 e 0,5%, respectivamente, na resposta do ExG e ExGR aos 16 DAT na dose de 5%. Na mesma dosagem deste herbicida, verificou-se também aumento de 1,44 e 1,34% na resposta ao efeito do herbicida, respectivamente, no MGRVI e MPRI aos 64 DAT.

Em geral, o ExGR nas doses acima de 20% foi o IV que indicou maior sensibilidade a reduções quanto ao efeito dos herbicidas ao longo dos DAT avaliados, ao passo que seus valores sofreram decréscimo ou acréscimo entre as doses de 1 e 10%. Analisando-se o perfil das linhas de tendência (Figura 8), os índices MGRVI e MPRI não indicaram variação expressiva entre si quanto às suas respostas ao efeito dos herbicidas em relação às doses de deriva simulada por herbicidas e ao longo dos DAT avaliados. Verificou-se que a maior amplitude na redução (> 600%) dos valores dos IVs foi identificada com o ExGR (64 DAT) nas doses de 80 e 100% dos tratamentos.

As avaliações visuais do grau de fitotoxicidade provocada pelos herbicidas apresentaram alta interação com a resposta do IVs avaliados (Figura 9). Como pode ser observado na Figura 9, o ajuste à equação linear simples possibilitou a discriminação do efeito de fitotoxicidade causado pelo Dicamba em relação às formulações 2,4-D através dos seis IVs avaliados aos 8 e 16 DAT. Em contraste, os modelos não foram satisfatórios na distinção do efeito das formulações 2,4-D sal de dimetilamina e sal de colina entre si comparado com o mesmo período avaliado. Observou-se uma certa variabilidade no último cenário (64 DAT), o que era esperado, já que a avaliação quanto à fitotoxicidade foi realizada aos 56 DAT enquanto que os dados espectrais foram obtidos aos 64 DAT.

Os IVs que produziram maior desempenho no ajuste ao modelo linear para fitotoxicidade x IV em cada um dos tratamentos foi (da maior para a menor relação):  
i) nos tratamentos com Dicamba aos 8 DAT: MGRVI > MPRI > ExGR; aos 16 DAT:

MGRVI > MPRI > ExGR e aos 64 DAT: MGRVI > MPRI > CRI1; ii) nos tratamentos com 2,4-D sal de dimetilamina aos 8 DAT: MPRI > MGRVI > RGBVI; aos 16 DAT: MPRI > MGRVI > CRI1 e aos 64 DAT: ExG > RGBVI > MGRVI; iii) já nos tratamentos com 2,4-D sal de colina aos 8 DAT: MGRVI > MPRI > ExGR; aos 16 DAT: MPRI > MGRVI > RGBVI e aos 64 DAT: RGBVI > MPRI > MGRVI. Assim, fazendo uma análise geral destes resultados, observou-se que os índices MGRVI e MPRI apresentaram performances altamente semelhantes para a estimativa do grau de fitotoxicidade aos herbicidas avaliados.

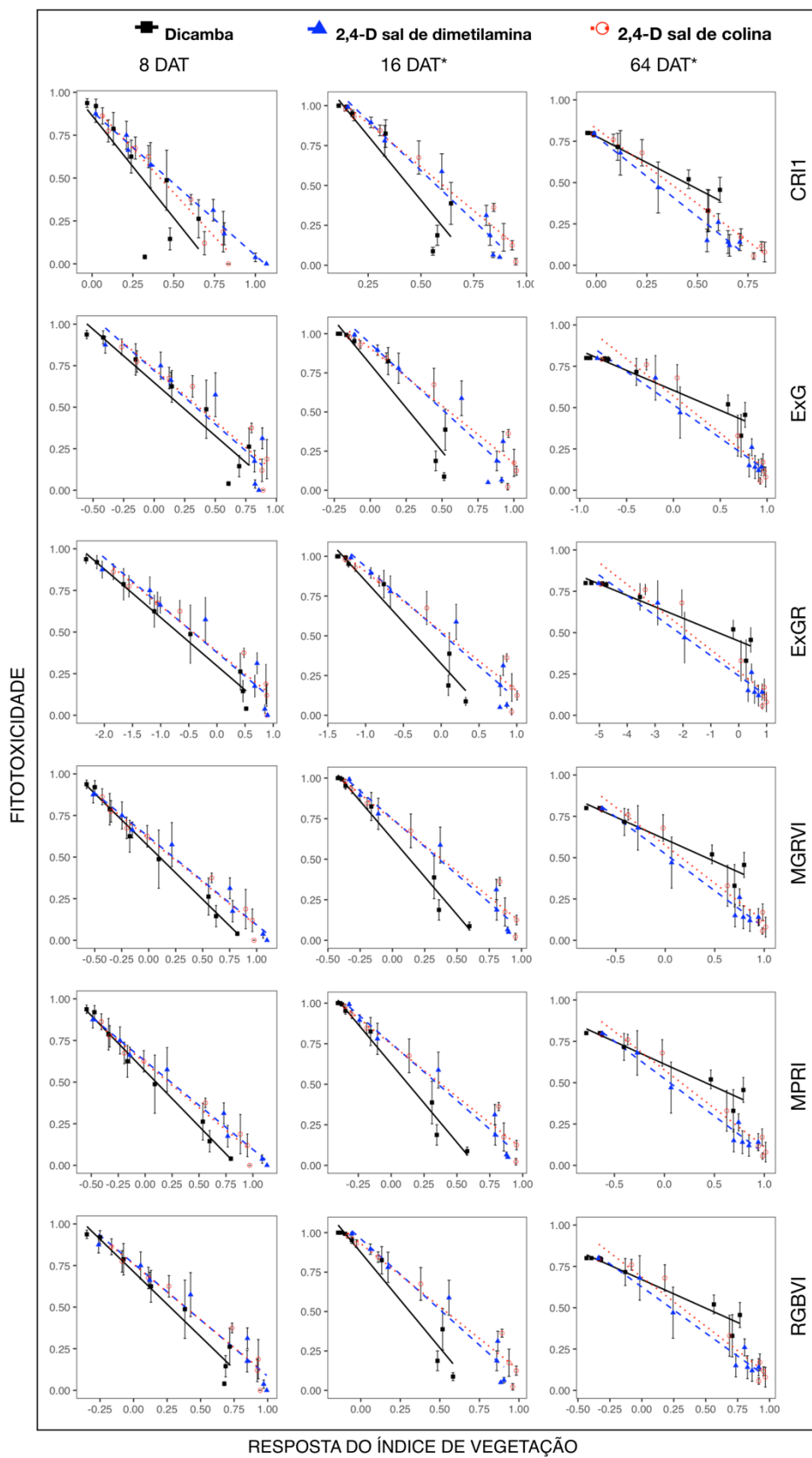


Figura 9. Relação entre o grau de fitotoxicidade e a resposta dos índices de vegetação causada por exposição aos respectivos herbicidas, ao longo dos DAT avaliados.

Tabela 3. Parâmetros derivados pelo modelo linear<sup>1</sup> para estimativa do grau de fitotoxicidade associado com as doses de deriva simulada dos respectivos herbicidas aos 8, 16 e 64 dias após o tratamento (DAT) a partir da aplicação dos respectivos Índices de Vegetação.

DAT	Índice de Vegetação	----- Dicamba -----				--- 2,4-D sal de dimetilamina ---				----- 2,4-D sal de colina -----			
		a	b	R <sup>2***</sup>	RMSE	a	b	R <sup>2***</sup>	RMSE	a	b	R <sup>2***</sup>	RMSE
8	CRI1	0.7787	-0.8906	0.4728	0.2443	0.8001	-0.6800	0.7799	0.1503	0.7682	-0.6814	0.5917	0.1980
	ExG	0.6438	-0.6179	0.8561	0.1276	0.7078	-0.6178	0.7944	0.145292	0.7171	-0.6007	0.8477	0.1210
	ExGR	0.3002	-0.2862	0.9374	0.0842	0.3781	-0.2774	0.8707	0.1152	0.3859	-0.2668	0.9000	0.0980
	MGRVI	0.5636	-0.6275	0.9477	0.0770	0.6174	-0.5189	0.9395	0.0788	0.6086	-0.5152	0.9297	0.0822
	MPRI	0.5665	-0.6543	0.9442	0.0795	0.6221	-0.5203	0.9432	0.0763	0.6118	-0.5265	0.9275	0.0834
	RGBVI	0.7057	-0.7505	0.8954	0.1088	0.7513	-0.6561	0.8977	0.1025	0.7453	-0.6404	0.8875	0.1040
16	CRI1	1.1604	-1.4520	0.7918	0.1691	1.1914	-1.2056	0.9196	0.1018	1.1292	-1.0378	0.9165	0.1058
	ExG	0.7989	-1.0554	0.8614	0.1380	0.9173	-0.8031	0.8500	0.1390	0.9021	-0.7248	0.9115	0.1090
	ExGR	0.3357	-0.5036	0.9208	0.1043	0.5166	-0.4038	0.8938	0.1170	0.5291	-0.3717	0.9274	0.0987
	MGRVI	0.6265	-0.8990	0.9349	0.0946	0.7408	-0.6673	0.9240	0.0989	0.7404	-0.6267	0.9427	0.0877
	MPRI	0.6281	-0.9337	0.9339	0.0953	0.7435	-0.6833	0.9246	0.0985	0.7438	-0.6380	0.9428	0.0876
	RGBVI	0.8652	-1.1511	0.8992	0.1177	0.9462	-0.8705	0.9125	0.1062	0.9251	-0.7909	0.9357	0.0929
64	CRI1	0.7726	-0.6023	0.8954	0.0597	0.7031	-0.7998	0.7582	0.1299	0.7397	-0.7347	0.7731	0.1446
	ExG	0.6061	-0.2314	0.8327	0.0755	0.4999	-0.3617	0.8423	0.1050	0.5560	-0.4167	0.8414	0.1209
	ExGR	0.4539	-0.0674	0.8559	0.0701	0.2508	-0.1079	0.8260	0.1102	0.2725	-0.1221	0.8317	0.1246
	MGRVI	0.6113	-0.2684	0.8976	0.0591	0.5031	-0.3967	0.8386	0.1062	0.5628	-0.4320	0.8837	0.1036
	MPRI	0.6123	-0.2730	0.8974	0.0591	0.5039	-0.4009	0.8358	0.1071	0.5649	-0.4363	0.8847	0.1031
	RGBVI	0.6700	-0.3430	0.8898	0.0613	0.5973	-0.5014	0.8418	0.1051	0.6694	-0.5637	0.8872	0.1020

<sup>1</sup>Equação linear do primeiro grau do tipo  $Y = a + bX$ . <sup>2</sup>Significância pelo teste 't' ao nível de: \*\*\*1%, \*\*5% e \*10% de probabilidade do resíduo.

Os modelos de regressão por ajuste linear demonstraram interações entre herbicidas, IVs e o efeito no rendimento de grãos da soja ao longo dos DAT avaliados (Tabela 4). Em geral, com exceção ao CRI1, os modelos de ajuste linear aos IVs indicaram entre boa ( $R^2 > 0,65$ ) e alta ( $R^2 > 0,94$ ) relação com o efeito dos herbicidas no rendimento de grãos da soja (Tabela 4). Nos tratamentos com Dicamba, o MGRVI foi o IV mais relacionado com o efeito do herbicida no rendimento de grãos da soja aos 8 DAT ( $R^2 = 0,8780$ ); 16 DAT ( $R^2 = 0,9341$ ) e 64 DAT ( $R^2 = 0,9467$ ) (Tabela 5).

Nos tratamentos com 2,4-D sal de dimetilamina essa relação alcançou maior performance com o RGBVI ( $R^2 = 0,9087$ ) aos 8 DAT, ExGR ( $R^2 = 0,8859$ ) aos 16 DAT e MGRVI ( $R^2 = 0,7540$ ) aos 64 DAT. Por sua vez, considerando os tratamentos com 2,4-D sal de colina, as maiores performances de ajuste ao modelo linear com o efeito do herbicida no rendimento de grãos da soja foram produzidas pelo ExG ( $R^2 = 0,8851$ ) aos 8 DAT, ExG ( $R^2 = 0,9061$ ) aos 16 DAT e MPRI ( $R^2 = 0,9020$ ) aos 64 DAT (Tabela4).

Analisando-se a Tabela 4 observou-se que, além dos IVs supracitados, vários outros IVs também indicaram ter muito boa relação ( $R^2 > 0,75$ ) com o efeito dos herbicidas no rendimento de grãos da soja ao longo dos DAT avaliados. Em ordem decrescente dessa relação, vale destacar, portanto, três IVs que produziram melhor performance em cada um dos tratamentos, alguns dos quais apresentado diferenças na casa dos decimais. Nos tratamentos com Dicamba os IVs com maior performance de ajuste ao modelo linear foram aos 8 DAT: MGRVI > MPRI > ExGR; aos 16 DAT: MGRVI > MPRI > ExGR e aos 64 DAT: MGRVI > MPRI > RGBVI. Nos tratamentos com 2,4-D sal de dimetilamina os IVs que produziram maior performance foram aos 8 DAT: RGBVI > ExG > ExGR; aos 16 DAT: ExGR > ExG > RGBVI e aos 64 DAT: MGRVI > MPRI > RGBVI. Já nos tratamentos com 2,4-D sal de colina, as melhores performances no ajuste ao modelo linear foram produzidas com os seguintes IVs: aos 8 DAT: ExG > ExGR > RGBVI; aos 16 DAT: ExG > ExGR > RGBVI e aos 64 DAT: MPRI > MGRVI > RGBV.

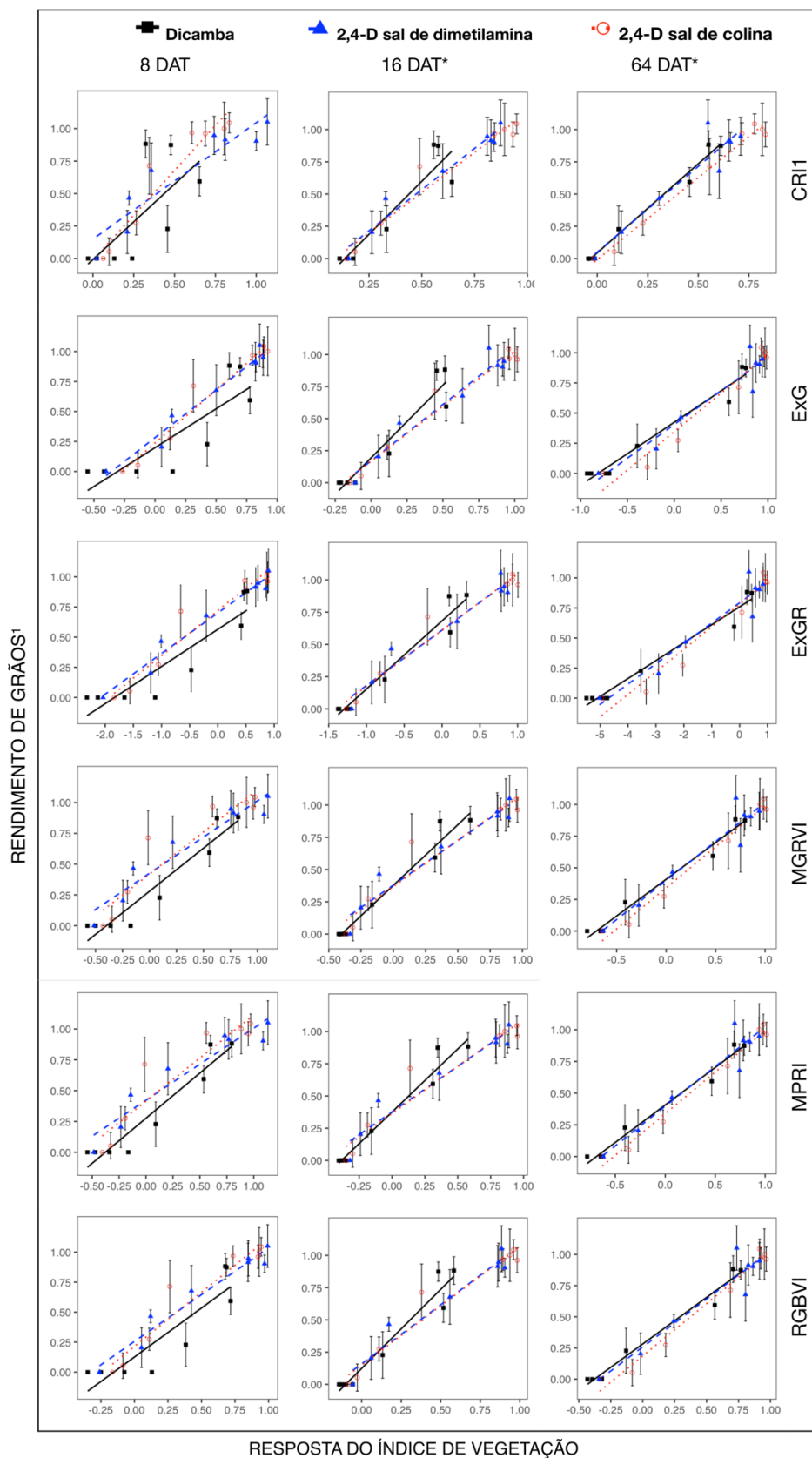


Figura 10. Relação entre rendimento de grãos da soja e a resposta dos índices de vegetação causada por exposição aos respectivos herbicidas, ao longo dos DAT avaliados. <sup>1</sup>Valores relativos ao Controle.



Tabela 4. Parâmetros derivados pelo modelo linear<sup>1</sup> para estimativa do rendimento de grãos da soja a partir dos respectivos Índices de Vegetação associados com o efeito da deriva dos respectivos herbicidas aos 8, 16 e 64 dias após o tratamento (DAT). Rendimento (relativo ao Controle) médio de 4.580,73 kg ha<sup>-1</sup>.

DAT	Índice de Vegetação	----- Dicamba -----				--- 2,4-D sal de dimetilamina ---				----- 2,4-D sal de colina -----			
		a	b	R <sup>2***</sup>	RMSE	a	b	R <sup>2***</sup>	RMSE	a	b	R <sup>2***</sup>	RMSE
8	CRI1	0.0815	0.8470	0.3331	0.3113	0.1989	0.8067	0.7769	0.1799	0.1686	0.9899	0.6412	0.2591
	ExG	0.2051	0.6120	0.6542	0.2242	0.2850	0.7841	0.9055	0.1171	0.2499	0.8566	0.8851	0.1466
	ExGR	0.5575	0.2987	0.7953	0.1725	0.7006	0.3357	0.9027	0.1188	0.7188	0.3671	0.8751	0.1529
	MGRVI	0.2808	0.6844	0.8780	0.1332	0.4246	0.5918	0.8648	0.1401	0.4216	0.6784	0.8278	0.1795
	MPRI	0.2776	0.7144	0.8766	0.1339	0.4209	0.5888	0.8553	0.1449	0.4181	0.6908	0.8201	0.1834
	RGBVI	0.1365	0.7739	0.7415	0.1938	0.2536	0.7847	0.9087	0.1151	0.2234	0.8830	0.8664	0.1581
16	CRI1	-0.1695	1.4832	0.7812	0.1783	-0.0718	1.2223	0.8394	0.1526	-0.0586	1.1576	0.8177	0.1847
	ExG	0.1984	1.0901	0.8690	0.1380	0.1768	0.8688	0.8832	0.1301	0.1706	0.8534	0.9061	0.1326
	ExGR	0.6758	0.5187	0.9237	0.1053	0.6110	0.4266	0.8859	0.1287	0.6100	0.4329	0.9022	0.1353
	MGRVI	0.3762	0.9242	0.9341	0.0978	0.3807	0.6881	0.8725	0.1360	0.3705	0.7116	0.8716	0.1550
	MPRI	0.3746	0.9599	0.9333	0.0985	0.3783	0.7034	0.8701	0.1372	0.3674	0.7223	0.8666	0.1580
	RGBVI	0.1309	1.1827	0.8975	0.1220	0.1632	0.9082	0.8820	0.1308	0.1571	0.9053	0.8790	0.1505
6	CRI1	0.0688	1.2602	0.9188	0.1086	0.1399	1.1291	0.7279	0.1987	0.0816	1.0932	0.8435	0.1711
	ExG	0.4201	0.4990	0.9078	0.1158	0.4405	0.4785	0.7098	0.2051	0.3687	0.5887	0.8275	0.1796
	ExGR	0.7482	0.1452	0.9320	0.0994	0.7723	0.1454	0.7227	0.2005	0.7715	0.1754	0.8465	0.1695
	MGRVI	0.4075	0.5693	0.9467	0.0880	0.4295	0.5420	0.7540	0.1889	0.3542	0.6213	0.9010	0.1361
	MPRI	0.4053	0.5788	0.9459	0.0887	0.4284	0.5476	0.7511	0.1900	0.3511	0.6275	0.9020	0.1354
	RGBVI	0.2828	0.7302	0.9455	0.0890	0.3033	0.6798	0.7453	0.1922	0.2022	0.8081	0.8988	0.1376

<sup>1</sup>Equação linear do primeiro grau do tipo  $Y = a + bX$ . <sup>2</sup>Significância pelo teste 't' ao nível de: \*\*\*1%, \*\*5% e \*10% de probabilidade do resíduo.

## 6. DISCUSSÕES

### 6.1. Dose-resposta aos herbicidas

A resposta da soja ao efeito de herbicidas, em geral, é função de diversos fatores, como o tipo de ingrediente ativo e demais constituintes (*e.g.* sal) presentes nas formulações dos mesmos, bem como pode ser influenciada pelas condições ambientais (*e.g.* temperatura, URA e umidade do solo). Ainda, a cultivar e o estágio de desenvolvimento das plantas também são fatores-chave (DALLA; ADALIN; MORAES, 2018; EGAN; BARLOW; MORTENSEN, 2014).

Tendo em vista a variabilidade desses fatores, em consonância com o que tem sido reportado por estudos recentes (DALLA; ADALIN; MORAES, 2018; FOSTER; GRIFFIN, 2018; ROBINSON; SIMPSON; JOHNSON, 2013), os resultados deste estudo apontaram para significativa susceptibilidade da soja aos tratamentos com Dicamba, inclusive a baixas doses (1 e 5%) deste herbicida. Em contraste, a soja indicou ser menos susceptível às formulações do 2,4-D (sais de dimetilamina e colina), com elevação no rendimento de grãos nas doses de 1 e 5%. Esse efeito no rendimento de grãos da soja pode ser explicado pelo fenômeno conhecido como hormesis (SOUTHAM; EHRLICH, 1943), em que herbicidas auxínicos a baixas doses tem sido frequentemente reportados como causadores de efeitos estimulantes nas lavouras (BELZ; DUKE, 2014; SCHABENBERGER *et al.*, 1999; SCHWADERER, 2017; VELINI *et al.*, 2010). No entanto, para que se possa afirmar com precisão, é pertinente que se realize uma análise sobre a ocorrência do fenômeno hormesis sustentado por modelos e testes estatísticos como sugerido por Kniss (2018) e Schabenberger *et al.* (1999).

### 6.2. Fitotoxicidade e relação com o rendimento de grãos

Ao longo dos anos, diversos estudos têm aplicado técnicas de dose-resposta buscando interpretar os efeitos de herbicidas auxínicos, como Dicamba e 2,4-D

(EGAN; BARLOW; MORTENSEN, 2014; EGAN; MORTENSEN, 2012; KNISS, 2018; ROBINSON *et al.*, 2013; SCHABENBERGER *et al.*, 1999), para entender a variabilidade e estimar o impacto destes herbicidas no rendimento de grãos da soja como uma função dos sintomas de fitotoxicidade. Apesar do caráter subjetivo, essa abordagem possibilita a estimativa do rendimento de grãos da soja a partir da sua relação com o grau de fitotoxicidade com certa precisão, mesmo que a dose do herbicida seja desconhecida (KNISS, 2018). Fato este que pode ser justificado pelos resultados apresentados neste estudo, em que, nas avaliações realizadas aos 8 DAT, observou-se alta relação entre o grau de fitotoxicidade com a variação na dose de deriva simulada do Dicamba e formulações 2,4-D ( $R^2 \geq 0,86$ ) e o impacto no rendimento de grãos ( $R^2 \geq 0,76$ ). Corroboram também com o exposto os respectivos estudos de dose-resposta com Dicamba (em soja resistente ao glifosato) (ROBINSON; SIMPSON; JOHNSON, 2013) e 2,4-D sal de dimetilamina (ROBINSON *et al.*, 2013), os quais indicaram altas relações ( $R^2 = 0,91$  e  $R^2$  de 0,95 a 0,99) entre perdas no rendimento de grãos versus grau de fitotoxicidade da soja.

No presente estudo, perdas no rendimento de grãos da soja versus aumento no grau de fitotoxicidade, nos DAT avaliados, foram concordantes com o aumento da dose nos tratamentos com o Dicamba. Por outro lado, nos tratamentos com 2,4-D essa resposta apresentou certa variação (acréscimo ou decréscimo), principalmente nas doses mais baixas das formulações avaliadas (Figuras 6 e 7). Este efeito pode estar relacionado com o estágio de desenvolvimento da soja (V6 no presente estudo) correspondente à aplicação dos tratamentos, pois algumas plantas expostas a herbicidas auxínicos no estágio vegetativo podem geralmente se recuperar de baixos a moderados sintomas de injúria (EGAN; BARLOW; MORTENSEN, 2014).

Em um estudo recente, Dalla *et al.* (2018) avaliando o efeito da deriva de Dicamba e 2,4-D em diferentes estádios da soja, reportaram que o grau de fitotoxicidade, aos 28 DAT e no estágio V5, foi intensificado progressivamente com o aumento das doses dos herbicidas. Verificou-se também que, a exemplo do presente estudo, o grau de fitotoxicidade foi superior nos tratamentos com Dicamba se comparado com aqueles submetidos aos tratamentos com 2,4-D (EGAN; BARLOW; MORTENSEN, 2014; FOSTER; GRIFFIN, 2018), nomeadamente nas doses entre baixas (1 e 5%) e moderadas (10 a 40%) (Figura 6).

Doses do Dicamba (1 e 5% aos 8 e 15 DAT) capazes de promover menos de 30% de sintomas de fitotoxicidade reduziram cerca de 2x mais o rendimento de grãos da soja, em contraste com o reportado no estudo (avaliando-se estádios vegetativos (V1 a V7)) de meta-análise realizado por Kniss (2018). O autor comenta que a divergência nos resultados da análise, que também diferem de Egan *et al.* (2014), pode estar relacionada a efeitos aleatórios, os quais não foram incluídos no agrupamento dos dados para explicar a variação nos parâmetros associados a cada estudo. Além disso, os efeitos iniciais e persistentes de injúria na redução do rendimento de grãos dependem da ocorrência de pluviosidade ou irrigação durante a estação de crescimento e a efetividade no manejo integrado, como controle de insetos-praga e plantas daninhas, capazes de maximizar o potencial produtivo da lavoura (FOSTER; GRIFFIN, 2018).

Segundo Robinson *et al.* (2013), os sintomas de fitotoxicidade produzidos por deposição em tanques de aplicação e/ou deriva do Dicamba em cultivo de soja podem facilmente ser detectados dada a susceptibilidade da cultura ao herbicida. Corroborando com o autor, a variação na taxa necessária para causar 20% de fitotoxicidade na soja (aos 15 DAT) foi cerca de 2x superior àquela necessária para produzir 10% dos sintomas (Figura 6). Nessas condições, o rendimento de grãos da soja do presente estudo foi reduzido em até 13% em relação ao Controle (Figura 7). Em contraste com o supracitado, as doses necessárias para produzir uma variação correspondente foram 2 ou 5x superiores nos tratamentos com 2,4-D sal de dimetilamina e sal de colina, reduzindo em até 10 e 4% o rendimento de grãos, respectivamente. Além da menor susceptibilidade da soja a variações na dose do 2,4-D, outra contribuição para estes resultados consiste no fato de que, os sintomas de fitotoxicidade produzidos por 2,4-D podem ser sutis, portanto, de difícil detecção em situações de ocorrência de deriva no campo. Isso é devido principalmente ao fato de não existir um teste disponível que permita a comparação entre plantas afetadas e plantas saudas (ROBINSON *et al.*, 2013). Nessas situações ainda, a ligeira curvatura das folhas ou pecíolos, que é uma característica da sintomatologia do 2,4-D na soja, pode ter sido causada pela natureza heliotrópica da própria planta ou pode ter sido confundida como sendo uma resposta a outra tensão biótica ou abiótica (ROBINSON *et al.*, 2013).

Os procedimentos de avaliação e análise da fitotoxicidade (SBCPD, 1995) adotados neste estudo, apesar da subjetividade, por demandarem experiência e certa sensibilidade do avaliador, demonstraram ser favoráveis para o estudo do efeito dos herbicidas no rendimento de grãos da soja para os diferentes tratamentos e DAT avaliados. A exemplo do reportado por McCown *et al.* (2018), verificou-se significativa interação entre o tempo decorrido entre exposição e a avaliação do efeito dos tratamentos e as doses do Dicamba, o qual resultou em fitotoxicidade e diminuição no rendimento de grãos já aos 8 DAT.

Com exceção aos tratamentos com Dicamba e 2,4-D sal de dimetilamina aos 15 DAT, o valor do coeficiente angular dos modelos lineares ajustados ao grau de fitotoxicidade para estimativa do rendimento de grãos da soja foram acima da unidade (Figura 7). Isso sugere que os modelos tenderão a superestimar o rendimento de grãos da soja e que, no caso de exposição ao 2,4-D, plantas expostas no estágio vegetativo podem geralmente retomar seu crescimento de baixos a moderados sintomas de injúria (EGAN; BARLOW; MORTENSEN, 2014).

### 6.3. Índices de Vegetação, fitotoxicidade e rendimento de grãos

Como os herbicidas auxínicos podem interferir no funcionamento do sistema de pigmentos das plantas (HUANG *et al.*, 2016), quaisquer alterações na composição e concentração destes componentes podem causar variações na sua resposta espectral - função da interação com a radiação eletromagnética. Neste sentido, diversas ferramentas de SR foram desenvolvidas para usos específicos em agricultura de precisão para entender as variações bioquímicas e fisiológicas nas lavouras de soja sob várias condições de estresse, tais como efeitos de tratamento de doenças e herbicidas (CASTELAO TETILA *et al.*, 2017; CUI *et al.*, 2010; HUANG *et al.*, 2016; MEROTTO JR. *et al.*, 2012; SHRIVASTAVA; SINGH; HOODA, 2015). No entanto, essa especificidade pode dificultar a implementação da agricultura de precisão, devido ao aumento dos custos e da complexidade operacional (MEROTTO JR. *et al.*, 2012). Nesse sentido, o uso de dados espectrais obtidos por sensor RGB de baixo custo embarcado em VANT pode ser favorável na avaliação do efeito da deriva simulada de

herbicidas auxínicos em cultivo de soja, como indicaram os resultados deste estudo.

Cinco dos seis IVs (ExG, ExGR, MGRVI, MPRI e RGBVI) derivados do sensor RGB foram significativamente correlacionados com a fitotoxicidade causada pelo Dicamba; 2,4-D sal de dimetilamina e 2,4-D sal de colina e o efeito no rendimento de grãos da soja (Tabelas 3 e 4). A baixa performance do CRI1 era esperada principalmente nos tratamentos com Dicamba que, devido ao aumento da influência dos componentes estruturais da planta (*e.g.* galhos) e componentes de fundo nas imagens (*e.g.* solo e sombra), foi o herbicida que indicou maiores sintomas de fitointoxicação, acelerando o processo de senescência foliar da planta (CHRISTOFFOLETI, 2008). Dessa maneira, como o CRI1 foi desenvolvido para se avaliar o conteúdo de carotenoides na planta, este IV não poderia produzir boas performances diante da presença desses atributos nas imagens. Além disso, imagens de alta resolução possuem geralmente uma quantidade significativa de pixels de sombra nas bordas do dossel e ainda podem provocar a mistura de pixels de plantas e solo contidos no interior das parcelas (Figura1) (YUN *et al.*, 2016). Assim, tais problemas podem diminuir a precisão dos índices de vegetação RGB para detectar diferenças sutis de mudanças no conteúdo de pigmentos das plantas.

Como demonstrado pelos resultados deste estudo, a resposta do ExGR demonstrou alta variabilidade em função das diferentes doses de deriva simulada por herbicida (Figura 8). Isso significa dizer que, o ExGR poderia fornecer informações úteis sobre como o status dos dosséis das lavouras de soja variam ao longo do tempo sob diferentes condições de cultivo, como sintomas causados pela deriva de herbicidas auxínicos. Assim, o ExGR pode ser útil na identificação de mudanças na fração de vegetação nos campos de soja (YUN *et al.*, 2016). Na Figura 8, também foi observada uma alta redução do ExGR nas altas doses dos herbicidas, indicando que altas doses de deriva simulada dos herbicidas auxínicos provocaram diminuição na fração vegetal dos tratamentos em relação ao Controle, pois o herbicida suprimiu o crescimento total da soja (YUN *et al.*, 2016), incluindo outras plantas.

Embora os sintomas foliares possam parecer graves, a perda de rendimento pode ser mínima quando apenas as folhas e os pecíolos estão malformados (ZHENG *et al.*, 2017), que pode estar relacionado com o efeito dos tratamentos a baixas doses com 2,4-D. Em contraste, a maior perda de rendimento provavelmente estaria

associada a uma redução no número de nós, o que limita a formação de outras estruturas reprodutivas. Isso ocorre, principalmente, quando o Dicamba provoca inibição do crescimento do meristema apical ou morte do meristema apical (ROBINSON; SIMPSON; JOHNSON, 2013).

Em doses não letais; o 2,4-D pode causar um aumento no ácido abscísico (que tem função hormonal), o que poderia limitar ou prejudicar o crescimento da planta nos drenos ativos de crescimento. Isso pode ocorrer por um período de tempo até que a planta possa superar os efeitos desse hormônio e continuar o crescimento normal (ROBINSON *et al.*, 2013). Em geral, os sintomas de fitotoxicidade nas plantas mais jovens são caracterizados pela desorganização das células do mesófilo, como alterações na forma, aumento do volume celular, redução no número de organelas e distúrbios da parede celular, que não ocorrem em plantas mais velhas e sob condições de estresse provocado por herbicidas (DALLA; ADALIN; MORAES, 2018; PAZMIÑO *et al.*, 2011). Essas constatações podem explicar o aumento nos valores do CRI1, MGRVI e MPRI nos tratamentos com 2,4-D sal de dimetilamina, e a resposta do ExG, ExGR, MGRVI e MPRI com 2,4-D sal de colina nas baixas doses de deriva simulada destes herbicidas. Baseando-se nas constatações de Robinson *et al.* (2013), devido à capacidade de recuperação das plantas mesmo sob sintomas de injúria provocada por baixas concentrações de 2,4-D, as taxas de empilhamento, alterações na cor e enrugamento da parte aérea do dossel da soja, seguidas de clorose terminal nas fases vegetativas podem ter impactado na variabilidade do rendimento de grãos.

A nível de campo, a deposição por deriva ou volatilização de Dicamba provoca alto grau de fitotoxicidade nas plantas mesmo em baixas doses. Entretanto, segundo Robinson *et al.* (2013) os sintomas gradualmente diminuem quanto mais longe da fonte de aplicação do herbicida. Fato este que concorda com os resultados obtidos a partir da deriva simulada do Dicamba neste estudo, com o aumento na dose resultando em maior grau de injúria. Como verificado ainda, a variabilidade na resposta da soja com relação à variação das doses do herbicida foi proporcional ao efeito no rendimento de grãos e, por conseguinte, foi proporcional à redução no valor da maioria dos IVs avaliados.

O índice MPRI foi concebido dada a razão entre os comprimentos de onda do Verde (~ 550 nm) e Vermelho (~ 660 nm). Visto que o MPRI foi desenvolvido com

base em uma modificação do PRI (*photochemical reflectance index*) (GARBUSKY *et al.*, 2011), esse IV é capaz de refletir a eficiência da atividade fotossintetizante da planta dada a sua sensibilidade a alterações no ciclo das xantofilas (GAMON *et al.*, 1992; PALAIOLOGOU *et al.*, 2013). Enquanto o PRI estabelece uma relação da refletância em ambos os lados do espectro do Verde (~ 550 nm), o MPRI compara a refletância do espectro do Verde (absorção de xantofila) com a refletância do Vermelho (somente absorção de clorofila). Consequentemente, ele pode servir como um índice para se avaliar os níveis relativos de clorofila/xantofila (HUANG *et al.*, 2016).

Neste estudo, o MPRI indicou ser favorável na obtenção de informações sobre a refletância do dossel sob os diferentes tratamentos com Dicamba e as formulações 2,4-D. Uma vez que o MPRI do solo assumiu valores positivos e o MPRI do dossel valores negativos, isso favoreceu o contraste entre as informações sobre o solo e os sintomas de injúria da soja. Resultados de Li, Li e Sun (2014) indicaram que o MPRI também foi satisfatório na estimativa do conteúdo de clorofila na cultura do milho. A relação do modelo de previsão com o MPRI ( $R^2 = 0,72$ ) foi 3x superior comparativamente ao modelo derivado a partir do NDVI ( $R^2 = 0,24$ ), apontando para uma maior relação do MPRI com a dinâmica dos pigmentos fotossintetizantes da planta. Dessa maneira, o MPRI pode funcionar como uma alternativa à mensuração da variabilidade espectral da soja, bem como, servindo como parâmetro de entrada em modelos para se estimar o grau de fitotoxicidade e o efeito no rendimento de grãos de soja sob condições de deriva de herbicidas auxínicos.

Salvo os resultados comentados, o uso de índices RGB impõe algumas limitações. Os índices RGB estão diretamente relacionados à cor natural (verdadeira) das imagens, que pode incluir pigmentos vegetais, mas também todas as outras superfícies visíveis, como solo e vegetação fotossinteticamente inativa (CASADESÚS; VILLEGAS, 2014). Em dosséis razoavelmente fechados como das lavouras de soja, especialmente no final da estação e apresentando baixo grau de sintomas de injúria, o solo pode ser apenas um componente mínimo. No entanto, as grandes quantidades de solo exposto presentes nas imagens da soja lesionada e apresentando alto grau de injúria, como nas doses entre moderadas e altas dos herbicidas auxínicos neste estudo, esses índices RGB funcionaram mais como indicadores de porcentagem de cobertura vegetal que de vigor da vegetação



propriamente dito. Por outro lado, o alto desempenho do índice ExG, foi devido, principalmente, ao fato deste IV suavizar as informações de fundo (*e.g.* solo e sombra) (ZHENG *et al.*, 2017), enquanto que as informações do dossel da soja foram preservadas. Assim sendo, o índice ExG realçou apenas a quantidade relativa de vegetação idealmente saudável e fotossinteticamente ativa.

A detecção de sintomas de injúria em imagens em composição natural ou RGB (espectro do visível) pode ser bastante dificultada devido aos componentes de fundo, diferentes condições de iluminação, clima, regiões sombreadas e alvos que apresentam cores semelhantes (ZHENG *et al.*, 2017). Neste estudo, outro desafio foi que, a variação espectral da soja nos tratamentos com 2,4-D (sal de dimetilamina e sal de colina) foi pouco distinta, impossibilitando a diferenciação dos sintomas de injúria entre um ou outro herbicida apenas quando se variou o sal nas formulações deste herbicida.

Índices de vegetação RGB podem ser empregados como uma alternativa de manejo específico para se avaliar o efeito da deriva de Dicamba e 2,4-D, visando salvaguardar o desempenho da produtividade em lavouras de soja susceptível. Os IVs aplicados nas imagens adquiridas com o sensor RGB (câmera digital de baixo custo) embarcado em VANT, com destaque para o MPRI e MGRVI, produziram performances semelhantes às avaliações de fitotoxicidade realizadas visualmente para a estimativa do rendimento de grãos da soja, sob condições de deriva simulada do Dicamba e formulações 2,4-D. Além da acessibilidade e maior flexibilidade na aquisição dos dados possibilitada pelo sistema VANT, a metodologia utilizada pode funcionar como uma ferramenta de alto desempenho para se monitorar a deriva de herbicidas. Ainda, pode auxiliar na estimativa do dano provocado em culturas susceptíveis, bem como o impacto na produtividade dos cultivos acometidos por deriva de herbicidas. Além disso, programas de monitoramento de deriva de herbicidas pode se beneficiar dessas descobertas.

A integração de metodologias de SR baseadas índices derivados de sensores de baixo custo podem acelerar o desenvolvimento de novos equipamentos, proporcionando a integração com outras técnicas baseadas em fatores bióticos e abióticos que ameaçam a segurança alimentar em países desenvolvidos e em desenvolvimento. Sugere-se a comparação da resposta dos IVs ao efeito dos

herbicidas perante condições de estresse impostas por variações climáticas e deficiências nutricionais. Assim sendo, apesar de algumas limitações dos índices de vegetação RGB, que são impostas pela fenologia da cultura e componentes de fundo do dossel, pode ser aconselhado seu uso para avaliação dos efeitos da deriva de herbicidas auxínicos em soja sensível.

## 7. CONCLUSÕES

As perdas significativas no rendimento de grãos da soja e o grau de injúria seguiram os níveis de exposição, de forma gradativa, das doses baixas para as doses mais elevadas de deriva simulada nos tratamentos com Dicamba.

Exposição a baixas doses de 2,4-D sal de dimetilamina ou sal de colina indicaram um discreto aumento no rendimento de grãos da soja, que pode ter sido um indicativo do fenômeno *hormesis*. Em contraste, doses de moderadas a altas destes herbicidas resultaram em perdas no rendimento de grãos da soja entre moderadas a altas, considerando que se variou apenas o sal (sal de dimetilamina ou sal de colina) nas suas formulações, porém mantendo-se o mesmo ingrediente ativo.

Os índices MGRVI e MPRI apresentaram performances semelhantes às avaliações de fitotoxicidade realizadas visualmente para a estimativa do impacto causados pelos herbicidas no rendimento de grãos da soja.

A aplicação de regressão linear simples nos resultados dos IVs possibilitou a separação entre o efeito de fitotoxicidade causados por Dicamba e 2,4-D, nas avaliações realizadas aos 8 e 15/16 DAT. No entanto, os índices avaliados não foram favoráveis na discriminação da fitotoxicidade entre formulações 2,4-D sal de dimetilamina e sal de colina.

A metodologia de análise baseada na aritmética de dados espectrais – nomeadamente o uso de índices de vegetação aplicados em imagens obtidas por um sensor RGB de baixo custo embarcado em VANT – forneceu uma maneira simples e direta de detecção de sintomas de injúria na cultura da soja. Além disso, foi altamente relacionada com as perdas em rendimento de grãos produzidas pelas doses de deriva simulada do Dicamba e formulações 2,4-D. Ao mesmo tempo, o uso de índices de vegetação derivados de sensores embarcados em VANT é uma técnica simples, que pode ser facilmente replicada, pois permite repetidas e alta frequência de observações.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Modelagem Ricardo Norberto Ayup Zouain - LabModel pela concessão da infraestrutura, equipamentos e estação de trabalho para a manipulação e processamento dos dados. Agradecem também ao Programa de Nucleação de Grupos de Pesquisa através do financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), edital 04/2016 – Consórcio UERGS/UFRGS/UFSM, pela disponibilização de todos os equipamento e suporte técnico na aquisição dos dados espectrais. Os autores agradecem imenso, ainda, a todos os estudantes, pesquisadores e técnicos do Grupo Universitário de Investigação em Herbologia (GUIVE), os quais despenderam muito tempo e trabalho na execução deste estudo. O presente estudo foi financiado, em partes, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

## Referências

- AASEN, H.; BOLTEN, A. Multi-temporal high-resolution imaging spectroscopy with hyperspectral 2D imagers – From theory to application. **Remote Sensing of Environment**, v. 205, n. October 2017, p. 374–389, 2018.
- ADÃO, T. et al. Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. **Remote Sensing**, v. 9, n. 11, p. 1–30, 2017.
- AMARAL, L. R. DO; MOLIN, J. P. Sensor optico no auxilio da recomendacao de adubacao nitrogenada em cana-de-acucar. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 46, n. 12, p. 1633–1642, 2011.
- ANDERSEN, S. M. et al. Soybean foliage residues of dicamba and 2,4-D and correlation to application rates and yield. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 3, p. 750–760, 2004.
- BAKER, N. R. Chlorophyll Fluorescence: A Probe of Photosynthesis In Vivo. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, n. 1, p. 89–113, 2008.
- BALLESTEROS, R. et al. Combined use of agro-climatic and very high-resolution remote sensing information for crop monitoring. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 72, n. May, p. 66–75, out. 2018.
- BAOFENG, S. et al. Digital surface model applied to unmanned aerial vehicle based photogrammetry to assess potential biotic or abiotic effects on grapevine canopies. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 9, n. 6, p. 119–130, 2016.
- BARETH, G. et al. COMPARISON OF UNCALIBRATED RGBVI WITH SPECTROMETER-BASED NDVI DERIVED FROM UAV SENSING SYSTEMS ON FIELD SCALE. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLI-B8, n. 8, p. 837–843, 23 jun. 2016.
- BEHRENS, M. R. et al. Dicamba resistance: Enlarging and preserving biotechnology-based weed management strategies. **Science**, v. 316, n. 5828, p. 1185–1188, 2007.
- BELZ, R. G.; DUKE, S. O. Herbicides and plant hormesis. **Pest Management Science**, v. 70, n. 5, p. 698–707, 2014.
- BENDIG, J. et al. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 39, p. 79–87, 2015.

- BENEDUZZI, H. M. et al. Temporal variability in active reflectance sensor-measured NDVI in soybean and wheat crops. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering (Engenharia Agricola)**, v. 37, n. 4, p. 771–781, 2017.
- BRIGHT, L. Z. et al. Analytical models integrated with satellite images for optimized pest management. *Precision Agriculture*, v. 17, n. 5, p. 628–636, 2016.
- CAMPBELL, J. B.; WYNNE, R. H. **Introduction to Remote Sensing, Fifth Edition**. 5. ed. New York: The Guilford Press, 2011.
- CARLSEN, S. C. K.; SPLIID, N. H.; SVENSMARK, B. Drift of 10 herbicides after tractor spray application. 2. Primary drift (droplet drift). **Chemosphere**, v. 64, n. 5, p. 778–786, 2006.
- CARTER, G. A.; KNAPP, A. K. LEAF OPTICAL PROPERTIES IN HIGHER PLANTS: LINKING SPECTRAL CHARACTERISTICS TO STRESS AND CHLOROPHYLL CONCENTRATION. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 88, n. 4, p. 677–684, 2001.
- CASADESÚS, J.; VILLEGAS, D. Conventional digital cameras as a tool for assessing leaf area index and biomass for cereal breeding. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 56, n. 1, p. 7–14, jan. 2014.
- CASTELAO TETILA, E. et al. Identification of Soybean Foliar Diseases Using Unmanned Aerial Vehicle Images. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 14, n. 12, p. 2190–2194, 2017.
- CÉLERES. Levantamento de adoção da biotecnologia agrícola no Brasil. Disponível em: <http://www.celeres.com.br/1o-levantamento-de-adocao-da-biotecnologia-agricola-no-brasil-safra-201617/> Acesso em: 18 out. 2018.
- CEREZINI, P. et al. Strategies to promote early nodulation in soybean under drought. **Field Crops Research**, v. 196, p. 160–167, 2016.
- CHRISTOFFOLETI, P. J. **Aspectos de Resistência de Plantas Daninhas a Herbicidas**. 3. ed. Piracicaba: Associação Brasileira de Ação à Resistência de Plantas aos Herbicidas (HRAC-BR), 2008.
- CHRISTOFFOLETI, P. J. et al. Auxinic herbicides, mechanisms of action, and weed resistance: A look into recent plant science advances. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 4, p. 356–362, 2015.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da Safra Brasileira: grãos. (SAFRA 2016/17)*. Brasília: [s.n.], 2017. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da Safra Brasileira: grãos. V. 5 - SAFRA 2017/18- N. 12*. Brasília: [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>.

- CRUSIOL, L. G. T. et al. NDVI variation according to the time of measurement, sampling size, positioning of sensor and water regime in different soybean cultivars. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 4, p. 470–490, 2017.
- CUI, D. et al. Image processing methods for quantitatively detecting soybean rust from multispectral images. **Biosystems Engineering**, v. 107, n. 3, p. 186–193, 2010.
- DALLA, E.; ADALIN, S.; MORAES, C. Drift of 2, 4-D and dicamba applied to soybean at vegetative and reproductive growth stage. **Ciência Rural**, v. 48, n. 8, p. 1–7, 2018.
- DAN, H. A. et al. Residual activity of herbicides used in soybean agriculture on grain sorghum crop succession. **Planta Daninha**, v. 28, n. spe, p. 1087–1095, 2010.
- EGAN, J. F.; BARLOW, K. M.; MORTENSEN, D. A. A Meta-Analysis on the Effects of 2,4-D and Dicamba Drift on Soybean and Cotton. **Weed Science**, v. 62, n. 1, p. 193–206, 2014.
- EGAN, J. F.; MORTENSEN, D. A. Quantifying vapor drift of dicamba herbicides applied to soybean. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 31, n. 5, p. 1023–1031, 2012.
- FONTANA, D. C. et al. Using temporal NDVI/MODIS profiles for inferences on the crop soybean calendar. **Bragantia**, v. 74, n. 3, p. 350–358, 2015.
- FOSTER, M. R.; GRIFFIN, J. L. Injury Criteria Associated with Soybean Exposure to Dicamba. **Weed Technology**, v. 32, n. 5, p. 608–617, 2018.
- GAMON, J. A.; PEÑUELAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, v. 41, n. 1, p. 35–44, jul. 1992.
- GARBULSKY, M. F. et al. The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies. A review and meta-analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 2, p. 281–297, 2011.
- GITELSON, A. A. et al. Assessing Carotenoid Content in Plant Leaves with Reflectance Spectroscopy. **Photochemistry and Photobiology**, v. 75, n. 3, p. 272, 2002.
- GRIFFIN, J. L. et al. Soybean Response to Dicamba Applied at Vegetative and Reproductive Growth Stages. **Weed Technology**, v. 27, n. 04, p. 696–703, 2013.
- GROFF, E. C. et al. Características agronômicas associadas com índices de vegetação medidos por sensores ativos de dossel na cultura da soja. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 2, p. 517–526, 2013.

- HAGHIGHATTALAB, A. et al. Application of unmanned aerial systems for high throughput phenotyping of large wheat breeding nurseries. **Plant Methods**, v. 12, n. 1, p. 1–15, 2016.
- HARDIN, P. J.; JENSEN, R. R. Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles in Environmental Remote Sensing: Challenges and Opportunities. **GIScience & Remote Sensing**, v. 48, n. 1, p. 99–111, 2011.
- HATFIELD, J. L. et al. Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. **Agronomy Journal**, v. 100, n. Supplement\_3, p. S-117, 2008.
- HEAP. International survey of herbicide resistant weeds. Disponível em: <<http://www.weedscience.org>>. Acesso em: 14 fev. 2018.
- HENRY, W. B. et al. Remote Sensing to Detect Herbicide Drift on Crops. **Weed Technology**, v. 18, n. 02, p. 358–368, 2004.
- HUANG, Y. et al. Assessment of soybean injury from glyphosate using airborne multispectral remote sensing. **Pest Management Science**, v. 71, n. 4, p. 545–552, 2015.
- HUANG, Y. et al. In-situ plant hyperspectral sensing for early detection of soybean injury from dicamba. **Biosystems Engineering**, v. 149, p. 51–59, 2016.
- HUANG, Y.; THOMSON, S. J. Airborne multispectral and thermal remote sensing for detecting the onset of crop stress caused by multiple factors. **Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XII**, v. 7824, p. 78240E, 2010.
- HUETE, A. R.; HUIQING LIU; VAN LEEUWEN, W. J. D. The use of vegetation indices in forested regions: issues of linearity and saturation. 1997, Singapore: IEEE, 1997. p. 1966–1968.
- HUNT, E. R.; DAUGHTRY, C. S. T. What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 15–16, p. 5345–5376, 18 ago. 2018.
- ISAAA. Report on global status of Biotech/GM crops. Disponível em: <<http://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/51/pptslides/default.asp>>. Acesso em: 18 out. 2018.
- JANNOURA, R. et al. Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter. **Biosystems Engineering**, v. 129, p. 341–351, 2015.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em Recursos Terrestres**. 1. ed. [S.l.]: Parentese, 2009.
- KNISS, A. R. Soybean Response to Dicamba: A Meta-Analysis. **Weed Technology**, v. 32, n. 5, p. 507–512, 2018.



- KUIAWSKI, A. C. M. B. et al. Vegetation indexes and delineation of management zones for soybean. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 2, p. 168–177, 2017.
- LI, S.; LI, M.; SUN, H. A novel vegetation index (MPRI) of corn canopy by vehicle-borne dynamic prediction. **Guang pu xue yu guang pu fen xi = Guang pu**, v. 34, n. 6, p. 1605–1609, jun. 2014.
- LÓPEZ-GRANADOS, F. et al. Object-based early monitoring of a grass weed in a grass crop using high resolution UAV imagery. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, n. 4, p. 1–12, 2016.
- MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Disponível em: <<http://indicadores.agricultura.gov.br/agrofit/index.htm>>. Acesso em: 03 mar. 2019.
- MCCOWN, S.; BARBER, T.; NORSWORTHY, J. K. Response of Non–Dicamba-Resistant Soybean to Dicamba As Influenced by Growth Stage and Herbicide Rate. **Weed Technology**, v. 32, n. 5, p. 513–519, 2018.
- MENESES, P. R. et al. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UnB/CNPq, 2012.
- MEROTTO JR., A. et al. Reflectance indices as a diagnostic tool for weed control performed by multipurpose equipment in precision agriculture. **Planta Daninha**, v. 30, n. 2, p. 437–447, 2012.
- MEYER, G. E.; NETO, J. C. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 63, n. 2, p. 282–293, 2008.
- MILLER, J. J. et al. Characterizing soybean vigor and productivity using multiple crop canopy sensor readings. **Field Crops Research**, v. 216, n. June 2017, p. 22–31, 2018.
- MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2001. 83p.
- MONQUERO, P.A. Plantas transgênicas resistentes aos herbicidas: situação e perspectivas. **Bragantia**, v.64, n.4, p.517-531, 2005.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2 ed. São José dos Campos: UFV, 2004. 250p.
- MUELLER, T. C.; WRIGHT, D. R.; REMUND, K. M. Effect of Formulation and Application Time of Day on Detecting Dicamba in the Air under Field Conditions. **Weed Science**, v. 61, n. 04, p. 586–593, 2013.
- NOVO, E. M. L. D. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

- OLIVEIRA JR., R. S. Mecanismos de Ação de Herbicidas. In: OLIVEIRA JR., R. S. DE; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. (Org.). **Biologia e Manejo de Plantas Daninhas**. 1. ed. Curitiba (PR): Omnipax, 2011. p. 141–192.
- OLIVEIRA, T. C. DE; FERREIRA, E.; DANTAS, A. A. A. Temporal variation of normalized difference vegetation index (NDVI) and calculation of the crop coefficient (Kc ) from NDVI in areas cultivated with irrigated soybean. **Ciência Rural**, v. 46, n. 9, p. 1683–1688, 2016.
- ORTIZ, B. V. et al. Determination of differences in crop injury from aerial application of glyphosate using vegetation indices. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 77, n. 2, p. 204–213, 2011.
- PALAIOLOGOU, P.; KALABOKIDIS, K.; KYRIAKIDIS, P. Forest mapping by geoinformatics for landscape fire behaviour modelling in coastal forests, Greece. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 12, p. 4466–4490, 2013.
- PAZMIÑO, D. M. et al. Differential response of young and adult leaves to herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid in pea plants: role of reactive oxygen species. **Plant, Cell & Environment**, v. 34, n. 11, p. 1874–1889, nov. 2011.
- PETERSON, M. A. et al. 2,4-D Past, Present, and Future: A Review. **Weed Technology**, v. 30, n. 02, p. 303–345, 2016.
- PONZONI, F. J.; DISPERATI, A. A. **Comportamento espectral da vegetação**. São José dos Campos: INPE, 1995. 37p. (INPE-5619 – PUD/065).
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. 2. ed. [S.l.]: Oficina de Textos, 2012.
- RIBEIRO-GOMES, K. et al. Uncooled Thermal Camera Calibration and Optimization of the Photogrammetry Process for UAV Applications in Agriculture. **Sensors**, v. 17, n. 10, p. 2173, 23 set. 2017.
- RIGON, J. P. G. et al. A novel method for the estimation of soybean chlorophyll content using a smartphone and image analysis. **Photosynthetica**, v. 54, n. 4, p. 559–566, 2016.
- ROBINSON, A. P. et al. Response of Soybean Yield Components to 2,4-D. **Weed Science**, v. 61, n. 01, p. 68–76, 2013.
- ROBINSON, A. P.; SIMPSON, D. M.; JOHNSON, W. G. Response of Glyphosate-Tolerant Soybean Yield Components to Dicamba Exposure. **Weed Science**, v. 61, n. 04, p. 526–536, 2013.
- SANKARAN, S. et al. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. **European Journal of Agronomy**, v. 70, p. 112–123, 2015.
- SCHABENBERGER, O. et al. Statistical tests for hormesis and effective dosages in herbicide dose response. **Agronomy Journal**, v. 91, n. 4, p. 713–721, 1999.

- SCHWADERER, J. Minecrafting Archaeology: An Experimental Pedagogy for an Eighteenth-Century French Trading Post in Niles, Michigan. **Journal of Applied Toxicology**, v. 20, p. 157–163, 2017.
- SCHWARTZ-LAZARO, L. M. et al. Comparison of Simulated Drift Rates of Common ALS-Inhibiting Rice Herbicides to Florpyrauxifen-Benzyl on Soybean. **International Journal of Agronomy**, v. 2017, p. 1–5, 2017.
- SHANAHAN, J. F. et al. Responsive in-season nitrogen management for cereals. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 61, n. 1, p. 51–62, 2008.
- SHANER, D. L.; LINDENMEYER, R. B.; OSTLIE, M. H. What have the mechanisms of resistance to glyphosate taught us? **Pest Management Science**, v. 68, n. 1, p. 3–9, jan. 2012.
- SHRIVASTAVA, S.; SINGH, S. K.; HOODA, D. S. Color sensing and image processing-based automatic soybean plant foliar disease severity detection and estimation. **Multimedia Tools and Applications**, v. 74, n. 24, p. 11467–11484, 2015.
- SLATON, M. R.; HUNT, E. R.; SMITH, W. K. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. **American Journal of Botany**, v. 88, n. 2, p. 278–284, 2001.
- SOLARI, F. et al. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 3, p. 571–579, 2008.
- SOLOMON, C. B.; BRADLEY, K. W. Influence of Application Timings and Sublethal Rates of Synthetic Auxin Herbicides on Soybean. **Weed Technology**, v. 28, n. 03, p. 454–464, 2014.
- SOSNOSKIE, L. M. et al. Evaluating the Volatility of Three Formulations of 2,4-D When Applied in the Field. **Weed Technology**, v. 29, n. 02, p. 177–184, 2015.
- SOUTHAM, C. M.; EHRLICH, J. Effects of extract of western red-cedar heartwood on certain wood-decaying fungi in culture. **Phytopathology**, v. 33, p. 517–524, 1943.
- TANG, L.; SHAO, G. Drone remote sensing for forestry research and practices. **Journal of Forestry Research**, v. 26, n. 4, p. 791–797, 2015.
- THELEN, K. D.; KRAVCHENKO, A. N.; LEE, C. D. Use of Optical Remote Sensing for Detecting Herbicide Injury in Soybean. **Weed Technology**, v. 18, n. 02, p. 292–297, 2006.
- TIAN, J. et al. Comparison of UAV and WorldView-2 imagery for mapping leaf area index of mangrove forest. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 61, n. October 2016, p. 22–31, set. 2017.
- VARGAS, L. et al. BUVA (*Conyza bonariensis*) RESISTENTE AO GLYPHOSATE NA REGIÃO SUL DO BRASIL. **Planta Daninha**, v. 25, n. 3, p. 573–578, 2007.

- VELINI, E. D. et al. Growth Regulation and Other Secondary Effects of Herbicides. **Weed Science**, v. 58, n. 3, p. 351–354, 2010.
- VIDAL, R.A.; MEROTTO JR, A. **Herbicidologia**. 1. ed. Porto Alegre: R.A. Vidal; A. Merotto Jr., 2001. 152 p.
- WATTS, A. C.; AMBROSIA, V. G.; HINKLEY, E. A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. **Remote Sensing**, v. 4, n. 6, p. 1671–1692, 2012.
- WRIGHT, T. R. et al. Robust crop resistance to broadleaf and grass herbicides provided by aryloxyalkanoate dioxygenase transgenes. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 107, n. 47, p. 20240–5, 2010.
- YAO, H. et al. Using vegetation index and modified derivative for early detection of soybean plant injury from glyphosate. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 89, p. 145–157, 2012.
- YIHYUN KIM, T. J. et al. Radar Vegetation Indices for Estimating the Vegetation Water Content of Rice and Soybean. **Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 9, n. 4, p. 564–568, 2012.
- YUN, H. S. et al. Use of Unmanned Aerial Vehicle for Multi-temporal Monitoring of Soybean Vegetation Fraction. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 41, n. 2, p. 126–137, 2016.
- ZHANG, C.; KOVACS, J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 693–712, 2012.
- ZHANG, C.; WALTERS, D.; KOVACS, J. M. Applications of low altitude remote sensing in agriculture upon farmers' requests-A case study in northeastern Ontario, Canada. **PLoS ONE**, v. 9, n. 11, p. 17–19, 2014.
- ZHAO, F. et al. Detection of the onset of glyphosate-induced soybean plant injury through chlorophyll fluorescence signal extraction and measurement. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 9, n. 1, p. 1–12, 2015.
- ZHENG, Y. et al. Maize and weed classification using color indices with support vector data description in outdoor fields. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 141, p. 215–222, 2017.
- ZHOU, X. et al. Metabolism and Residues of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid in DAS-40278-9 Maize (*Zea mays*) Transformed with Aryloxyalkanoate Dioxygenase-1 Gene. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 64, n. 40, p. 7438–7444, 2016.