

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE - PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA

DETECÇÃO DE NEMATOIDES NA FASE REPRODUTIVA
DA SOJA POR MEIO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO
TRIPULADOS

Autor: Bruno Henrique Tondato Arantes
Orientador: Prof. Dr. Alaerson Maia Geraldine
Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Castoldi
Coorientador: Prof. Dr. George Deroco Martins

Rio Verde - GO
Julho - 2019

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE - PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA

DETECÇÃO DE NEMATOIDES NA FASE REPRODUTIVA
DA SOJA POR MEIO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO
TRIPULADOS

Autor: Bruno Henrique Tondato Arantes
Orientador: Prof. Dr. Alaerson Maia Geraldine
Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Castoldi
Coorientador: Prof. Dr. George Deroco Martins

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração em Produção Vegetal Sustentável do Cerrado.

Rio Verde - GO
Julho - 2019

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

AAR662 Arantes, Bruno Henrique Tondato
d Detecção de nematoides na fase reprodutiva da soja
por meio de Veículos Aéreos Não Tripulados / Bruno
Henrique Tondato Arantes; orientador Alaerson Maia
Geraldine; co-orientador Gustavo Castoldi. -- Rio
Verde, 2019.
52 p.

Dissertação (em Ciências Agrárias - Agronomia) --
Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2019.

1. Agricultura de precisão. 2. Sensoriamento
Romoto. 3. Drone. 4. Heterodera glycines. 5.
Pratylenchus brachyurus. I. Maia Geraldine,
Alaerson, orient. II. Castoldi, Gustavo, co-orient.
III. Título.



INSTITUTO FEDERAL
Goiano

Repositório Institucional do IF Goiano - RIIF Goiano
Sistema Integrado de Bibliotecas

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor:
Matrícula:
Título do Trabalho:

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 26/09/2019

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não
O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde 25/09/2019
Local Data

Bruno Henrique Toledo Araújo
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

Alaerson Maria Gualdi
Assinatura do(a) orientador(a)

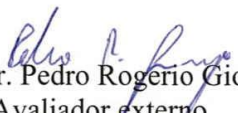
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AGRÁRIAS-AGRONOMIA**

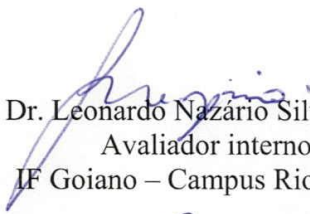
**DETECÇÃO DE NEMATOIDES NA FASE
REPRODUTIVA DA SOJA POR MEIO DE VEÍCULOS
AÉREOS NÃO TRIPULADOS**


Autor: Bruno Henrique Tondato Arantes
Orientador: Dr. Alaerson Maia Geraldine

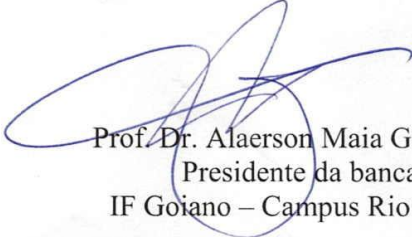
TITULAÇÃO: Mestre em Ciências Agrárias-Agronomia - Área de
Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em, 26 de julho de 2019.


Prof. Dr. Pedro Rogério Giongo
Avaliador externo
UEG


Prof. Dr. Leonardo Nazário Silva dos Santos
Avaliador interno
IF Goiano – Campus Rio Verde


Prof. Dr. Tavy's Micael Alves
Avaliador externo
IF Goiano – Campus Rio Verde


Prof. Dr. Alaerson Maia Geraldine
Presidente da banca
IF Goiano – Campus Rio Verde

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de realizar um mestrado em uma instituição pública e pela oportunidade de ter ótimos professores. À minha irmã, avós e avós por terem me ajudado financeiramente sempre que precisei. Em especial, à minha mãe por ter me ajudado nos momentos difíceis. À minha Tia Patrícia pela ajuda nas dificuldades impostas pela vida. À minha namorada Francislaine pelo companheirismo.

À Capes, pela concessão da bolsa de mestrado, uma ajuda financeira inestimável de que todo estudante de pós-graduação necessita. Uma ajuda que é necessária para o pagamento das despesas e para o investimento profissional. Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, por abrir as portas e fornecer a infraestrutura para o desenvolvimento das atividades. Ao Laboratório de Drones e Vants na Agricultura (LDVA) e de Fitopatologia pela concessão dos equipamentos necessários para a pesquisa.

Ao meu amigo Victor Hugo Moraes que me ajudou na condução de minha pesquisa. Aos meus amigos de laboratório e república. Ao orientador Alaerson Maia Geraldine, pelas orientações sempre pertinentes e por ter acreditado em minha capacidade. Aos coorientadores e ao Tavvs que sempre esteve presente como um ótimo orientador.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Bruno Henrique Tondato Arantes, nascido no município de Jales - SP, em 25 de fevereiro de 1993 é filho de Cristina Tondato e Kalvi José Gomes Arantes. Iniciou seus estudos em 2011 na Universidade Federal de Uberlândia, onde cursou Engenharia de Agrimensura e Cartográfica. Em 2017 ingressou no Mestrado de Ciências Agrárias - Agronomia pelo Instituto Federal Goiano - Rio Verde – GO, local onde a pesquisa passou a ser praticada com maior intensidade.

ÍNDICE

	Página
INTRODUÇÃO.....	05
OBJETIVOS.....	10
CAPÍTULO I.....	15
Introdução.....	16
Material e métodos.....	17
Área de estudo.....	17
Materiais.....	18
Aquisição e processamento dos dados agronômicos (altura de planta e massa seca/verde de raiz/dossel) e nematológicos.....	18
Planejamento e realização do voo.....	19
Processamento dos voos e extração de informações dos ortomosaicos.....	19
Análise estatística no RStudio.....	20
Resultados e discussão.....	20
Conclusões.....	22
CAPÍTULO II.....	26
Introdução.....	27
Material e métodos.....	28
Caracterização da área de estudo.....	28
Materiais.....	28
Coleta de amostras nematológicas.....	29
Planejamento do voo, obtenção do ortomosaico.....	30
Extração de informações das imagens e elaboração do mapa de predição.....	30
Análise estatística e validação de dois modelos matemáticos.....	30

Resultados e discussão.....	31
Conclusões.....	34
CONCLUSÃO GERAL.....	38

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO I	
Tabela 1. Regressões lineares simples e seus valores de coeficiente de determinação e nível de significância para variáveis nematológicas e agronômicas em função das bandas de cada sensor.....	20
Tabela 2. Modelo matemático obtido pela técnica de <i>stepwise</i> para a detecção de <i>P. brachyurus</i> e <i>H. glycines</i>	22
CAPÍTULO II	
Tabela 1. Regressões lineares simples para a detecção de <i>H. glycines</i>	31
Tabela 2. Modelos matemáticos para detecção de <i>H. glycines</i> e <i>P. brachyurus</i>	32

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
CAPÍTULO I	
Figura 1. Mapa de localização da área de estudo, bem como dos pontos de coletas e da representação de como os pontos foram coletados em cada uma das reboleiras.....	18
CAPÍTULO II	
Figura 1. Localização da área experimental, bem como das reboleiras	28
Figura 2. Pontos fora das parcelas da área experimental que compõem as amostras utilizadas para a elaboração das regressões lineares e pontos dentro das parcelas para a validação das regressões.....	29
Figura 3. Composição RGB de algumas áreas amostradas.....	33
Figura 4. Mapa de predição elaborado por meio da regressão linear simples e mapa de predição elaborado por meio da regressão linear múltipla.....	33
Figura 5. A- RMSE e ERRO da regressão linear simples com a banda de 586 nm para detecção de cistos inviáveis; B – RMSE e ERRO do modelo matemático para a detecção de cistos inviáveis.....	34

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo/Sigla	Significado/Descrição	Unidade de Medidas
AP	Agricultura de precisão	-
SR	Sensoriamento Remoto	-
SIG	Sistemas de Informação Geográfica	-
VANTs	Veículos Aéreos não Tripulados	-
LiDAR	Laser Detection and Ranging	-
IVs	Índices de vegetação	-
PRI	Índice de Vegetação Fotossintético	-
°C	Graus celsius	-
UAVs	Unmanned Aerial Vehicles	-
%	Porcentagem	-
nm	Nanômetros	-
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	-
NDRE	Índice de RedEdge por Diferença Normalizada	-
Nir	Infravermelho Próximo	-
RedEdge	Bordo do Vermelho	-
m	Metros	-
ω	Ômega	Graus (°)
ϕ	Phi	Graus (°)
κ	Kappa	Graus (°)
r^2	Coefficiente de Determinação	-
RSSF	Rede de Sensores sem Fio	-
R1	Início de Florescimento	-

R3	Início de Formação da Vagem	-
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite	-
VANT	Veículo Aéreo não Tripulado	-
RMSE	Erro Médio Quadrático	-
RMSE (%)	Erro	%
xi	Valor estimado	-
$x med$	Valor medido	-
cm ³	Centímetros cúbicos	-
VIF	Variance Inflation Factor	-

RESUMO

ARANTES, BRUNO HENRIQUE TONDATO, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde, julho de 2019. **Detecção de nematoides na fase reprodutiva da soja por meio de Veículos Aéreos Não Tripulados**. Orientador: Dr. Alaerson Maia Geraldine. Coorientador: Dr. Gustavo Castoldi, Dr. George Deroco Martins.

A soja é uma das principais oleaginosas do agronegócio brasileiro, sendo o Brasil o segundo maior produtor mundial. Todavia, ela sofre queda em sua produtividade devido a vários tipos de estresses, entre eles o nematoide de cisto da soja - *Heterodera glycines* e o nematoide de lesões radiculares - *Pratylenchus brachyurus*. Como forma de minimizar os danos que estes patógenos causam, esta pesquisa teve como objetivo identificar qual a melhor época para a detecção desses nematoides, entre o estágio R1 (início de florescimento) e R3 (formação das vagens), bem como determinar em R1 e R3: a melhor banda para a detecção do *H. glycines* e *P. brachyurus* e o melhor modelo matemático para sua detecção. Para a elaboração dos modelos e determinação das melhores bandas nos dois estádios reprodutivos, a primeira etapa consistiu na coleta de solo e raiz para a contagem de nematoides, bem como um voo feito nos mesmos dias das coletas, com exceção dos pontos de validação, que foram coletados um dia antes do voo. Posteriormente, ocorreram o processamento dos voos no *Pix4d* e a obtenção das informações a serem utilizadas nas regressões lineares. Como resultados, o estágio R1 foi mais adequado para a detecção dos nematoides de lesões radiculares e o estágio R3 foi mais adequado para a identificação do nematoide de cisto da soja. Em R1, os melhores resultados encontrados para detecção de *H. glycines* foram da faixa do visível, sendo a melhor banda a Vermelha do sensor RGB do Phantom. Para *P. brachyurus*, a faixa do

espectro do Nir - Sequoia apresentou o melhor resultado para detecção de juvenis no solo e do RedEdge - Sentera o melhor resultado para detecção de juvenis na raiz. O melhor modelo matemático para a detecção de *H. glycines* foi a combinação de bandas do espectro do visível (Vermelha-Sentera, Vermelha-Phantom, Verde-Phantom e Azul-Phantom) e para detecção de *P. brachyurus* a combinação das bandas RedEdge - Sentera e Nir - NDVI. No caso do estádio R3, para as regressões lineares simples, somente houve resultados significativos para os comprimentos de onda do visível, sendo a melhor banda para a detecção de cistos (viáveis e inviáveis), a faixa de 586 nanômetros. Para as regressões lineares múltiplas, no início da formação das vagens, a combinação das bandas da Sentera, Vermelha, Verde e de 825 nm gerou o melhor modelo matemático para a detecção de *H. glycines* e a combinação da banda Verde e Nir - NDVI da Sentera o modelo matemático para a detecção de *P. brachyurus*. Em R3, pode-se utilizar o modelo matemático validado para a detecção de locais com maiores e menores quantidades de cistos inviáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Agricultura de precisão, sensoriamento remoto, drone, *Heterodera glycines*, *Pratylenchus brachyurus*.

ABSTRACT

ARANTES, BRUNO HENRIQUE TONDATO, Goiano Federal Institute of Education, Science and Technology - Campus Rio Verde, August 2017. **Detection of nematodes in soybean reproductive phase by Unmanned Aerial Vehicles.** Advisor: Dr. Alaerson Maia Geraldine. Co-advisor: Dr. Gustavo Castoldi, Dr. George Deroco Martins.

Soybean is one of the main oilseeds in Brazilian agribusiness, and Brazil is the second largest producer in the world. However, it suffers a drop in its productivity due to various types of stress, including soybean cyst nematode - *Heterodera glycines* and root lesion nematode - *Pratylenchus brachyurus*. As a way to minimize the damage that these pathogens cause, this research aimed to identify the best time to detect these nematodes, between the R1 (early flowering) and R3 (pod formation) stages, as well as to determine in R1 and R3: the best band for detection of *H. glycines* and *P. brachyurus* and the best mathematical model for its detection. For the elaboration of the models and determination of the best bands in the two reproductive stages, the first step consisted of soil and root collection for the nematode count, as well as a flight made on the same days of the collections, except for the validation points, which were collected one day before the flight. Subsequently, the flights were processed in *Pix4d* and the information to be used in the linear regressions was obtained. As a result, stage R1 was more suitable for the detection of root lesion nematodes and stage R3 was more suitable for the identification of soybean cyst nematode. In R1, the best results found for *H. glycines* detection were in the visible range, with the best band being the Phantom RGB red sensor. For *P. brachyurus*, the Nir - Sequoia spectrum range presented the best result for detection of juveniles in the soil and RedEdge - Sentera the best result for detection of juveniles in the root. The best mathematical model for the detection of *H. glycines* was the combination

of visible spectrum bands (Red-Sentera, Red-Phantom, Green-Phantom and Blue-Phantom) and for the detection of *P. brachyurus* the combination of RedEdge - Sentera and Nir - NDVI. In the case of the R3 stage, for simple linear regressions, there were only significant results for visible wavelengths, being the best band for detection of viable and unviable cysts, the 586 nanometer range. For multiple linear regressions, for the beginning of pod formation, the combination of Sentera, Red, Green and 825 nm bands generated the best mathematical model for the detection of *H. glycines* and the combination of Green and Nir - NDVI bands da Sentera the mathematical model for the detection of *P. brachyurus*. In R3, the validated mathematical model can be used to detect sites with larger and smaller numbers of unviable cysts.

KEY WORDS: Precision agriculture, remote sensing, Drone, *Heterodera glycines*, *Pratylenchus brachyurus*.

INTRODUÇÃO

O uso de tecnologias inovadoras na produção de grãos vem crescendo nas últimas décadas, sempre buscando atender a demanda do crescimento populacional e do consumo de grão, reduzindo, ao mesmo tempo, os impactos ambientais. Entre as técnicas que se destacam, a agricultura de precisão (AP) promove processos agrícolas eficientes e sustentáveis que proporcionam aumento da produtividade, otimizando os custos (Patrício et al., 2018). A AP consiste no gerenciamento de uma fazenda com a combinação de tecnologias de informação, do sensoriamento remoto (SR), de sistemas de informação geográfico (SIG) e de tecnologia de sensores (Ferrández-Pastor et al., 2018), que podem ajudar na detecção de patógenos (Martins; Galo, 2014; Martins; Galo, 2015; Yang et al., 2016; Backooulou et al., 2016; MacDonald et al., 2016; Martins et al., 2017; Joalland et al., 2018;), nas aplicações localizadas (Shiratsuchi et al., 2003) e no mapeamento da variabilidade espacial (Vieira; Gonzalez, 2003).

O SR na agricultura de precisão é uma maneira eficiente e rápida de coleta de dados de grandes áreas. No mercado existem diversas opções de resoluções espaciais, espectrais, temporais e radiométricas, cujos desenvolvimento e avanço das tecnologias orbitais têm reduzido significativamente a lacuna deixada com as imagens aéreas, tais como falta de resoluções espaciais maiores e maior flexibilidade nas revisitas em campo. O Ikonos e o QuickBird foram os primeiros sensores de alta resolução espacial a serem avaliados na agricultura de precisão (Yang, 2018), sendo utilizados para o mapeamento do índice de área foliar, no monitoramento de produtividade e da variabilidade das propriedades superficiais do solo (Johnson et al., 2003; Dobermann; Ping, 2004; Sullivan et al., 2005;).

Um sensor orbital muito utilizado na agricultura de precisão é o RapidEye. A produção de raiz de beterraba açucareira, o rendimento de açúcar recuperável de beterraba

sacarina, o rendimento de trigo de primavera, proteína de grão de trigo de primavera, o rendimento de milho e o rendimento de girassol podem ser previstos via satélite RapidEye (Bu et al., 2016). Além disso, índices de vegetação extraídos da imagem RapidEye para o mapeamento da absorção de nitrogênio na cultura do trigo foram utilizados (Magney et al., 2016). Outros sensores também são usados na agricultura de precisão, como o GeoEye-1, WorldView-2, Spot 5 e QuickBird (Sharma et al., 1995; Yang et al., 2006; Yang et al., 2008; Li et al., 2015; Caturegli et al., 2015; Gomez-Candón et al., 2018; Yang et al., 2018).

Em suma, a contribuição do sensoriamento orbital na agricultura tem crescido cada vez mais, sendo atualmente o olho do agricultor em macroescala. Todavia os veículos aéreos não tripulados (VANTs) complementam as informações obtidas via satélite, pois têm a capacidade de detectar uma vegetação com poucos centímetros de dossel e a vantagem de permitir voos em curtos intervalos de tempo sem a presença de sombra de nuvens.

Apesar de haver inúmeros modelos de drones, todos eles cumprem a mesma função, o transporte do sensor. Existem diversos tipos de sensores no mercado, sendo que os mais comuns utilizados na agricultura são os termais, multiespectrais, hiperespectrais, modificados e os sistemas LiDAR. O thermal é muito utilizado para a detecção de estresse hídrico na agricultura, uma vez que é altamente sensível a mudanças sutis na temperatura (Gerhards et al., 2018).

Os sensores, como os multiespectrais e hiperespectrais embarcados em plataformas aéreas não tripuladas, apresentam-se como solução eficaz para aplicações de monitoramento na agricultura. Peña et al. (2015) mostraram que o sensor multiespectral é adequado para o mapeamento de plantas daninhas, com bons resultados entre 40 e 60 metros de altura. Para o caso de doenças foliares, sensores multiespectrais são capazes de diferenciar plantas infectadas de plantas saudáveis, como no caso da pesquisa de Su et al. (2018), capaz de discriminar trigos com ferrugem e com ausência, seja com o uso de bandas espectrais ou índices de vegetação.

Os sensores hiperespectrais, se diferenciam dos modificados e multiespectrais pelo número de bandas (Adão et al., 2017), além de serem adequados para a obtenção de índices de vegetação (IVs). Alguns exemplos de aplicação, compreendem a pesquisa de Din et al. (2017), capaz de estimar o índice de área foliar da cultura do arroz com altos valores de coeficiente de determinação, através de alguns IVs, assim como o trabalho de Liang et al. (2016), cuja PRI se mostrou capaz de estimar o teor de clorofila foliar.

Já o sistema LiDAR, também conhecido por varredura a laser, é um bom método para a determinação de altura de plantas (Hoffmeister et al., 2015), o qual, de certa forma, detecta indiretamente plantas estressadas, que tendem em algumas situações, a apresentar porte reduzido, em função do ataque de alguns patógenos, como o nematoide. Com o uso de um *Field Scanalyzer*, com dois sistemas de câmeras, que nada mais são do que uma plataforma terrestre de local fixo, é possível obter resultados com precisões centimétricas (1,8 cm) no cálculo de altura do dossel (Virale et al., 2017). E Holman et al. (2016) mostram que técnicas fotogramétricas baseadas em VANTs e LiDAR são totalmente capazes de recriar modelos em três dimensões de alta precisão e, conseqüentemente, de calcular a altura da cultura de trigo em campo.

Além de toda a tecnologia aqui citada, ainda tem o uso do aprendizado de máquina a favor da agricultura de precisão. Surgiu junto com as tecnologias de big data e computação de alto desempenho (Liakos et al., 2018). Ervas daninhas já podem ser mapeadas com aprendizagem de máquinas, além de serem também diferenciadas (Binch; Fox, 2017; Pantazi et al., 2017), o que proporciona diminuição do uso de herbicidas. Em uma revisão, Behmann et al. (2015) mostram a capacidade do uso de *machine learning* na detecção precoce de estresse biótico, de plantas daninhas, de doenças de plantas e de pragas.

Entretanto, mesmo diante de todas essas tecnologias, uma das dificuldades enfrentadas pelos drones e pelos sensores orbitais é a presença de nuvens e sombra de nuvens sobre a área a ser monitorada. Elas alteram a resposta espectral do dossel da planta dificultando a diferenciação de áreas sadias e doentes. Entretanto, os drones permitem que voos sejam feitos em condições de iluminação homogênea, quando a quantidade de nuvens é pequena. Isto é possível quando, entre a passagem de uma nuvem e outra sobre a área a ser monitorada, é permitido um voo de alguns minutos sem mudança da intensidade da iluminação.

À frente a todas as opções de manejo, um dos grandes problemas que a agricultura ainda vem enfrentando, é a ocorrência de nematoides (Nasu et al., 2018). Três deles estão presentes na área de estudo desta pesquisa, o *Pratylenchus brachyurus*, *Heterodera glycines* e *Helicotylenchus dihystera*. A grande diferença para outros patógenos que o torna uma praga de difícil controle, é que sua ocorrência é no solo, dificultando o manejo, pela necessidade de aplicação de nematicidas ter que atingir diferentes profundidades (Forge et al., 1998; Pudasaini et al., 2006; Abd-Elgawad et al.,

2016). Além disso, esses nematoides têm capacidade de sobreviver nas raízes e no solo de uma safra para outra (Kroese et al., 2016).

O nematoide de cisto da soja, *H. glycines*, exibe sintomas que podem ser detectados pelo sensoriamento remoto, sendo então possível de ser mapeado. Plantas infectadas podem ter necrose radicular, nanismo, clorose, senescência precoce, redução do sistema radicular e redução no peso dos grãos (Zhang et al., 2017). Em alguns casos, onde há presença de *P. brachyurus* com o *H. glycines* é possível que a soja sofra senescência tardia, fato presenciado em um talhão de soja na safra de 2018/19, área de pesquisa deste trabalho. Bajwa et al. (2017) relatam que nos estágios iniciais de infecção os sintomas são difíceis de serem detectados por não produzirem sintomas visíveis. Entretanto o rendimento da cultura pode ser significativamente reduzido.

Uma das características do *H. glycines* é a presença de cistos, permitindo que o nematoide sobreviva por mais de oito anos, mesmo na ausência de um hospedeiro. É condição ideal para que os juvenis sejam liberados e penetrem na raiz da planta, a presença de solo úmido, com temperaturas entre 20° C e 30 ° C. O ciclo do nematoide de cisto da soja se completa com 4 semanas (Henning et al., 2014). Este nematoide pode ser identificado e diferenciado do nematoide das lesões radiculares (*P. brachyurus*), pela presença de fêmeas presas à raiz, que apresentam o formato de limão alongado, de coloração branca e amarela (Godoy et al., 2016).

A ocorrência de *P. brachyurus* na soja é muito comum em regiões tropicais, sendo um endoparasita migratório que se alimenta de células corticais da raiz, escurecendo o tecido parasitado (Homiak et al., 2017). Destrói inicialmente a raiz principal, posteriormente, as raízes secundárias (Dias-Arieira et al., 2018). No dossel os seus sintomas podem não ser bem evidentes em alguns tipos de textura de solo, já que a planta continua verde, mas a ocorrência de plantas pequenas e atrofiadas é evidente (Dias et al., 2010). Esse nematoide também causa clorose nas folhas e diminuição na produtividade.

Os nematoides das lesões radiculares, têm ciclo de vida dependente das condições climáticas, como temperatura e umidade (Ferraz, 2006). O ciclo completo pode variar de três a seis semanas. Alta umidade no solo é ideal para a multiplicação dos juvenis (Egunjobi, 1974). Apesar de não terem um sistema robusto de sobrevivência como o cisto, podem sobreviver por vários meses sem a planta hospedeira, na presença de solos secos e altas temperaturas. Com fragmento de raízes presentes em solos de pousio, eles podem

sobreviver até dois anos e sete meses na ausência da raiz (Good et al., 1958; McGowan, 1978).

Existem algumas técnicas para a redução da população de nematoides e para uma convivência sem muitos danos significativos para a produtividade, sendo as mais conhecidas, rotação de culturas, aplicação de nematicidas químicos e biológicos e uso de cultivares resistentes. Zhang et al. (2017) afirmam que para cisto a rotação de cultura por vários anos pode reduzir a população nos campos, mas relata que a prática é dependente da lucratividade e da praticidade de culturas não hospedeiras dos juvenis. Dizem que nematicidas são caros e que o uso de cultivar resistente é um bom método econômico e sustentável de mitigar os danos do cisto a soja. Porém o uso contínuo de cultivares derivadas de uma única fonte genética de resistência contribui para que o nematoide evolua e quebre a resistência.

Para o nematoide de lesões radiculares, a rotação de cultura também é recomendada para sua redução, bem como o uso de nematicidas e de variedades de cultivares resistentes. Entretanto, Arieira et al. (2018) afirmam que a grande variedade de hospedeiros e a falta de cultivares resistentes dificultam o controle. O uso de plantas com baixos fatores de reprodução tem sido uma opção para o *P. brachyurus*, como a crotalária, mas a resistência dos produtores em substituir a soja por plantas antagônicas é uma limitação (Dias et al., 2010; Arieira et al., 2018).

Plantas que produzem compostos nematicidas também podem ser utilizadas para lidar com nematoides parasitas de plantas (Aissani et al., 2015; Xie et al., 2016; Jardim et al., 2018), assim como nematicidas biológicos, por não agredirem o meio ambiente.

O sensoriamento remoto é uma outra ferramenta para o controle de nematoides, já que é possível realizar o mapeamento das reboleiras de nematoide, discriminando áreas mais críticas, o que torna possível a aplicação de nematicidas em pontos específicos. Permite a utilização de plantas que produzem compostos nematicidas somente em áreas específicas, superando a resistência dos produtos em adotar novas culturas, bem como, um melhor direcionamento sobre o melhor manejo integrado a ser adotado em função do tipo de cultura utilizado pelo produtor, nível de infestação de nematoides e a forma como estão espalhados pelo campo.

Em suma, aliando o sensoriamento remoto às opções de manejo de nematoide, é possível otimizar custo com uma aplicação eficiente. Além disso, com imagens aéreas é possível o direcionamento das amostragens de solo, bem como orientar quais locais do talhão merece mais esforços.

OBJETIVOS

Esta pesquisa teve como objetivo geral detectar a ocorrência dos nematoides *H. glycines* e *P. brachyurus* em um campo de soja, com a utilização de veículos aéreos não tripulados e determinar a melhor época para a identificação das reboleiras no talhão, entre os estádios R1 e R3.

Como objetivo específico no estádio R1 - determinar a melhor banda para a detecção do *H. glycines* e *P. brachyurus* com o uso de modelos de regressões lineares simples, e definir um modelo matemático de regressão linear múltipla para sua detecção.

E como objetivo específico no estádio R3 - definir a melhor faixa espectral para a detecção de *H. glycines* e *P. brachyurus*, bem como a elaboração de modelos matemáticos para isto, através do uso de regressões lineares múltiplas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABD-ELGAWAD, M. M. M. et al. Biological control agents of plant-parasitic nematodes. **Egyptian Journal of Biological Pest Control**, v. 26, n. 2, p. 423-429, 2016.
- 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. 1110, 2017.
- AISSANI, N. et al. Nematicidal activity of the volatilome of *Eruca sativa* on *Meloidogyne incognita*. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 63, n. 27, p. 6120-6125, 2015.
- BACKOULOU, G. F. et al. Processed multispectral imagery differentiates wheat crop stress caused by greenbug from other causes. **Computers and electronics in agriculture**, v. 115, p. 34-39, 2015.
- BAJWA, S; RUPE, J; MASON, J. Soybean disease monitoring with leaf reflectance. **Remote Sensing**, v. 9, n. 2, p. 127, 2017.
- BINCH, A; FOX, C. W. Controlled comparison of machine vision algorithms for *Rumex* and *Urtica* detection in grassland. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 140, p. 123-138, 2017.
- BU, H. et al. Comparison of satellite imagery and ground-based active optical sensors as yield predictors in sugar beet, spring wheat, corn, and sunflower. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 1, p. 299-308, 2017.
- CATUREGLI, L. et al. GeoEye-1 satellite versus ground-based multispectral data for estimating nitrogen status of turfgrasses. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 8, p. 2238-2251, 2015.
- DIAS, W. P. et al. Nematoides em soja: identificação e controle. **Embrapa Soja-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2010.
- DIAS-ARIEIRA, C. R. et al. Biological control of *Pratylenchus brachyurus* in soya bean crops. **Journal of Phytopathology**, v. 166, n. 10, p. 722-728, 2018.
- DIN, M. et al. Evaluating hyperspectral vegetation indices for leaf area index estimation of *Oryza sativa* L. at diverse phenological stages. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 820, 2017.
- DOBERMANN, A.; PING, J. L. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. **Agronomy journal**, v. 96, n. 1, p. 285-297, 2004.
- EGUNJOBI, O. A. et al. Nematodes and maize growth in Nigeria. I. Population dynamics of *Pratylenchus brachyurus* in and about the roots of maize and its effects on maize production at Ibadan. **Nematologica**, v. 20, n. 2, p. 181-186, 1974.
- FERRÁNDEZ-PASTOR, F. et al. Precision agriculture design method using a distributed computing architecture on internet of things context. **Sensors**, v. 18, n. 6, p. 1731, 2018.

FERRAZ, L. C. C. B. O nematóide *Pratylenchus brachyurus* e a soja sob plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v. 96, n. 1, p. 23-27, 2006.

FORGE, T. A.; DEYOUNG, R.; VRAIN, T. C. Temporal changes in the vertical distribution of *Pratylenchus penetrans* under raspberry. **Journal of nematology**, v. 30, n. 2, p. 179, 1998.

GERHARDS, M. et al. Analysis of airborne optical and thermal imagery for detection of water stress symptoms. **Remote Sensing**, v. 10, n. 7, p. 1139, 2018.

GODOY, C. V. et al. Doenças da soja. **Manual de fitopatologia**, v. 2, p. 657-676, 2016.

GÓMEZ-CANDÓN, D. et al. Understanding the errors in input prescriptive maps based on high spatial resolution remote sensing images. **Precision agriculture**, v. 13, n. 5, p. 581-593, 2012.

GOOD, J. M.; BOYLE, L. W.; HAMMONS, R. O. Studies of *Pratylenchus brachyurus* on peanuts. **Phytopathology**, v. 48, n. 10, p. 530-535, 1958.

HENNING, A. A. et al. Manual de identificação de doenças de soja. **Embrapa Soja-Documentos (INFOTECA-E)**, 2014.

HOFFMEISTER, D. et al. Crop height variability detection in a single field by multi-temporal terrestrial laser scanning. **Precision agriculture**, v. 17, n. 3, p. 296-312, 2016.

HOLMAN, F. et al. High throughput field phenotyping of wheat plant height and growth rate in field plot trials using UAV based remote sensing. **Remote Sensing**, v. 8, n. 12, p. 1031, 2016.

HOMIAK, J. A. et al. Seed treatments associated with resistance inducers for management of *Pratylenchus brachyurus* in soybean. **Phytoparasitica**, v. 45, n. 2, p. 243-250, 2017.

JARDIM, I. N. et al. (E)-cinnamaldehyde from the essential oil of *Cinnamomum cassia* controls *Meloidogyne incognita* in soybean plants. **Journal of pest science**, v. 91, n. 1, p. 479-487, 2018.

JOALLAND, S. et al. Aerial and ground based sensing of tolerance to beet cyst nematode in sugar beet. **Remote Sensing**, v. 10, n. 5, p. 787, 2018.

JOHNSON, L. F. et al. Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. **Computers and electronics in agriculture**, v. 38, n. 1, p. 33-44, 2003.

KROESE, D. R.; WEILAND, J. E.; ZASADA, I. A. Distribution and longevity of *Pratylenchus penetrans* in the red raspberry production system. **Journal of nematology**, v. 48, n. 4, p. 241, 2016.

LI, X. et al. Feasibility study on Huanglongbing (citrus greening) detection based on WorldView-2 satellite imagery. **Biosystems Engineering**, v. 132, p. 28-38, 2015.

LIAKOS, K. et al. Machine learning in agriculture: A review. **Sensors**, v. 18, n. 8, p. 2674, 2018.

LIANG, L. et al. Estimating crop chlorophyll content with hyperspectral vegetation indices and the hybrid inversion method. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 13, p. 2923-2949, 2016.

MACDONALD, S. L. et al. Remote hyperspectral imaging of grapevine leafroll-associated virus 3 in cabernet sauvignon vineyards. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 130, p. 109-117, 2016.

MAGNEY, T. S.; EITEL, J. UH; VIERLING, L. A. Mapping wheat nitrogen uptake from RapidEye vegetation indices. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 4, p. 429-451, 2017.

MARTINS, G. D; GALO, M. L. B. T. Caracterização espectral da cana-de-açúcar infectada por nematoides e *Migdolus fryanus* por espectrorradiometria de campo. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 4, 2015.

MARTINS, G. D; GALO, M. L. B. T. Detecção de áreas infestadas por nematoides e *Migdolus fryanus* em cultura canavieira a partir de imagens multiespectrais Rapideye. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 1, n. 66/2, 2014.

MARTINS, G. D; GALO, M L. B. T; VIEIRA, B. S. Detecting and mapping root-knot nematode infection in coffee crop using remote sensing measurements. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 10, n. 12, p. 5395-5403, 2017.

MCGOWAN, J. B. The lesion nematode, *Pratylenchus brachyurus* infecting citrus. Florida: Florida Department of Agriculture and Consumer Services, 1978.

NASU, É. G. C. et al. Pochonia chlamydosporia applied via seed treatment for nematode control in two soil types. **Crop protection**, v. 114, p. 106-112, 2018.

PANTAZI, X. E. et al. Evaluation of hierarchical self-organising maps for weed mapping using UAS multispectral imagery. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 139, p. 224-230, 2017.

PATRÍCIO, D. I; RIEDER, R. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 153, p. 69-81, 2018.

PEÑA, J et al. Quantifying efficacy and limits of unmanned aerial vehicle (UAV) technology for weed seedling detection as affected by sensor resolution. **Sensors**, v. 15, n. 3, p. 5609-5626, 2015.

PUDASAINI, M. P. et al. Vertical distribution of the plant-parasitic nematode, *Pratylenchus penetrans*, under four field crops. **Phytopathology**, v. 96, n. 3, p. 226-233, 2006.

SHARMA, S. A. et al. Oilseed crop discrimination: selection of optimum bands and role of middle infrared. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 50, n. 5, p. 25-30, 1995.

SHIRATSUCHI, L. S.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; FONTES, J. R. A. Aplicação localizada de herbicidas. **Embrapa Cerrados-Documentos (INFOTECA-E)**, 2003.

SU, J et al. Wheat yellow rust monitoring by learning from multispectral UAV aerial imagery. **Computers and electronics in agriculture**, v. 155, p. 157-166, 2018.

SULLIVAN, D. G.; SHAW, J. N.; RICKMAN, D. IKONOS imagery to estimate surface soil property variability in two Alabama physiographies. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 6, p. 1789-1798, 2005.

VIEIRA, S. R; PAZ GONZALEZ, A. Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 127-138, 2003.

VIRLET, N. et al. Field Scanalyzer: An automated robotic field phenotyping platform for detailed crop monitoring. **Functional Plant Biology**, v. 44, n. 1, p. 143-153, 2017.

XIE, Gui-hua et al. Crop rotation and intercropping with marigold are effective for root-knot nematode (*Meloidogyne* sp.) control in angelica (*Angelica sinensis*) cultivation. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 97, n. 1, p. 26-31, 2016.

YANG, C. et al. Change detection of cotton root rot infection over 10-year intervals using airborne multispectral imagery. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 154-162, 2016.

YANG, C. et al. Site-Specific Management Of Cotton Root Rot Using Airborne And High Resolution Satellite Imagery And Variable Rate Technology. 2018.

YANG, C. High resolution satellite imaging sensors for precision agriculture. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 5, n. 4, p. 393-405, 2018.

YANG, C; EVERITT, J. H.; BRADFORD, J. M. Comparison of QuickBird satellite imagery and airborne imagery for mapping grain sorghum yield patterns. **Precision Agriculture**, v. 7, n. 1, p. 33-44, 2006.

YANG, C; EVERITT, J. H.; FLETCHER, R. S. Using high resolution SPOT 5 multispectral imagery for crop identification. In: **2008 Providence, Rhode Island, June 29–July 2, 2008**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2008. p. 1.

ZHANG, H. et al. Genetic architecture of wild soybean (*Glycine soja*) response to soybean cyst nematode (*Heterodera glycines*). **Molecular genetics and genomics**, v. 292, n. 6, p. 1257-1265, 2017.

CAPÍTULO I

(Normas de acordo com a revista Land Use Policy)

Deteção de nematoides na cultura da soja no estágio R1 por meio de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs)

Detection of nematodes in soybean crop at R1 stage by Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)

Resumo: A soja (*Glycine max* (L.) Merr.) é uma das principais espécies cultivadas no mundo, sendo uma grande fonte de alimento para seres humanos e animais. Todavia, ela sofre queda em sua produtividade devido a vários tipos de estresses, dentre eles o nematoide de cisto da soja - *Heterodera glycines* e o nematoide das lesões radiculares - *Pratylenchus brachyurus*. Como objetivo, buscou-se determinar a melhor banda para a detecção do *H. glycines* e *P. brachyurus* com o uso modelos de regressões lineares simples e definir um modelo matemático de regressão linear múltiplo para sua detecção, no início do florescimento (R1). Para isto, foram definidos 9 pontos de coleta em 5 reboleiras, totalizando 45 pontos. As coletas foram feitas em um padrão específico de distâncias, de forma a ter amostras com variados tipos de populações de nematoides. Foram realizados voos com o sensor RGB do Phantom 4 Advanced, com a Sequoia e a Sentera sobre cada uma das reboleiras. Como resultado, a banda vermelha foi a que melhor explicou a variabilidade dos dados para cisto no solo e na raiz, bem como dos juvenis de segundo estágio no solo. Para *P. brachyurus* a RedEdge da Sentera foi a que explicou melhor a variabilidade dos dados para nematoide na raiz e a Nir da Sequoia a que melhor explicou para juvenis no solo. Quando se utiliza um modelo matemático para a detecção do *P. brachyurus* e *H. glycines*, percebe-se uma grande melhora no R^2 e p-valor com relação às regressões lineares simples. Estatisticamente, o estágio R1 da soja e a faixa espectral desses sensores aplicados a esta pesquisa não apresentam um R^2 alto, porém um bom p valor para uma detecção de *H. glycines* e *P. brachyurus*, ao longo da área experimental analisada.

Palavras chaves: Drone, sensoriamento remoto, agricultura de precisão, *Heterodera glycines*, *Pratylenchus brachyurus*.

Abstract: Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) Is one of the main cultivated species in the world, being a great source of food for humans and animals. However, it suffers a drop in its productivity due to various types of stress, including soybean cyst nematode - *Heterodera glycines* and root lesion nematode - *Pratylenchus brachyurus*. The objective was to determine the best band for the detection of *H. glycines* and *P. brachyurus* using simple linear regression models and to define a mathematical multiple linear regression model for its detection at the beginning of flowering (R1). For this, 9 collection points were defined in 5 reboleiras, totaling 45 points. The collections were made in a specific pattern of distances, in order to have samples with different types of

nematode populations. Flights were made with the Phantom 4 Advanced RGB sensor, Sequoia and Sentera over each of the wheels. As a result, the red band best explained the variability of soil and root cyst data as well as second stage juveniles in the soil. For *P. brachyurus* Sentera RedEdge was the one that best explained the variability of data for root nematode and Sequoia Nir was the one that best explained for soil juveniles. When using a mathematical model for the detection of *P. brachyurus* and *H. glycines*, a great improvement in R^2 and p-value is observed in relation to simple linear regressions. Statistically, soybean R1 stage and spectral range of these sensors applied to this research do not present a high R^2 , but a good p value for detection of *H. glycines* and *P. brachyurus*, along the experimental area analyzed.

Key words: Drone, remote sensing, precision farming, *Heterodera glycines*, *Pratylenchus brachyurus*

1. Introdução

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill.) é uma das principais culturas cultivadas no mundo. É uma variedade de alimentos à base grãos para os seres humanos e animais, além de ser matéria prima com potencial para a produção de biocombustível (Zhang et al., 2017), sendo considerada uma das cultivares mais antigas utilizadas pelo homem (Hymowitz, 1970). É desafiada por vários tipos de estresses, dos quais o nematoide de cisto da soja - *Heterodera glycines* e o nematoide das lesões radiculares - *Pratylenchus brachyurus* são as principais causas de perda de sua produtividade (Niblack, 2005; Wrather, 2006; Goulart, 2008; Wang et al., 2015; Peng et al., 2016; Wang, 2016) em alguns solos brasileiros (Dias et al., 2011; Inomoto et al., 2011).

O nematoide de cisto da soja é um patógeno endoparasita sedentário que infecta a raiz e causa sintomas que podem ser detectados acima do solo. Nestas situações a planta exibe sintomas de necrose radicular, nanismo, clorose foliar, senescência precoce e redução de peso das sementes (Niblack, 2005; Zhang, 2017). Os nematoides obstruem o transporte de água e nutrientes desde a raiz até as folhas, o que pode ser confundido com estresse hídrico ou nutricional (Blevins et al., 1995). Os sintomas aparecem em reboleiras no campo e, em muitos casos, as plantas acabam morrendo (Godoy, 2016).

Alguns autores relatam que a ocorrência de sintomas nas folhas, de baixa mobilidade no solo e de forma agrupada (conjunto de plantas) tornam os nematoides alvos detectáveis pelo imageamento orbital e aéreo, possibilitando as aplicações da agricultura de precisão (Hillnhutter et al., 2011).

A soja resistente ao *H. glycines* é uma opção eficiente que pode ser adotada pelos produtores como forma de evitar perdas na produção (Tylka, 2016). No entanto, devido ao uso contínuo dessas fontes de resistência, os cistos evoluem com o

tempo, quebrando-as (Concibido et al., 2004; Mitchum et al., 2007; Niblack et al., 2008).

Para o caso do nematoide das lesões radiculares, a injúria na soja é caracterizada por manchas em plantas, cujas folhas frequentemente apresentam alterações de cor. As raízes apresentam lesões marrom-avermelhadas progredindo em direção à necrose (Inomoto et al., 2008; Dias et al., 2010). Entretanto, em algumas situações, tanto o *H. glycines* quanto o *P. brachyurus* podem estar presentes na raiz da soja sem que a planta apresente sintomas. Tal situação foi constatada em campo por alguns autores desta pesquisa, cuja planta já estava no estágio de desenvolvimento reprodutivo.

Tradicionalmente o diagnóstico de grandes áreas infectadas por nematoide é dispendioso, pois uma estimativa precisa da distribuição populacional pelo talhão requer um grande número de amostras de solo (Martins et al., 2017),

Entretanto, uma forma de observar indiretamente os danos que esse patógeno causa, em grandes áreas e em curto intervalo de tempo, é por meio de métodos de sensoriamento remoto (SR). Para o estresse induzido por nematoides, vários processos baseados em sensores foram testados, usando plataformas terrestres e aéreas (Heath et al., 2000; Nutter et al., 2002; Laudien et al., 2005; Hillnhutter et al., 2012). Em problemas assintomáticos e sintomáticos de plantas o uso de sensores remotos por espectroscopia também é abordado por diversos autores (Marcassa et al., 2006; Cho et al., 2012; Hunt et al., 2013; Oumar et al., 2013; Ashourloo et al., 2016;).

Entre as bandas estreitas, muito utilizadas na agricultura, temos as bandas hiperespectrais, que podem detectar pequenas mudanças nas características do dossel das plantas, das quais podem ser causadas por vários tipos de estressores (Gebbers et al., 2010; Mulla et al., 2013; Mahlein et al., 2013). Em suma, o sensoriamento remoto hiperespectral

pode ser uma ferramenta valiosa para a detecção precoce de doenças de plantas, pois o espectro eletromagnético pode detectar mudanças imperceptíveis ao olho humano (Mahlein *et al.*, 2012; Martinelli *et al.*, 2015).

Para aumentar a sensibilidade de detecção de muitos patógenos, os índices de vegetação (IVs) de bandas estreitas estão sendo cada vez mais utilizados. Por meio deles, é possível avaliar mudanças na vegetação em diversas escalas, além de estimar os danos causados por patógenos (Marcussi *et al.*, 2010; Mahlein *et al.*, 2013). Bandas do visível também são utilizadas para monitorar diversas culturas agrícolas (Bendig *et al.*, 2014; Jannoura *et al.*, 2015).

Em auxílio ao sensoriamento remoto, temos os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), a miniaturização de sensores espectrais e o desenvolvimento de algoritmos que possibilitaram a aplicação de imagem digital (Colomina *et al.*, 2014) e a obtenção de produtos cartográficos de alta precisão em áreas maiores e em curto intervalo de tempo.

Com o uso do sensoriamento remoto para a detecção precisa e o mapeamento de patógenos, o manejo localizado tornou-se uma ferramenta valiosa na agricultura de precisão. Com essa tecnologia, é possível uma identificação relativamente rápida e precoce da distribuição espacial de uma doença usando métodos baseados em reflectância da copa (Moshou *et al.*, 2004; Qin *et al.*, 2009; Shafri & Hamdan, 2009; Sankaran *et al.*, 2010).

Existem poucos estudos explorando o uso de imagens RGB, multiespectrais e hiperespectrais para a detecção de cisto na soja e do nematoide das lesões radiculares. Nutter *et al.* (2002) utilizaram o SR aéreo para quantificar a densidade populacional de nematoide de cisto da soja, e descobriram que

60% da variabilidade de uma população inicial pode ser explicada pela reflectância do dossel. Em paralelo, na pesquisa de Bajwa *et al.* (2017) modelos foram capazes de discriminar uma soja sadia de outra com cisto, com altos valores de acurácia.

Assim, os objetivos desse trabalho foram: determinar a melhor banda para a detecção do *H. glycines* e *P. brachyurus* com o uso modelos de regressões lineares simples e definir um modelo matemático de regressão linear múltiplo para sua detecção, no início do florescimento (R1).

2. Material e método

2.1 Área de Estudo

O local de estudo, uma área experimental de aproximadamente 330 hectares, está inserida no município de Rio Verde e Montividiu, local marcado fortemente pela produção de soja e milho. Tal área está em uma zona que apresenta como características: Latossolo Vermelho Distrófico, elevação de aproximadamente 953 metros, declividade que vai de plano (0 a 3 %) a suave ondulado (3 a 8 %), temperatura média de 22,3 °C e precipitação anual por volta de 1600 milímetros (Soma Brasil, 2019) (Figura 1).

Na área experimental, tem-se a ocorrência de *H. glycines* das raças 1, 3 e 6, além de *P. brachyurus* e *Helicotylenchus dihystera*. As espécies de nematoides foram identificadas por análises nematológicas, realizadas no Laboratório de Fitopatologia do Instituto Federal Goiano do município de Rio Verde – GO na safra de 2017/2018. Todavia, somente o tipo de raça do *H. glycines* foi feita em outro laboratório.

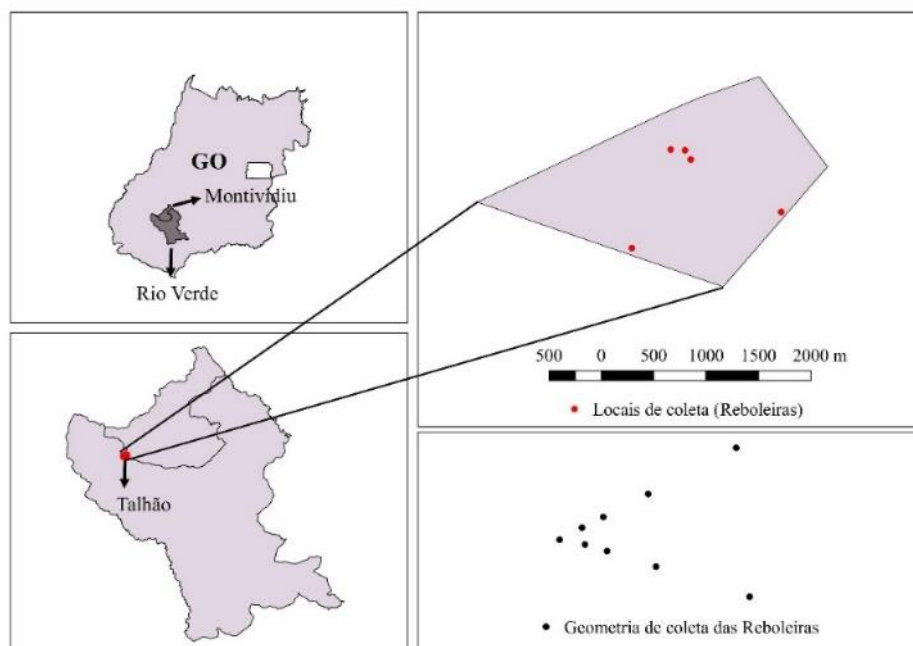


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo, bem como os pontos de coletas e da representação de como os pontos foram coletados em cada uma das reboleiras

2.2 Materiais

Entre os sensores utilizados nesta pesquisa, estão a Sequoia, a Sentera e o RGB do Phantom 4 Advanced. A Sequoia apresenta a banda do Verde (550 nanômetros (nm)), do Vermelha (660 nm), do Bordo do Vermelho (735 nm) e do Nir (790 nm), quatro sensores separados. A Sentera apresenta bandas específicas e outras já tradicionais, encontradas em sensores comuns. Temos então a banda com o comprimento de onda de 615, 586, 661, 825 e 775 nm. Além destas, tem-se o sensor de composição RGB com, respectivamente, 650 nm, 548 nm, e 446 nm, bem como o sensor NDVI, contendo uma banda Vermelha - NDVI de 625 nm e uma Nir - NDVI de 850 nm e o sensor NDRE contendo outra banda Nir - NDRE de 840 nm e uma banda conhecida como RedEdge - Sentera de 720 nm.

Apesar de a Sequoia ainda ter o sensor RGB, o último não foi utilizado por apresentar alguns ruídos na imagem. A RGB do Phantom 4 Advanced não apresenta especificações das faixas espectrais, sendo então definidas como Vermelha - Phantom, Verde - Phantom e Azul-Phantom.

Para o transporte da Sequoia, foi utilizado um Phantom 4 Advanced e para o transporte da Sentera, o Inspire 2. Para cada ponto de coleta nas reboleiras, uma folha A4 foi utilizada a fim de facilitar a identificação dos pontos na

imagem. Um garmin etrex 20 foi utilizado para se chegar aos pontos de coleta das 5 reboleiras.

Na elaboração do plano de voo para o Phantom, foi utilizado o aplicativo *DroneDeploy*. No caso da Sequoia, o próprio sistema operacional da câmera e o *DroneDeploy*. Por último, o *FieldAgent* para a definição do voo da Sentera.

Demais materiais como enxadão, sacos plásticos devidamente identificados, peneiras, entre outros, foram utilizados para a coleta de solo, raiz e plantas em campo e, por conseguinte, a extração nematológica.

Por fim, o software *Pix4d* foi utilizado para a obtenção do ortomosaico das áreas sobrevoadas, o software *Qgis* para a extração das informações dos pixels das áreas amostradas e elaboração de mapas, e o software *RStudio* para as análises estatísticas.

2.3 Aquisição e processamento dos dados agrônômicos (altura de planta e massa seca/verde de raiz/dossel) e nematológicos

Um voo preliminar com o sensor RGB foi realizado na safra de soja 2017/18, safra anterior à utilizada nesta pesquisa (2018/19), para a escolha das reboleiras. As reboleiras foram escolhidas de modo a facilitar a locomoção para a coleta dos pontos e quanto maior fosse seu grau de severidade (clorose) detectado nas imagens da faixa do

visível na safra 2017/18. Um total de 5 reboleiras foram selecionadas para esta pesquisa, a fim de se ter uma quantidade significativa de amostras para a elaboração das regressões lineares.

Cada reboleira contava com 9 pontos de coletas. O primeiro ponto localizava-se no seu centro, de maneira que os outros para duas direções distintas. Para cada direção um ponto de coleta a 10, 20, 40 e 80 metros do centro da reboleira foi adotado (Figura 1). As direções foram definidas para que os pontos de uma reboleira não coincidisse com outra reboleira. Buscou-se englobar locais que tivessem uma alta, média e baixa população (insignificante) de *H. glycines*, bem como uma distribuição semelhante para *P. brachyurus*.

A cultivar utilizada no talhão foi a MONSOY 7198, plantada no dia 10 de outubro de 2018. Tal cultivar é considerada precoce, além de resistente às raças 1 e 3 de *H. glycines*.

As coletas e os voos foram realizados nos mesmos dias, durante o estágio R1 da soja. Adotou-se o estágio reprodutivo, por apresentar menor interferência do solo do que no vegetativo. Em cada ponto de coleta, amostras de solo foram retiradas a uma profundidade de 0 a 20 cm em forma de “V”, e em seguida o solo foi misturado até se tornar homogêneo. Raízes e parte aérea também foram extraídas para quantificar os nematoides *H. glycines* e *P. brachyurus* e medir a altura, massa seca e verde do dossel de 6 plantas, bem como a massa seca e verde de 6 raízes.

A extração de *P. brachyurus* e *H. dihystra* no solo e na raiz foi feita pelos métodos de Jenkins (1964), e Coolen e D’Herde (1972). Para juvenis de *H. glycines* de segundo estágio no solo e na raiz, utilizou-se metodologia adaptada de Jenkins (1964) e a de Alfenas e Mafia (2007). Para cistos (viáveis e inviáveis) no solo, usou-se a metodologia de Araújo (2009) adaptada e, para fêmea na raiz o método adaptado de Tihohod (2000).

2.4 Planejamento e realização do voo

Os voos foram feitos nos mesmos dias das coletas dos dados agrônômicos e nematológicos, de maneira que fosse executado sempre que possível entre as 10h00 e as 14h00, para minimizar efeitos da sombra gerados pela inclinação do sol sobre os objetos. Condições de ausência de nuvens é essencial para a obtenção de resultados estatísticos

condizentes com a real situação do dossel das plantas analisadas nas imagens.

Em todos os planos de voos elaborados, adotou-se uma sobreposição sempre maior que a recomendada, de 80 % lateral e longitudinal, a fim de evitar futuros problemas no ortomosaico. Além do mais, os resultados de vários testes de sobreposição durante os voos, indicam que, para drones, a recomendação é sempre maior do que aquelas utilizadas para voos tripulados. A sobreposição lateral é requerida para prevenir falhas entre faixas consecutivas, como resultado da deriva ocasionada por fortes ventos, inclinações do drone, variação de altura do voo e do comportamento do terreno. Além do mais, com o uso de uma sobreposição lateral maior, evita-se utilizar as bordas extremas das imagens, cuja distorção radial da lente costuma ser maior.

A sobreposição longitudinal é importante para a construção de mosaicos, geração de pontos de apoio por foto triangulação de imagens e obtenção de estereopares.

A altura de voo definida para todos os modelos de câmeras foi de 40 metros, com pixel de 1,2 centímetros (cm) para o sensor RGB do Phantom, de 3,2 cm para a Sentera e de 4 cm a Sequoia. Nem em todos os voos foi possível obter presença de um céu totalmente livre de nuvens. No entanto, os locais amostrados não foram atingidos por sombra de nuvens.

2.5 Processamento dos voos e extração de informações dos ortomosaico

Para a obtenção do ortomosaico das áreas sobrevoadas, através do software *Pix4D*, é necessário extrair algumas informações associadas a cada imagem, sendo elas os dados de calibração da câmera e o arquivo de log (coordenadas do centro de cada imagem e inclinações, ω , ϕ , κ). Como não havia painel de calibração, optou-se por trabalhar com o número digital dos pixels.

Por conseguinte, o ortomosaico é importado para o *Qgis*, de modo que as imagens com mais de uma banda possam ser fragmentadas em bandas individuais. Essas imagens são as NDVI e NDRE da Sentera, e o RGB do Phantom e da Sentera. A ferramenta utilizada para isto é a *Calculadora Raster*.

Para cada ponto de coleta, uma camada vetorial de 1 metro por 25 centímetros foi criada, para extrair o valor dos

pixels correspondentes em cada uma das bandas de cada sensor e obter a média para uma posterior análise estatística no software R. Tal dimensão definida, é adotada para utilizar somente a linha de plantio, sem interferência do solo. A média dos pixels foi obtida com o auxílio das ferramentas de *criação de grids* e de *estatística por zona*. Sombras das folhas foram eliminadas por meio de uma classificação supervisionada.

2.6 Análise estatística no RStudio

Em função da grande quantidade de variáveis envolvidas com esta pesquisa e a busca de uma estatística que pudesse explicar da melhor maneira possível o comportamento dos dados, foram utilizadas regressões lineares simples e múltiplas.

Na regressão linear simples, objetivou-se identificar a melhor banda espectral capaz de detectar a ocorrência de nematoide de cisto da soja e das lesões radiculares. Entretanto, a múltipla, teve o objetivo de identificar a melhor combinação de dados espectrais para chegar à melhor combinação possível de variáveis para a obtenção de um modelo matemático capaz de detectar os nematoides.

A regressão linear múltipla utilizada nesta pesquisa foi a *stepwise*, do tipo *forward* (passo à frente). Ela se inicia com um modelo de regressão linear simples, usando como variável auxiliar (dados agronômicos e/ou espectrais), a variável de maior coeficiente de correlação com a variável resposta (concentração de nematoide). O processo se sucede de maneira que uma nova variável auxiliar é colocada ao modelo, sendo interrompida quando o melhor modelo ocorre novamente.

Os parâmetros de entrada para aceitação das variáveis nos modelos de regressões lineares múltiplas e simples foram um nível de significância de 5 %. Para todos os modelos se aplicou o teste de normalidade dos resíduos e de homogeneidade da variância, a fim de se confiar no nível de significância obtido. O teste de independência mostrou que os dados não eram dependentes.

3. Resultados e discussão

Nas reboleiras analisadas, foram encontrados nematoides do tipo *H. glycines*, *P. brachyurus* e *H. dihystera*. Entretanto o último citado não foi incluído nas análises estatísticas, por ser um ectoparasita (Manso *et al.*, 1994) e não ser responsável a danos expressivos na cultura da soja (Antônio, 1992). O *H. dihystera* foi aquele que apresentou a maior população na maioria dos pontos, seja na raiz da soja ou no solo.

Como a presença predominante de nematoides no talhão era do tipo cisto das raças 1, 3 e 6, e a cultivar utilizada era resistente as raças 1 e 3, a população caiu drasticamente de uma safra para a outra. Isto fez que o *P. brachyurus* se tornasse mais representativo em números nos pontos de coletas, quando comparado com o nematoide de cisto.

Como resultado das análises estatísticas aplicada aos dados nematológicos, agronômicos e espectrais, têm-se o R^2 e o nível de significância das regressões lineares simples. Somente aqueles que foram significativos a 5 % foram incluídos na tabela. Todos apresentaram valores adequados de cp de Mallows e preditoras não correlacionadas entre si, além de terem os dados normais.

Tabela 1. Regressões lineares simples e seus valores de coeficiente de determinação e nível de significância para variáveis nematológicas e agronômicas em função das bandas de cada sensor

Variável dependente nematológica/agronômica (y)	Variável independente (x)	Equação da regressão	p-valor	R ²
Cisto inviável	615 nm	$y = -43,4171 + 0,9169 \times x$	0,0324	0,0812
	RedEdge - Sentera (720 nm)	$y = -25,9480 + 0,7000 \times x$	0,0414	0,0721
	Nir - NDRE (840 nm)	$y = -34,2038 + 0,4268 \times x$	0,0343	0,0791
	Vermelha - Phantom	$y = -87,5923 + 0,9258 \times x$	0,0035	0,1624
Heterodera na raiz	615 nm	$y = -4,9340 + 0,0827 \times x$	0,0212	0,0969
	Vermelha - Phantom	$y = -9,0733 + 0,0850 \times x$	0,0013	0,1977
Heterodera no solo	615 nm	$y = -55,8575 + 0,9485 \times x$	0,0069	0,1380
	Vermelha - Phantom	$y = -93,7538 + 0,8870 \times x$	0,0006	0,2226
Pratylenchus na raiz	RedEdge - Sentera (720 nm)	$y = 1286,9880 - 14,7590 \times x$	0,0071	0,1373
	Nir - NDRE (840 nm)	$y = 1374,3350 - 8,2390 \times x$	0,0110	0,1212

	RedEdge - Sequoia (735 nm)	$y = -632,8505 + 0,0290 \times x$	0,0245	0,0916
Pratylenchus solo	Nir - Sequoia (790 nm)	$y = 99,8122 - 0,0024 \times x$	0,0420	0,0716
	615 nm	$y = 32,5222 - 0,1373 \times x$	0,0181	0,1027
	Vermelha - Sentera (650 nm)	$y = 60,4020 - 0,3200 \times x$	0,0000	0,4222
Altura de planta	Azul - Sentera (446 nm)	$y = 48,6091 - 0,2725 \times x$	0,0224	0,0949
	Vermelha - Phantom	$y = 37,7422 - 0,1260 \times x$	0,0036	0,1616
	RedEdge - Sequoia (735 nm)	$y = 12,9613 - 0,0003 \times x$	0,0055	0,1464
Massa seca da parte aérea (MSA)	Nir - Sequoia (790 nm)	$y = 13,6545 - 0,0003 \times x$	0,0158	0,1078
	615 nm	$y = 3,9011 - 0,0203 \times x$	0,0459	0,0683
	586 nm	$y = 5,0940 - 0,0177 \times x$	0,0311	0,0827
	Vermelha - Sentera (650 nm)	$y = 7,5385 - 0,0431 \times x$	0,0003	0,2457
	Verde - Sentera (548 nm)	$y = 6,3636 - 0,0259 \times x$	0,0151	0,1095
	Azul - Sentera (446 nm)	$y = 7,4970 - 0,0537 \times x$	0,0087	0,1297
	Vermelha - Phantom	$y = 5,4740 - 0,0259 \times x$	0,0004	0,2368
	Verde - Phantom	$y = 5,3136 - 0,016 \times x$	0,0136	0,1133
	Azul - Phantom	$y = 4,4609 - 0,0214 \times x$	0,0009	0,2105
	Verde - Sequoia (550 nm)	$y = 3,7115 - 0,0001 \times x$	0,0364	0,0770
	615 nm	$y = 10,1170 - 0,0634 \times x$	0,0235	0,0931
	586 nm	$y = 13,5265 - 0,0531 \times x$	0,0192	0,1005
Massa seca da raiz (MSR)	Vermelha - Sentera (650 nm)	$y = 14,6932 - 0,0751 \times x$	0,0307	0,0832
	Verde - Sentera (548 nm)	$y = 14,7055 - 0,0596 \times x$	0,0467	0,0677
	Azul - Phantom	$y = 9,2664 - 0,0367 \times x$	0,0487	0,0661
	586 nm	$y = 7,2453 - 0,0237 \times x$	0,0261	0,0892
	Vermelha - Sentera (650 nm)	$y = 7,7008 - 0,0330 \times x$	0,0437	0,0702
Massa verde da parte aérea (MVA)	Verde - Sentera (548 nm)	$y = 9,9035 - 0,0414 \times x$	0,0024	0,1765
	Azul - Sentera (446 nm)	$y = 10,1784 - 0,0688 \times x$	0,0099	0,1251
	Vermelha - Phantom	$y = 6,6788 - 0,0249 \times x$	0,0116	0,1193
	Verde - Phantom	$y = 8,2020 - 0,0264 \times x$	0,0022	0,1797
	Azul - Phantom	$y = 5,9044 - 0,0230 \times x$	0,0074	0,1357
	Verde - Sequoia (550 nm)	$y = 5,6894 - 0,0001 \times x$	0,0085	0,1306
	615 nm	$y = 31,4041 - 0,2121 \times x$	0,0068	0,1385
Massa verde da raiz (MVR)	Vermelha - Sentera (650 nm)	$y = 57,2280 - 0,3434 \times x$	0,0002	0,2530
	Azul - Sentera (446 nm)	$y = 50,3016 - 0,3554 \times x$	0,0292	0,0851
	Vermelha - Phantom	$y = 40,8630 - 0,2072 \times x$	0,0003	0,2461
	Azul - Phantom	$y = 26,3539 - 0,1318 \times x$	0,0113	0,1202

A banda 615 nm e a Vermelha do Phantom foram significativas para todas as situações com os nematoides de cisto da soja. No entanto, a banda Vermelha foi a que melhor explicou a variabilidade dos dados para juvenis no solo e na raiz, bem como cistos inviáveis (Tabela 1). Tal resultado é semelhante ao resultado da pesquisa de Bajwa *et al.* (2017) na soja, referente ao estudo da correlação simples das bandas com nematoide de cisto e com a síndrome da morte súbita, uma vez que apresentou melhores resultados na faixa do visível (com exceção do azul) do que no infravermelho próximo e no bordo do vermelho.

Apesar do R^2 de 0,1977 da banda Vermelha do Phantom para a detecção de *H. glycines* na soja ser baixo,

apresentou resultados melhores do que sensores mais caros dos quais possuem bandas além da região do visível.

Com exceção das bandas RedEdge (720 nm) e Nir - NDRE (840 nm), as duas da Sentera, situação que não tem relação direta com o dano detectado no dossel da soja pelo sensoriamento remoto, por ter ocorrido apenas para cisto inviável no solo, todos os valores significativos para cistos são da faixa do visível.

Como a população de juvenis de cisto na raiz da soja presente na maioria dos pontos de coleta eram praticamente insignificantes para provocarem danos visíveis ao dossel da planta, o maior dano nesta pesquisa é atribuído ao *P. brachyurus*. A alta predominância das raças 1 e 3 no talhão

de estudo e a utilização da cultivar de soja resistente, justificam em parte, a maior presença de juvenis no solo do que na raiz, bem como a grande quantidade de cisto eclodidos no solo, dos quais liberaram nematoides que não conseguiram ultrapassar a resistência da cultivar.

Para *P. brachyurus* na raiz as bandas significativas foram diferentes daquelas para juvenis de cisto na raiz, o que indica que bandas diferentes possuem a capacidade de detectar patógenos diferentes, sendo necessário a utilização da faixa do infravermelho próximo ou do bordo do vermelho para a detecção de *P. brachyurus* na raiz. Sankaran *et al.* (2010) também constataram isso no estudo de detecção de doenças em plantas usando diferentes bandas.

Pelo fato de o dano presente na planta estar associado de forma direta com os nematoides que estão nas raízes e não no solo, as equações de grande interesse da regressão linear simples para cisto é aquela que utiliza a banda Vermelha do Phantom e para nematoide das lesões radiculares a RedEdge da Sentera, já que têm o melhor valor de R² e p-valor (Tabela 1).

Para o caso do *H. glycines*, quando se aumenta o número de juvenis na raiz, a planta passa a refletir maior quantidade de energia da faixa do vermelho, o que indica uma diminuição da massa da parte aérea e da raiz, bem como uma

diminuição da altura da planta, já que a planta está estressada. Alguns trabalhos também mostram que plantas doentes tendem a refletir mais o vermelho (Martins *et al.*, 2017; Bajwa *et al.*, 2017; Mahlein *et al.*, 2012), não sendo, no entanto, uma regra para todas as situações (Cui *et al.*, 2009). As próprias equações lineares simples dos dados agrônômicos (massa verde e seca da raiz; massa verde e seca da parte aérea; altura de planta) mostram que quando maior a quantidade de vermelho refletido, menor o valor das variáveis peso e altura.

Para o *P. brachyurus* na raiz, a banda de melhor resultado na regressão simples em R² foi a RedEdge (720 nm) da Sentera, de modo que a planta doente apresenta uma absorção maior no bordo do vermelho.

Quando se utilizada um modelo matemático, elaborado por meio da regressão linear múltipla de *stepwise* para a detecção do *P. brachyurus* e *H. glycines*, percebe-se uma grande melhora no R² e no p-valor com relação as regressões lineares simples. Para o *P. brachyurus*, a faixa espectral de maior contribuição foi a faixa espectral fora do visível e para *H. glycines* a faixa do visível. O p-valor apresentado é o maior encontrado entre as variáveis independentes (Tabela 2).

Tabela 2. Modelo matemático obtido pela técnica de *stepwise* para a detecção de *P. brachyurus* e *H. glycines*

Variável dependente	Modelo matemático	p-valor	R ²
Heterodera na raiz	$8,4733 + (-0,0988 \times \text{Vermelha_Sentera}) + (0,1330 \times \text{Vermelha_Phantom}) + (-0,1292 \times \text{Verde_Phantom}) + (0,1081 \times \text{Azul_Phantom})$	0,0005	0,3266
Pratylenchus na raiz	$1522,837 + (-20,703 \times \text{RedEdge - Sentera}) + (37,834 \times \text{Vermelha - NDVI}) + (-24,128 \times \text{Nir - NDVI})$	0,0003	0,3194

4. Conclusões

O modelo matemático aqui desenvolvido para a detecção de *H. glycines*, *P. brachyurus*, apresentou resultados melhores do que as regressões lineares simples. Para a detecção do nematoide de cisto da soja, a faixa do visível é a mais adequado, o que beneficia a agricultura de precisão por ser um sensor de baixo custo. Todavia para nematoide das lesões radiculares o sensor a ser utilizado é de custo maior já

que deve ter além da faixa do vermelho, a faixa do bordo do vermelho ou do infravermelho próximo no sensor (Tabela 2).

Para a regressão linear simples a banda Vermelha do Phantom foi a melhor para a detecção de *H. glycines* e a RedEdge da Sentera e Nir da Sequoia para o *P. brachyurus* na raiz e solo respectivamente. (Tabela 1).

Estatisticamente, o estádio R1 da soja e a faixa espectral desses sensores aplicados a esta pesquisa, não apresentam um R² alto, porém um bom p valor para uma

detecção de *H. glycines* e *P. brachyurus*, ao longo da área experimental analisada. Recomenda-se utilizar estes mesmos sensores em outros estádios vegetativos para verificar a melhor época para a detecção, ou mesmo outras faixas espectrais.

Referências bibliográficas

Alfenas, AC, 2007. Métodos em fitopatologia. Editora UFV.

Antônio, H, 1992. Fitonematoides na cultura da soja. Informe Agropecuário. 16, 60-65.

Araújo, FG., Rocha, MR, 2009. Quantificação de machos e fêmeas de *Heterodera glycines* (Ichinohe, 1952) em cultivares de soja resistentes e suscetíveis. 2009.

Ashourloo, D., Matkan, AA., Huete, A., Aghighi, H., Mobasheri, MR, 2016. Developing an index for detection and identification of disease stages. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 13, 851-855.

Bajwa, SG., Rupe, JC., Mason, J, 2017. Soybean disease monitoring with leaf reflectance. Remote Sensing. 9.

Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., Bareth, G, 2014. Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. Remote Sensing. 6, 10395-10412.

Blevins, DG., Dropkin, VH., Luedders, VD, 1995. Macronutrient uptake, translocation, and tissue concentration of soybeans infested with the soybean cyst nematode and elemental composition of cysts isolated from roots. Journal of plant nutrition. 18, 579-591.

Cho, MA., Debba, P., Mutanga, O., Dudeni-Tlhone, N., Magadla, T., Khuluse, SA, 2012. Potential utility of the spectral red-edge region of SumbandilaSat imagery for assessing indigenous forest structure and health. International journal of applied earth observation and Geoinformation. 16, 85-93, 2012.

Colomina, I., Molina, P, 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of photogrammetry and remote Sensing. 92, 79-97.

Concibido, VC., Diers, BW., Arelli, PR, 2004. A decade of QTL mapping for cyst nematode resistance in soybean. Crop Science. 44, 1121-1131.

Coolen, WA., D'Herde, CJ, 1972. A method for quantitative extraction of nematodes from plant tissue. State Agricultural Research Centre, Gent, Belgium.

Cui, D., Zhang, Q., Li, M., Zhao, Y., Hartman, GL, 2009. Detection of soybean rust using a multispectral image sensor. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety. 3, 49-56.

Dias, WP., Garcia, A., Silva, JFV., Carneiro, GES, 2010. Nematoides em soja: identificação e controle. Embrapa Soja-Circular Técnica (INFOTECA-E).

Dias-Arieira, CR., Chiamolera, FM, 2011. Cresce a incidência de nematoides em milho e soja. Revista Campo e Negócios. 97,18-21.

Gebbers, R., Adamchuk, VI, 2010. Precision agriculture and food security. Science. 327, 828-831.

Godoy, CV., Almeida, AMR., Soares, RM., Seixas, CDS., Dias, WP., Meyer, MC., Costamilan, LM., Henning, AS, 2016. Doenças da soja. Manual de fitopatologia. 2, 657-676.

Goulart, AMC, 2008. Aspectos gerais sobre nematoides das lesões radiculares (Gênero *Pratylenchus*). Embrapa Cerrados-Documentos.

Heath, WL., Haydock, PPJ., Wilcox, A., Evans, K, 2000. The potential use of spectral reflectance from the potato crop for remote sensing of infection by potato cyst nematodes. Aspects of Applied Biology. 60, 185-188.

Hillnhütter, C., Mahlein, AK., Sikora, RA., E.C. Oerke, EC, 2012. Use of imaging spectroscopy to discriminate symptoms caused by *Heterodera schachtii* and *Rhizoctonia solani* on sugar beet. Precision Agriculture. 13, 17-32.

Hunt, ER., Doraiswamy, PC., McMurtrey, JE., Daughtry, CST., Perry, EM., Akhmedov, B, 2013. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 21, 103-112.

Hymowitz, T, 1970. On the domestication of the soybean. Economic botany. 24, 408-421.

Inomoto, MM, 2008. Importância e manejo de *Pratylenchus brachyurus*. Revista Plantio Direto. 108, 4-9.

Inomoto, MM., Siqueira, KMS., Machado, ACZ, 2011. Sucessão de cultura sob pivô central para controle de fitonematoides: variação

- populacional, patogenicidade e estimativa de perdas. *Tropical Plant Pathology*. 36, 178-185.
- Jannoura, R., Brinkmann, K., Uteau, D., Bruns, C., Joergensen, RG, 2015. Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter. *Biosystems Engineering*. 129, 341-351.
- Jenkins, WR, 1964. A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. *Plant disease repórter*. 48, 288-300.
- Laudien, R, 2005. Entwicklung eines GIS-gestützten schlagbezogenen Führungs informations systems für die Zuckerwirtschaft. Universität Hohenheim. <http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2005/87>. (Acesso em 26 de março de 2019).
- Mahlein, AK., Oerke, EC., Steiner, U., Dehne, HW, 2012. Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection. *European Journal of Plant Pathology*. 133, 197-209.
- Mahlein, AK., Rumpf, T., Welke, P., Dehne, HW., Plumer, L., Steiner, U., Oerke, EC, 2013. Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. *Remote Sensing of Environment*. 128, 21-30.
- Manso, EC., Tenente, RC., Ferraz, LCCB., Oliveira, RS., Mesquita, R, 1994. Catálogo de nematoides fitoparasitos encontrados associados a diferentes tipos de plantas no Brasil. EMBRAPA-CENARGEM/EMBRAPA-SPI.
- Marcassa, LG., Gasparoto, MCG., Belasque, J., Lins, EC., Nunes, FD., Bagnato, VS, 2006. Fluorescence spectroscopy applied to orange trees. *Laser physics*. 16, 884-888.
- Marcussi, AB., Bueno, CRP., Miqueloni, DP., Arraes, CL, 2010. Use of index vegetation for the geographic information system. *Caminhos de geografia*. 11.
- Martinelli, F., Scalenghe, R., Davino, S., Panno, S., Scuderi, G., Ruisi, P., Villa, P., Stroppiana, D., Boschetti, M., Goulart, LR., Davis, CE., Dandekar, AM, 2015. Advanced methods of plant disease detection. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 35, 1-25.
- Martins, GD., Galo, MLBT., Vieira, BS, 2017. Detecting and mapping root-knot nematode infection in coffee crop using remote sensing measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 10, 5395-5403.
- Mitchum, MG., Wrather, JA., Heinz, RD., Shannon, JG., Danekas, G, 2007. Variability in distribution and virulence phenotypes of *Heterodera glycines* in Missouri during 2005. *Plant disease*. 91, 1473-1476.
- Moshou, D., Bravo, C., West, J., Wahlen, S., McCartney, A., Ramon, H, 2004. Automatic detection of 'yellow rust' in wheat using reflectance measurements and neural networks. *Computers and electronics in agriculture*. 44, 173-188.
- Mulla, DJ, 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems engineering*. 114, 358-371.
- Niblack, TL, 2005. Soybean cyst nematode management reconsidered. *Plant disease*. 89, 1020-1026.
- Niblack, TL., Colgrove, AL., Colgrove, K., Bond, JP, 2008. Shift in virulence of soybean cyst nematode is associated with use of resistance from PI 88788. *Plant Health Progress*. 9, 29.
- Nutter, FW., Tylka, GL., Guan, J., Moreira, AJD., Marett, CC., Rosburg, TR., Basart, JP., Chong, CS, 2002. Use of remote sensing to detect soybean cyst nematode-induced plant stress. *Journal of Nematology*. 34, 222-231.
- Oumar, Z., Mutanga, O., Ismail, R, 2013. Predicting *Thaumastocoris peregrinus* damage using narrow band normalized indices and hyperspectral indices using field spectra resampled to the Hyperion sensor. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 21, 113-121.
- Peng, DL., Peng, H., Wu, DQ., Huang, WK., Ye, WX., Cui, JK, 2016. First report of soybean cyst nematode (*Heterodera glycines*) on soybean from Gansu and Ningxia China. *Plant disease*. 100, 229-229.
- Qin, J., Burks, TF., Ritenour, MA., Bonn, WG, 2009. Detection of citrus canker using hyperspectral reflectance imaging with spectral information divergence. *Journal of food engineering*. 93, 183-191.
- Sankaran, S., Mishra, A., Ehsani, R., Davis, C, 2010. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Computers and Electronics in Agriculture*. 72, 1-13.
- Shafri, HZM., Hamdan, N, 2009. Hyperspectral imagery for mapping disease infection in oil palm plantation using vegetation indices and red edge techniques. *American Journal of Applied Sciences*. 6, 1031-1035.
- Sharma, RD., Silva, DB., Castro, LHR, 1997. Efeito de *Helicotylenchus dihystra* sobre trigo e ervilha cultivados em solos

provenientes de tres sistemas de preparo. *Nematologia Brasileira*. 17, 85-95.

Soma Brasil – Sistema de Observação e Monitoramento da Agricultura no Brasil. <http://mapas.cnpem.br/somabrasil>. (Acessado em 06 de março de 2019).

Tihohod, D., 2000. *Nematologia agrícola aplicada*. 2ª ed. Jaboticabal: Funep.

Tylka, GL., Mullaney, MP, 2018. Soybean cyst nematode-resistant soybean varieties for Iowa. Iowa State University.

Wang D, 2016. Distribution, virulence phenotypes and genetic structure of *Heterodera glycines* in China. In: Proceeding of 2016 Soybean Cyst Nematode Conference; 2016 Dec 13–15; Coral Gables, FL, USA. St. Paul: APS Press. 1–9.

Wang, HM., Zhao, HH., Chu, D, 2015. Genetic structure analysis of populations of the soybean cyst nematode, *Heterodera glycines*, from north China. *Nematology*. 17, 591-600.

Wrather, JL., Koenning, SR, 2006. Estimates of disease effects on soybean yields in the United States 2003 to 2005. *Journal of nematology*. 38, 173-180.

Zhang, H., Song, BH, 2017. RNA-seq data comparisons of wild soybean genotypes in response to soybean cyst nematode (*Heterodera glycines*). *Genomics data*. 14, 36-39.

Zhang, H., Song, Q., Griffin, JD., Song, BH, 2017. Genetic architecture of wild soybean (*Glycine soja*) response to soybean cyst nematode (*Heterodera glycines*). *Molecular genetics and genomics*. 292, 1257-1265.

CAPÍTULO II

(Normas de acordo com a revista ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing)

Detecção de nematoides na cultura da soja no estágio R3 por meio de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs)

Detection of nematodes in soybean crop at R3 stage by Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)

Resumo: O consumo global de oleaginosas vem crescendo progressivamente nas últimas cinco safras, representando a soja 60% desse setor. Com isto, a fim de manter uma produção em alta na região de Rio Verde – GO em frente aos problemas fitopatológicos, esta pesquisa teve como objetivo definir a melhor faixa espectral para a detecção de *H. glycines* e *P. brachyurus* por meio de regressões lineares simples na cultura da soja no estágio R3, bem como a elaboração de modelos matemáticos por meio de regressões lineares múltiplas. Para isto, coletas de solo e raiz foram feitas na área experimental, bem como um voo com o sensor da Sentera. Os dados coletados foram utilizados para a elaboração das regressões e para a validação de 2 modelos matemáticos. Foram observados valores significativos na regressão linear simples somente para cistos, isto na faixa do visível, com um bom valor de R^2 para a banda Verde, Vermelha e de 568 nm, a cistos inviáveis. Quando se trabalha com a estatística de *stepwise* resultados melhores são encontrados para o *H. glycines*, que passa a apresentar um R^2 de 0,7430 e o *P. brachyurus* passa a ser detectado. A partir do modelo matemático obtido com a regressão linear múltipla para cisto inviáveis, com um R^2 de 0,7430, é possível detectar a distribuição espacial dos nematoides pelo talhão de soja, a fim de realizar um manejo localizado, otimizando as aplicações. Também é possível bons resultados utilizando o modelo matemático obtido por meio da regressão linear simples.

Palavras chaves: Drone, sensoriamento remoto, agricultura de precisão, *Heterodera glycines*, *Pratylenchus brachyurus*

Abstract: Global consumption of oilseeds has been growing steadily in the last five harvests, representing 60% soybeans in this sector. Thus, in order to maintain a high production in the region of Rio Verde - GO against the phytopathological problems, this research aimed to define the best spectral range for the detection of *H. glycines* and *P. brachyurus* by linear regressions. R3 soybean cultivation, as well as the elaboration of mathematical models through multiple linear regressions. For this, soil and root collections were made in the experimental area, as well as a flight with the Sentera sensor. The collected data were used for the elaboration of the regressions and for the validation of 2 mathematical models. Significant values were observed in the simple linear regression only for cysts, that is, in the visible range, with a good R^2 value for the Green, Red and 568 nm band, to unviable cysts. When

working with the stepwise statistics better results are found for *H. glycines*, which now has an R^2 of 0.7430 and *P. brachyurus* is detected. From the mathematical model obtained with the multiple linear regression for non-viable cysts, with an R^2 of 0.7430, it is possible to detect the spatial distribution of nematodes by soybean field, in order to perform a localized management, optimizing the applications. Good results are also possible using the mathematical model obtained by simple linear regression.

Key words: Drone, remote sensing, precision farming, *Heterodera glycines*, *Pratylenchus brachyurus*

1. Introdução

O consumo global de oleaginosas vem crescendo cada vez mais desde as últimas cinco safras, representando a soja 60% desse setor. Apesar de estar prevista uma queda de 1 % na produção de oleaginosas da safra 2018/19 para a safra 2019/20, o Brasil deverá ser o principal exportador em 2019/20, além de ultrapassar os Estados Unidos (USDA, 2019). Entre os estados brasileiros, Goiás obteve uma produção de 11.312.800 toneladas no ano safra de 2018, contra 117.833.492 toneladas do país, ou seja, 9,6% da produção nacional (SIDRA, 2019).

Porém, assim como qualquer outra cultura, a soja sofre com a redução em sua produtividade em função do estabelecimento de parasitas. Entre eles temos os dois principais da área de estudo, conhecidos como nematoide de cisto da soja, o *Heterodera glycines* e o nematoide das lesões radiculares, o *Pratylenchus brachyurus*.

O *H. glycines* é um patógeno que pode sobreviver no solo por muitos anos, mesmo sem a presença de um hospedeiro. É possível graças ao cisto, que é um meio de sobrevivência, em condições inadequadas aos juvenis (Masonbrink et al., 2019). Os sintomas são parecidos com a deficiência de nutriente e água (Blevins et al., 1995), o que prejudica no desenvolvimento da planta. Como consequência a soja poderá exibir um crescimento atrofiado, ocorrência de clorose, redução na produtividade e até mesmo ocorrer a morte em função do número de nematoides (Ali et al., 2017; Ali et al., 2015; Bajwa et al., 2017; Niblack, 2005; Song et al., 2017; Zhang et al., 2017).

Como sintomas semelhantes ao *H. glycines*, o *P. brachyurus* um nematoide endoparasita migratório (Homiak et al., 2017), causa o escurecimento do sistema radicular principal, diminuição do porte da planta, diminuição na quantidade e tamanho de grãos, e clorose no dossel da planta (Gomes et al., 2014; Henning et al., 2014).

Também foi constatado por meio de análises nematológicas na área de pesquisa deste trabalho, que plantas com altas populações de *H. glycines* e *P. brachyurus* podem não exibir sintomas perceptíveis ao olho humano.

Uma das formas que vem sendo utilizada para evitar grandes perdas na produtividade, é o uso de rotação de culturas não hospedeiras, de cultivares resistentes aos nematoides e aplicação nematicidas químicos e biológicos (Dutta et al., 2019). Entretanto a aplicação de nematicidas por toda área apresenta um custo muito alto, o que de certa forma incentiva a buscas de medidas alternativas para o mapeamento pontual da ocorrência de reboleiras.

A agricultura de precisão é uma ferramenta adequada para o cenário de mapeamento das reboleiras de nematoides, já que integra ferramentas como: Sistema de navegação global por satélite (GNSS), Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Sensoriamento Remoto (SR), Rede de Sensores sem Fio (RSSF) e demais técnicas, equipamento e software para a obtenção de informações úteis a agricultura (López-Riquelme et al., 2017; López et al., 2015; Khanal et al., 2017; Zhang, 2016). Ela permite a tomada de decisão, monitoramento constante das lavouras, diminuição de custos, aumento de produtividade e ações de controle inteligentes.

Deteção precisa e o mapeamento de pontos problemáticos em um talhão são produtos obtidos com o uso do SR e SIG. Os últimos permitem melhores práticas de manejo, com tratamento localizado e dentro do timing da cultura. Diversos trabalhos mostram a capacidade de detecção da distribuição espacial de um patógeno, por meio de termografia, espectroradiômetros, sensores multiespectrais e hiperespectrais na resposta espectral do dossel das plantas (Ashourloo et al., 2016; Beck et al., 2015; Martinelli et al., 2015; Joalland et al., 2017; Bajwa et al., 2017; Masri et al., 2017; Martins et al., 2017; Martins; Galo, 2015; Schmitz et al., 2004).

O SR orbital permite um diagnóstico de áreas de grandes dimensões em um curto intervalo de tempo e a determinação dos níveis de severidade de plantas infectadas por nematoides (Martins; Galo, 2015; Martins et al., 2017). Com a miniaturização dos sistemas de sensores, os drones permitem o levantamento a tempo para o mapeamento e detecção de patógenos em grandes áreas (Backoulou et al., 2015; Yang et al., 2016; McDonald et al., 2016), do mapeamento de respostas de fertilidade do solo (Schut et al., 2018) e estimativas produtividade (Jeong et al., 2018).

Para o cenário de infestação presente nas áreas de estudo desta pesquisa os mapas de caracterização de sanidade da soja obtidas por meio dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), associados a amostragens direcionadas, podem levar a métodos rápidos e confiáveis para a detecção georreferenciada dos estados de infestação dos nematoides. Com isto, esta pesquisa teve como objetivo definir a melhor

faixa espectral para a detecção de *H. glycines* e *P. brachyurus* por meio de regressões lineares simples, na cultura da soja no estágio R3, bem como a elaboração de modelos matemáticos por meio de regressões lineares múltiplas.

2. Material e métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

Os municípios de Rio Verde e Montividiu, localizados no estado de Goiás e em locais onde suas terras são valorizadas pela boa fertilidade e o alto índice de chuvas, apresentam boas condições de topografia para o manejo de grãos. Entretanto, o talhão localizado ao sul do estado, é marcado pela presença de nematoides do tipo *H. glycines*, *P. brachyurus* e *Helicotylenchus dihystera*, comprovado pelas análises nematológicas realizadas pelo laboratório de nematologia do Instituto Federal Goiano (Figura 1).

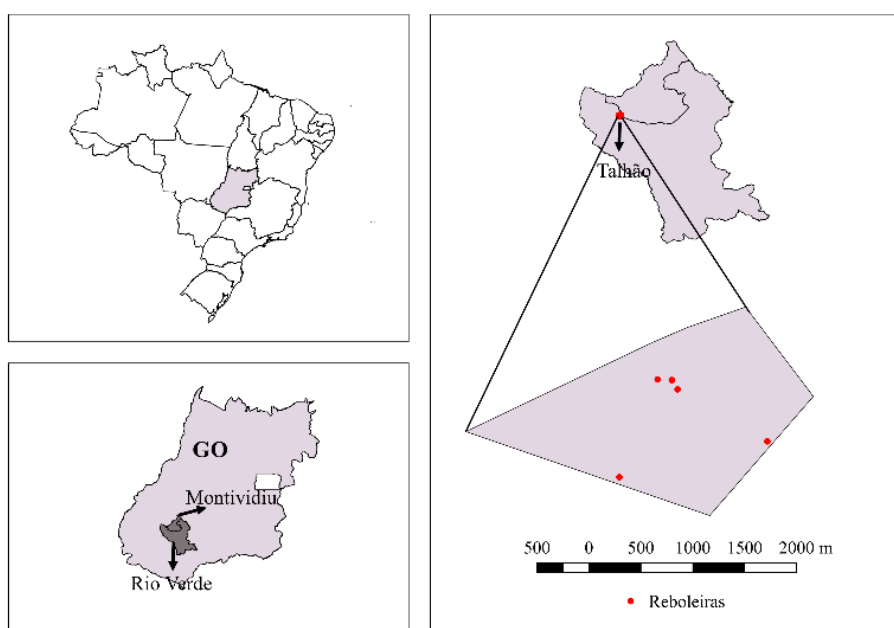


Figura 1. Localização da área experimental, bem como das reboleiras

A área experimental, o talhão, é caracterizado por uma topografia com uma inclinação menor que 5 % para o sentido sudeste. Predomina-se um plantio direto com o uso de piloto automático. A principal localização das reboleiras se encontram em uma antiga estrada que cortava o talhão, do qual o último possui uma área de aproximadamente 330 hectares.

2.2 Materiais

Sabendo que foi amostrado um total de 45 pontos para a elaboração de regressões, e 60 pontos para validação de

dois modelos matemáticos, um de regressão linear simples e outro de regressão linear múltipla, foi utilizado um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) conhecido como Inspire 2 e um sensor modificado, com um total de 12 bandas espectrais para sobrevoar a área experimental.

A câmera embarcada no Inspire 2 conhecido como Sentera, possui 8 sensores, sendo alguns da região do visível e outros fora dessa faixa espectral. Tem-se então a banda com o comprimento de onda de 615, 586, 661, 825 e 775 nanômetros

(nm), um sensor de composição R (650 nm), G (548 nm), B (446 nm), um sensor NDVI contendo uma banda Vermelha (625 nm) e uma Nir (850 nm) e o sensor NDRE contendo outra banda Nir (840 nm) e uma conhecida como RedEdge (720 nm).

Os 45 pontos amostrais, mapeadas por meio de um ortomosaico georreferenciado da safra 2017/18, foram identificadas em campo através de uma folha branca para que após o voo fossem localizadas precisamente. Para chegar aos locais a serem amostrados um garmin etrex 20 foi utilizado. Para a realização do voo sobre as reboleiras foi usado o aplicativo *FieldAgent*, o software *Pix4d* para obtenção do ortomosaico e o software *Qgis* para a extração das informações dos pixels das áreas amostradas e elaboração de mapas. O software estatístico *Minitab* para as análises estatísticas e a validação dos dados.

2.3 Coleta de amostras nematológicas

O talhão de soja utilizado para a realização das amostragens de solo e raiz foi plantado no dia 10 de outubro

de 2018 com a cultivar precoce MONSOY 7198, resistente às raças 1 e 3 do nematoide de cisto da soja. O histórico da área era conhecido por conter a presença de *H. glycines* das raças 1,3 e 6, *P. brachyurus* e *H. dihystra*.

Foram coletadas um total de 105 amostras nematológicas, sendo 45 para o cálculo das regressões, e 60 para a validação dos modelos matemáticos, constando 3 subamostras para cada ponto. As amostras de validação são referentes a uma área experimental contendo 60 parcelas. Todas as coletas foram obtidas com no máximo um dia de diferença.

As amostras para o a criação dos modelos de regressões lineares simples e múltiplos foram divididas em 5 reboleiras, de forma que um ponto de coleta era no centro e os outros em duas direções distintas, a 10, 20, 40 e 80 m do centro da reboleira (Figura 2).

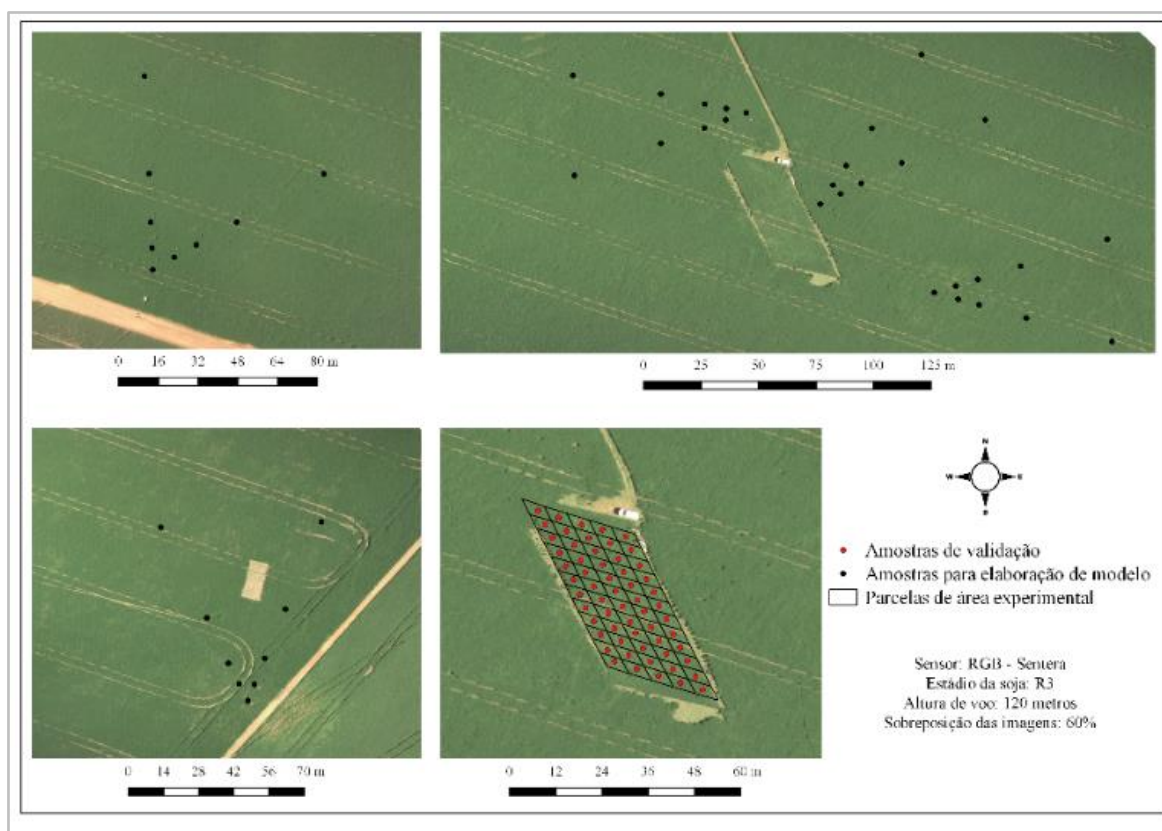


Figura 2. Pontos fora das parcelas da área experimental compõem as amostras utilizadas para a elaboração das regressões lineares e pontos dentro das parcelas para a validação das regressões.

As coletas foram realizadas durante o estágio R3 da soja a uma profundidade de 0 a 20 cm. Tal estágio foi encolhido em função da diminuição da interferência do solo no valor dos pixels utilizados nas análises estatísticas. Para cada ponto, além do solo, foi coletada a raiz da cultivar. Por conseguinte, as amostras foram encaminhadas para o laboratório de Fitopatologia do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, para a extração de juvenis, fêmeas e cistos e identificação dos nematoides. As raças de *H. glycines*, foram identificadas em outro laboratório, sendo elas encaminhadas pelo produtor que cedeu o talhão para a pesquisa.

A extração de juvenis *P. brachyurus*, *H. dihystera* e *H. glycines* no solo e na raiz foram realizadas pelos métodos de Jenkins (1964), Coolen & D’Herde (1972) e Alfenas & Mafia (2007). Para cistos (viáveis e inviáveis) no solo a metodologia de Araújo (2009) adaptada e para fêmea na raiz o método adaptado de Tihohod (2000).

2.4 Planejamento do voo, obtenção do ortomosaico

O voo foi realizado nos mesmos dias das amostragens, entre as 10:00 e as 14:00 horas, de modo que todas os pontos fossem sobrevoados. No aplicativo *FieldAgent* foi definido uma sobreposição de 60 % entre frente e a lateral das imagens, a uma altura de voo de 120 metros, para que uma bateria fosse suficiente para sobrevoar todas as reboleiras. Condições heterogênea de luminosidade durante a captura de fotografias foi evitada, uma vez que alteram a resposta espectral das plantas e os resultados das análises estatísticas (Aboutalebi et al., 2018; Yi-Ta et al., 2016), mesmo com o uso do sensor de irradiância.

Antes do voo nas reboleiras, alguns alvos em branco foram colocados nos pontos a serem amostrados a fim de facilitar a identificação na imagem. É importante que a informação da imagem seja extraída o mais próximo possível da coleta de solo e raiz, tal que a resposta espectral é referente ao que está presente no local da planta coletada. Para o caso da área experimental as parcelas foram delimitadas por alvos em suas extremidades.

A obtenção do ortomosaico, foi por meio do processamento fotogramétrico no software *Pix4d*, com o fornecimento dos parâmetros de orientação interior e exterior da câmera e da nuvem de pontos calculada (Martinez-Rubi et

al., 2017). Logo, não foi utilizado painel de calibração para o cálculo de reflectância.

2.5 Extração de informações das imagens e elaboração do mapa de predição

Através do ortomosaico, em cada planta referente aos pontos de coleta dos dados nematológicos, informações da quantidade de luz refletida pelo dossel das folhas foram extraídas para que o valor fosse utilizado nas regressões lineares simples e múltiplas. A extração para os 45 pontos foi realizada em cada uma das 12 bandas da Sentera com a ferramenta *identificar feições*. A última permite que com apenas um clique na imagem, o valor do pixel seja expresso.

Para cada uma das 45 amostras das reboleiras, o valor de luz refletida pelo dossel, utilizado nas análises estatísticas de regressões lineares simples e múltiplas, foi consequência de uma média de 10 pixels extraídos pela opção *identificar feições*, sem a presença de sombra e solo.

Quanto a obtenção do valor estimado de cistos inviáveis do mapa de predição, foi considerada o pixel coincidente ou sobreposto ao ponto de validação localizado ao centro das parcelas. O mapa de predição da regressão linear simples e múltipla foi gerada através da *calculadora raster*, com a equação matemática de cada uma das duas melhores regressões para cistos inviáveis.

2.5 Análise estatística e validação de dois modelos matemáticos

As correlações realizadas foram entre os dados nematológicos e o valor do pixel das imagens. Foram analisadas relações entre juvenis, cistos e fêmeas com a quantidade de luz refletida pelo dossel das plantas para cada um dos pontos e das bandas.

Entretanto, o *H. dihystera* não foi incluído nas análises estatísticas por ser considerado um ectoparasita que não causa danos expressivos na cultura da soja (Manso et al., 1994; Antônio, 1992).

Para as regressões lineares simples, somente aquelas significativas a 5% foram consideradas. O teste de normalidade foi aplicado aos resíduos, bem como o de homogeneidade da variância.

Para regressões lineares múltiplas, foi utilizada a metodologia de *stepwise* do tipo *forward* (passo à frente), cuja se inicia com uma regressão linear simples, de forma que

novas variáveis não sendo inseridas no modelo de acordo com o nível de significância adotado (Chatterjee; Hadi, 2015). Somente é finalizado quando o melhor modelo matemático encontrado volta a se repetir. Foi aceito no modelo um p-valor de 0,05, variáveis independentes não correlacionadas entre si e com o menor cp de Mallows possível. Por fim também foi feito o teste de normalidade dos resíduos e de homogeneidade da variância.

Para a validação do modelo de predição, a partir dos dados medidos e estimados, foi calculado o erro médio quadrático (RMSE) e o ERRO (%) (Shirani et al., 2018). O RMSE e o ERRO (%) são obtidos através da equação 1 e 2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xi - x med)^2}{n}} \quad (1)$$

$$ERRO (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xi - x med)^2}{n}} \times \frac{100 \times n}{\sum_{i=1}^n x med} \quad (2)$$

em que xi e $x med$ representam o valor estimado e medido in situ de cistos inviáveis em 100 cm³ de solo, respectivamente; e n é o número de amostras.

3. Resultados e discussão

Dos três tipos de nematoides encontrados nas reboleiras, o *P. brachyurus* e *H. dihystra*, foram os mais populosos nas amostragens de solo e raiz, sendo o *H. glycines* das raças 1, 3 e 6 o menos expressivo, devido o uso de uma cultivar resistente as raças 1 e 3.

Para detectar a presença de *H. glycines*, na área experimental, com o uso de regressões lineares simples, a faixa do visível mostrou bons resultados de R² e p-valor (Tabela 1).

Tabela 1. Regressões lineares simples para a detecção de *H. glycines*

Variável nematológica	Banda	Modelos de regressão linear		
		R ²	p-valor	Equação
Cisto inviável	Vermelha	0,6326	<0,001	y = 1,7228 × Vermelha - 166,08
	Verde	0,5888	<0,001	y = 1,2185 × Verde - 153,67
	615 nm	0,1439	0,010	y = 0,7246 × 615 nm - 33,691
	586 nm	0,6499	<0,001	y = 1,5813 × 586 nm - 193,81
	661 nm	0,1346	0,013	y = 0,5859 × 661 nm - 26,038
Cisto viável	Vermelha	0,3481	<0,001	y = 0,2104 × Vermelha - 20,267
	Verde	0,3198	<0,001	y = 0,1488 × Verde - 18,754
	586 nm	0,3766	<0,001	y = 0,1994 × 586 nm - 24,463
	Vermelha - NDVI	0,0880	0,048	y = - 0,054 × Vermelha (625 nm) + 4,0806

Todavia, o *P. brachyurus* não pode ser detectado pelo sensor aqui utilizado no estádio R3 da soja com o uso de uma regressão linear simples, já que nenhum resultado foi significativo a 5%. Entretanto tem-se a faixa espectral de 586 nm que apresentou um p-valor menor que 0,001 e um R² de 0,6499, para cistos inviáveis presentes no solo. Apesar dos cistos estarem no solo, eles estavam eclodidos, o que indica que os sintomas provocados em estádios anteriores pela penetração do nematoide da raça 6 nas raízes da soja tenha contribuído para boa detecção em R3. Bons resultados também foram encontrados nas bandas Vermelha e Verde do sensor RGB da Sentera (Tabela 1), resultado semelhantes a

Bajwa et al. (2017), que também mostrou alta correlação de 500 nm a 700 nm para o nematoide de cisto da soja.

Plantas sadias de soja, apresentam uma maior absorção do Vermelho, do Verde, na faixa de 615 nm, 586 nm e 661 nm do que as plantas afetadas pelo nematoide de cisto da soja. Logo, quanto maior a quantidade de cisto inviável maior é a quantidade de luz refletida pela planta nas bandas acima citadas. Isto também ocorreu na pesquisa de Martins *et al.* (2017), para o caso do nematoide de galha na cultura do café. Um aumento na reflexão no vermelho também foi constatado por Bajwa et al. (2017) pela ocorrência de cisto na soja e pelo Junior et al. (2002) cuja afirma que plantas com

menor infecção de cisto tem maior capacidade de absorção de energia incidente no vermelho.

Para o caso dos cistos viáveis a melhor banda para detecção é a mesma encontrada para cistos inviáveis, todavia com um R^2 de 0,3766. A Verde e a Vermelha também se destacaram, com um R^2 de 0,3198 e 0,3481, respectivamente. Entretanto os cistos que ainda não eclodiram não devem ser levados em consideração para a detecção do nematoide de

cisto da soja, uma vez que não garantem a ocorrência de sintomas.

A Tabela 2 mostra um modelo matemático elaborado através da regressão linear múltipla de *stepwise*, que apresenta resultados melhores do que as regressões lineares simples para cistos inviáveis no solo. Além disso, também permite a detecção de nematoide das lesões radiculares presente no solo, antes não observado pela regressão linear simples.

Tabela 2. Modelos matemáticos para detecção de *H. glycines* e *P. brachyurus*

Modelo matemático para cisto inviável	$y = - 163,5 + 1,133 \times \text{Vermelha} + 0,697 \times \text{Verde} - 0,522 \times 825 \text{ nm}$
R²	0,7430
p-valor - Vermelha	<0,001
p-valor - Verde	<0,001
p-valor - 825 nm	0,014
Coefficiente cp de Mallows	6,8
Modelo matemático para <i>P. brachyurus</i> no solo	$y = - 458 + 2,52 \times \text{Verde} + 2,52 \times \text{Nir (850 nm)}$
R²	0,1368
p-valor - Verde	0,020
p-valor - Nir - NDVI	0,049
Coefficiente cp de Mallows	8,5

As variáveis de predição do modelo matemático para cisto inviável, consideraram duas bandas que apresentaram bons resultados de correlação na regressão linear simples, e uma outra que se encontra fora na faixa do visível, que é 825 nm. Nenhuma das bandas independentes apresentaram correlação entre si, sendo o VIF calculado igual a 1 (Tamura et al., 2019; Daoud, 2017). O cp de Mallows foi de 6,8, menor que outros modelos de regressões lineares múltiplas para cisto inviável, que apresentaram um R^2 menor que 0,7430. Logo, foi priorizando o cp de Mallows o mais próximo possível ao número de preditoras (Mallows, 1973).

Para o caso do *P. brachyurus*, apesar da multicolinearidade do modelo ser adequado, o cp de Mallows de 8,5 indica uma baixa precisão do modelo e uma maior variância dos coeficientes de regressão.

Na Figura 3, tem-se o mapa de composição colorida em cor verdadeira de 3 reboleiras, cuja as amostras foram retiradas. A única reboleira, de todas as quais foram estudadas, que se mostrou evidente na imagem, foi a Reboleira - 1, devido a maior quantidade de solo exposto em função de um menor tamanho de copa das plantas.

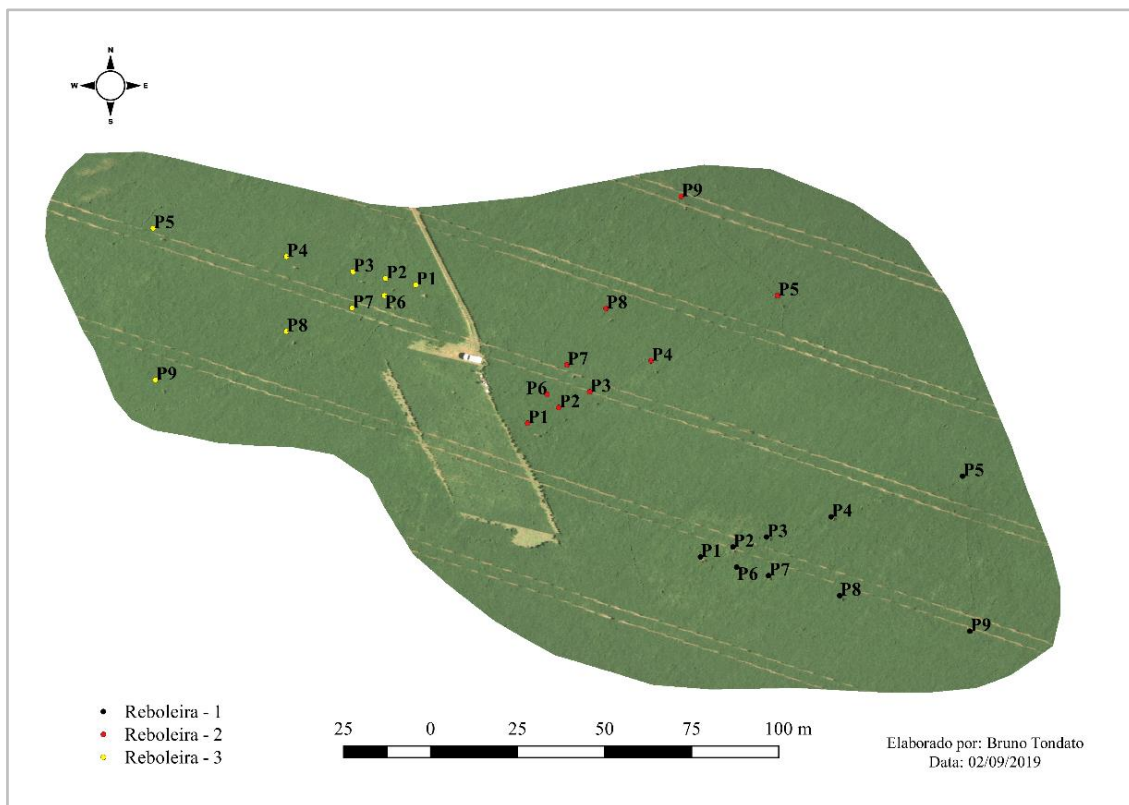


Figura 3. Composição RGB de algumas áreas amostradas

Os sintomas sutis aos olhos humanos presentes na imagem de composição RGB, tornam-se mais evidentes quando um mapa temático de predição de cistos inviáveis é

elaborado através da banda de 586 nm para a regressão linear simples, e através da regressão linear múltipla, que apresentou um R^2 de 0,7430 (Figura 4).

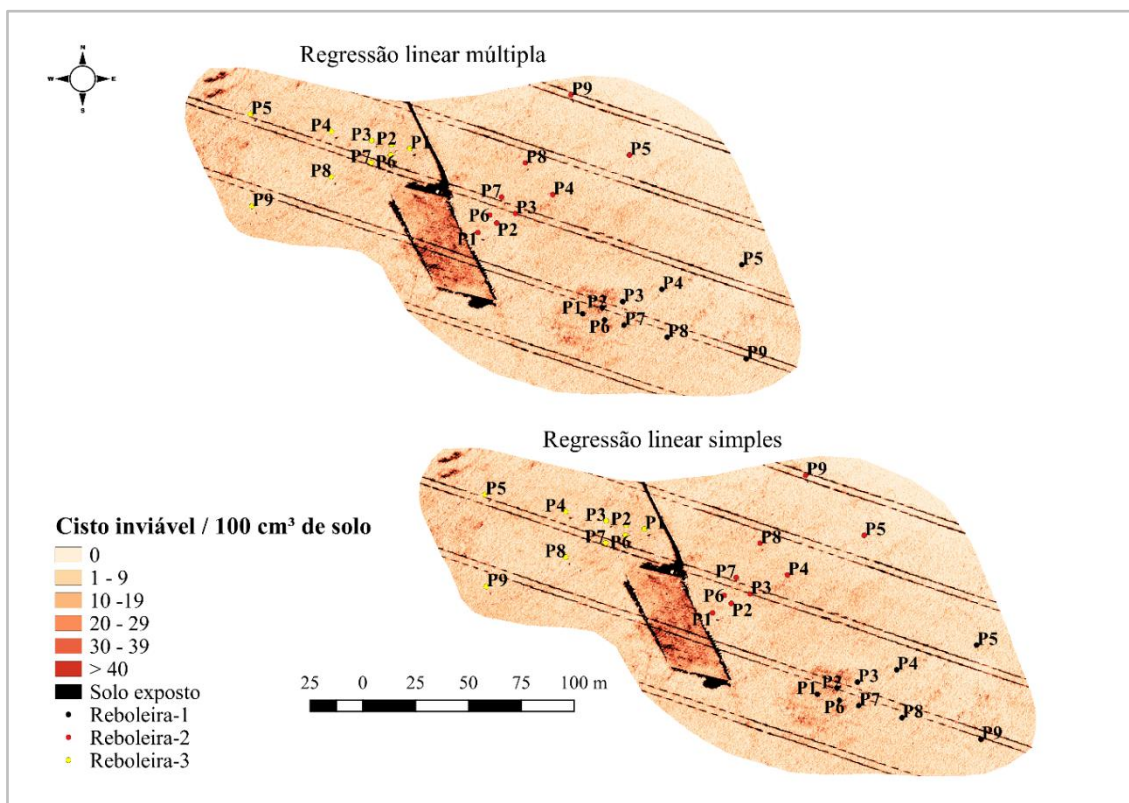


Figura 4. Mapa de predição elaborado por meio da regressão linear simples e mapa de predição elaborado por meio da regressão linear múltipla

A figura 5 apresenta o desempenho do modelo de predição expresso pelo erro médio quadrático (RMSE) (Willmott, 1981; Mayer, 1993). Eles apresentam resultados próximos, porém distintos. O modelo que utiliza a regressão linear simples, apresentou um RMSE de 14,81, com um erro de 53,97%. Já o modelo matemático sendo um pouco melhor,

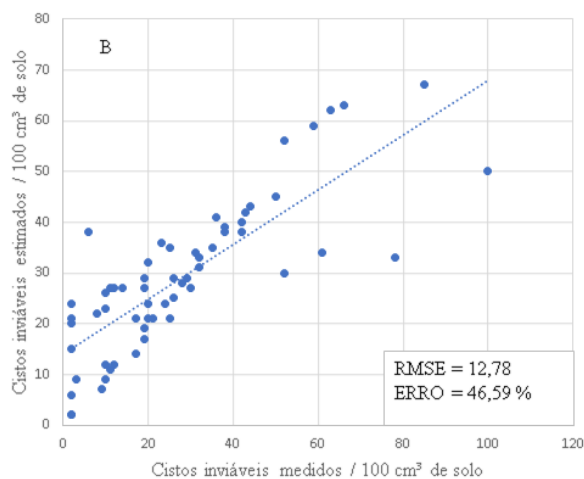
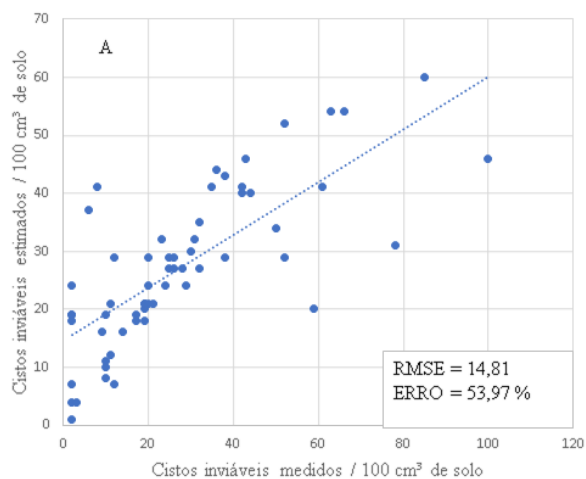


Figura 5. A- RMSE e ERRO da regressão linear simples com a banda de 586 nm para detecção de cistos inviáveis; B – RMSE e ERRO do modelo matemático para a detecção de cistos inviáveis

Apesar dos mapas de predição apresentarem um erro alto, eles podem ser utilizados para a detecção preliminar dos locais com maior e menor ocorrência de *H. glycines*, para que as amostragens de solo possam ser direcionadas e a quantificação melhorada. Isto é válido, já que as áreas serem monitoradas são extensas e as amostragens de solo caras e demoradas (Martins et al., 2017). Em suma, com algumas amostragens de solo e o mapa temático georreferenciado, torna-se possível uma diminuição dos custos de aplicação de nematicidas (Aljaafri, 2017), o que torna o controle sustentável e viável, com uma aplicação inteligente.

4. Conclusões

Para a detecção do *H. glycines* a melhor faixa espectral foi de 586 nm, cuja apresentou um R^2 de 0,649 para cistos inviáveis no solo. Na regressão linear simples, nada foi significativo para a detecção de *P. brachyurus*.

Entretanto, quando se combina as bandas Verde e Nir - NDVI em um modelo matemático, o *P. brachyurus* no solo passa a ser significativo e detectado. Para o caso do modelo matemático para a detecção do *H. glycines*, mais especificamente os cistos inviáveis, consegue-se uma

apresentou um RMSE de 12,78 e um erro de 46,59% (Figura 5). Tais valores são bons, considerando que a população de nematoides pode variar muito de ponto a ponto em um raio de alguns décimos de centímetros. Todos eles apresentaram um p-valor menor que 0,05.

melhora significativa no R^2 , combinado as bandas Vermelha, Verde e de 825 nm.

Através da validação dos dois modelos matemáticos, os dois para a detecção de cistos inviáveis no solo, foi possível comprovar a eficiência na detecção de locais com maiores e menores quantidades de nematoides. Isto é importante para que o número de amostras de solo sejam reduzidas e as mesmas sejam direcionadas, para a elaboração de um bom mapa de aplicação a taxa variável. O melhor resultado de predição foi aquele que utilizou a regressão linear múltipla.

Em suma para o caso dos nematoides, dos quais possuem mobilidade baixa, o mapeamento das áreas infectadas e a identificação de locais com maiores níveis de população, ajuda a prevenir o não espalhado para outros locais do talhão, além de permitir um manejo localizado, mantendo a sustentabilidade e a diminuição de custos.

Referências bibliográficas

Aboutalebi, M., Torre-Rua, AF., Kustas, WP., Nieto, H., Coopmans, C., Mckee, M, 2018. Assessment of different methods for shadow detection in high-resolution optical imagery and evaluation of

shadow impact on calculation of NDVI, and evapotranspiration. *Irrigation Science*. 37, 407-429.

Alfenas, AC, Mafia, RG, 2007. *Métodos em Fitopatologia*. Editora UFV.

Ali, MA., Abbas, A., Azeem, F., Javed, N., Bohlmann, H, 2015. Plant-nematode interactions: from genomics to metabolomics. *International Journal of Agriculture and Biology*. 17, 1071-1082.

Ali, MA., Azeem, F., Abbas, A., Joyia, FA., Li, H., Dababat, AA, 2017. Transgenic strategies for enhancement of nematode resistance in plants. *Fronteies in plant Science*. 8.

Aljaafri, WAR, 2017. Management of plant-parasitic nematodes using gene manipulation and biological nematicides. Mississippi State University.

Antônio, H, 1992. Fitonematoides na cultura da soja. *Informe Agropecuário*. 16, 60-65.

Araújo, FGD, 2009. Quantificação de machos e fêmeas de *Heterodera glycines* (Ichinohe, 1952) em cultivares de soja resistentes e suscetíveis. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás.

Ashourloo, D., Matkan, AA., Huete, A., Aghighi, H., Mobasheri, MR, 2016. Developing an index for detection and identification of disease stages. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 13, 851-855.

Backoulou, GF., Elliott, NC., Giles, KL., Mirik, M, 2015. Processed multispectral imagery differentiates wheat crop stress caused by greenbug from other causes. *Computers and electronics in agriculture*. 115, 34-39.

Bajwa, SG., Rupe, JC., Mason, J, 2017. Soybean disease monitoring with leaf reflectance. *Remote Sensing*. 9, 127, 2017.

Beck, PSA., Zarco-Tejada, P., Strobl, P., Miguel, JS, 2015. The feasibility of detecting trees affected by the Pine Wood Nematode using remote sensing. European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability.

Blevins, DG., Dropkin, VH., Luedders, VD, 1995. Macronutrient uptake, translocation, and tissue concentration of soybeans infested with the soybean cyst nematode and elemental composition of cysts isolated from roots. *Journal of plant nutrition*. 18, 579-591.

Chatterjee, S., Hadi, AS, 2015. *Regression analysis by example*. Fifth Edition.

Coolen, WA., d'Herde, CJ, 1972. A method for the quantitative extraction of nematodes from plant tissue.

Daoud, JI, 2017. Multicollinearity and regression analysis. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 949.

Dutta, TK., Khan, MR., Phani, V, 2019. Plant-parasitic nematode management via biofumigation using brassica and non-brassica plants: current status and future prospects. *Current Plant Biology*. 17, 17-32.

Gomes, SMS., Dias-Arieira, CR., Biela, F., Caerdoso, MR., Fontana, LF., Puerari, HH, 2014. Sucessão de culturas no manejo de *Pratylenchus brachyurus* em soja. *Nematropica*. 44, 200-206.

Henning, AA., Almeida, AMR., Godoy, CV., Seixas, CDS., Yorinori, JT., Costamilan, LM., Ferreira, LP., Meyer, MC., Soares, RM., Dias, WP, 2014. Manual de identificação de doenças de soja. Embrapa Soja-Documents (INFOTECA-E).

Homiak, JA., Dias-Arieira, CR., Couto, EAA., Kath, J., Abe, VHF, 2017. Seed treatments associated with resistance inducers for management of *Pratylenchus brachyurus* in soybean. *Phytoparasitica*. 45, 243-250.

Jenkins, W (1964). A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. *Plant disease repórter*. 48, 692-695.

Jeong, S., Ko, J., Choi, J., Xue, W., Yeom, JM. Application of an unmanned aerial system for monitoring paddy productivity using the GRAMI-rice model. *International journal of remote Sensing*. 39, 2441-2462.

Joalland, S., Screpanti, C., Liebisch, F., Varella, HV., Gaume, A., Walter, A. 2017. Comparison of visible imaging, thermography and spectrometry methods to evaluate the effect of *Heterodera schachtii* inoculation on sugar beets. *Plant methods*. 13.

Joalland, S., Screpanti, C., Varella, HV., Reuther, M., Schwind, M., Lang, C., Walter, A., Liebisch, F, 2018. Aerial and ground based sensing of tolerance to beet cyst nematode in sugar beet. *Remote Sensing*. 10.

Johnson, AB., Kim, KS., Riggs, RD., Scott, HD, 1993. Location of *Heterodera glycines*-induced syncytia in soybean as affected by soil water regimes. *Journal of nematology*. 25, 422-426.

- Junges, AH., Ducati, JR., Lampugnani, CS., Almaça, MAK, 2019. Detection of grapevine leaf stripe disease symptoms by hyperspectral sensor. *Phytopathologia Mediterranea*. 57, 399-406.
- Junior, RFS., Santos, JM., Rudorff, BFT., Marchiorato, IA, 2002. Detection of infested areas with *Heterodera glycines* in a soybean field using spectroradiometry in the visible and near infrared. *Fitopatologia Brasileira*. 27, 355-360.
- Khanal, S., Fulton, J., Shearer, S, 2017. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 139, 22-32.
- López, JA., Navarro, H., Soto, F., Pavón, N., Suardiáz, J., Torres, R, 2015. GAIA2: A multifunctional wireless device for enhancing crop management. *Agricultural Water Management*. 151, 75-86.
- López-Riquelme, JÁ., Pavón-Pulido, N., Navarro-Hellín, H., Soto-Valles, F., Torres-Sánchez, R, 2017. A software architecture based on FIWARE cloud for Precision Agriculture. *Agricultural Water Management*. 183, 123-135.
- MacDonald, SL., Staid, M., Staid, M., Cooper, ML, 2016. Remote hyperspectral imaging of grapevine leafroll-associated virus 3 in cabernet sauvignon vineyards. *Computers and Electronics in Agriculture*. 130, 109-117.
- Mallows, CL, 1973. Some comments on C p. *Technometrics*. 15, 661-675.
- Manso, EC., Tenente, RC., Ferraz, LCCB., Oliveira, RS., Mesquita, R, 1994. Catálogo de nematoides fitoparasitos encontrados associados a diferentes tipos de plantas no Brasil. EMBRAPA-CENARGEM/EMBRAPA-SPI.
- Martinelli, F., Scalenghe, R., Davino, S., Parino, S., Scuderi, G., Ruisi, P., Villa, P., Stroppiana, D., Boschetti, M., Goulart, LR., Davis, CE., Dandekar, AM, 2015. Advanced methods of plant disease detection. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 35, 1-25.
- Martinez-Rubi, O., Nex, F., Pierrot-Deseillgny, M., Rupnik, E, 2017. Improving FOSS photogrammetric workflows for processing large image datasets. *Open Geospatial Data, Software and Standards*. 2.
- Martins, GD., Galo, MLBT, 2015. Caracterização espectral da cana-de-açúcar infectada por nematoides e *Migdolus fryanus* por espectrorradiometria de campo. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 21, 783-796.
- Martins, GD., Galo, MLBT., Vieira, BS, 2017. Detecting and mapping root-knot nematode infection in coffee crop using remote sensing measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 10, 5395-5403.
- Masonbrink, R., Maier, TR., Muppirala, U., Seetharam, AS., Lord, E., Juvalé, OS., Schmutz, J., Johnson, NT., Korkin, D., Mitchum, MG., Mimee, B., Akker, SE., Hudson, M., Severin, AJ., Baum, TJ, 2019. The genome of the soybean cyst nematode (*Heterodera glycines*) reveals complex patterns of duplications involved in the evolution of parasitism genes. *BMC genomics*. 20.
- Masri, AA., Hau, B., Dehne, HW., Mahlein, AK., Oerke, EC, 2017. Impact of primary infection site of *Fusarium* species on head blight development in wheat ears evaluated by IR-thermography. *European journal of plant pathology*. 147, 855-868.
- Mayer, DG., Butler, DG, 1993. Statistical validation. *Ecological modelling*. 68, 21-32.
- Niblack, TL, 2005. Soybean cyst nematode management reconsidered. *Plant disease*. 89, 1020-1026.
- Schmitz, A., Kiewnick, S., Schlang, J., Sikora, RA, 2004. Use of high resolution digital thermography to detect *Heterodera schachtii* infestation in sugar beets. *Communications in agricultural and applied biological sciences*. 69, 359-363.
- Schut, AGT., Traore, PCS., Blaes, X., By, RA, 2018. Assessing yield and fertilizer response in heterogeneous smallholder fields with UAVs and satellites. *Field crops research*. 221, 98-107.
- Shirani, H., Hosseinifard, SJ., Hashemipour, H, 2018. Factors affecting cadmium absorbed by pistachio kernel in calcareous soils, southeast of Iran. *Science of The Total Environment*. 616, 881-888.
- SIDRA – Sistema IBGE de Recuperação Automática. Levantamento Produção Agrícola, <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618#resultado>. (Acesso em 12 junho 2019).
- Song, J., Li, S., Wei, W., Xu, Y., Yao, Q, 2017. Assessment of parasitic fungi for reducing soybean cyst nematode with suppressive soil in soybean fields of northeast China. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*. 67, 730-736.
- Tamura, R., Kobayashi, K., Takano, Y., Miyashiro, R; Nakata, K., Matsui, T, 2019. Mixed integer quadratic optimization formulations for eliminating multicollinearity based on variance inflation factor. *Journal of Global Optimization*. 73, 431-446.

Tihohod, D, 2000. Nematologia agrícola aplicada. 2ª ed. Jaboticabal: Funep.

USDA – United States Department of Agriculture. Oilseeds: world markets and trade, <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars> (Acesso em 12 junho 2019).

Willmott, CJ, 1981. On the validation of moldes. Physical geography. 2, 184-194.

Yang, C., Odvody, GN., Thomasson, JL., Isakeit, T., Nichols, RL, 2016. Change detection of cotton root rot infection over 10-year intervals using airborne multispectral imagery. Computers and Electronics in Agriculture. 123, 154-162.

Yi-Ta, H., Shou-Tsung, W., Chaur-Tzuhn, C., Jan-Chang, C, 2016. Analyzing Spectral Characteristics of Shadow Area from ADS-40 High Radiometric RESOLUTION Aerial Images. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences. 41, 223-227.

Zhang, H., Song, Q., Griffin, JD., Song, BH, 2015. Genetic architecture of wild soybean (*Glycine soja*) response to soybean cyst nematode (*Heterodera glycines*). Molecular genetics and genomics. 292, 1257-1265.

Zhang, Q, 2015. Precision agriculture technology for crop farming. CRC Press.

CONCLUSÃO GERAL

Para que a ocorrência de nematoides no campo possa ser detectada e mapeada através de imagens aéreas, o estádio R3 é recomendado para o nematoide de cisto da soja, enquanto o estádio R1 foi o mais adequado para os nematoides das lesões radiculares. A melhor regressão linear para a detecção de *H. glycines* apresentou um coeficiente de determinação de 0,7430 e para *P. brachyurus* de 0,3194.

No estádio R1 a faixa do visível apresentou os melhores resultados para a detecção de *H. glycines*, tanto no modelo matemático desenvolvido, quanto na regressão linear simples. A melhor banda para a regressão linear simples é a Vermelha do Phantom e para o modelo matemático a combinação das bandas Vermelha, Verde e Azul do Phantom e Vermelha da Sentera.

A RedEdge da Sentera e Nir da Sequoia foram as melhores individualmente para a detecção de *P. brachyurus* na raiz e no solo respectivamente, ainda no estádio R1, faixas estas fora do espectro do visível. No modelo matemático para *P. brachyurus* é utilizada somente bandas espectrais do Infravermelho Próximo e RedEdge.

Em R3, a melhor faixa espectral para detecção de *H. glycines* nas regressões lineares simples é de 586 nm, com um R^2 de 0,6499 para cistos inviáveis e um R^2 de 0,3766 para cistos viáveis. Com os modelos matemáticos, que são as regressões lineares múltiplas obtidas pela técnica de *stepwise*, resultados melhores são encontrados. O *H. glycines* passa a ser detectado com maior eficiência do que com o uso de somente da banda de 586 nm e *P. brachyurus* passa a ser detectado, antes não significativo com o uso da regressão linear simples.

Com a validação da melhor regressão linear simples e do modelo matemático, os dois para *H. glycines*, em R3, é possível realização a detecção de locais com maiores e menores quantidades de nematoides, sendo o erro de 53,97% e 46,59% respectivamente.

Tais valores são bons, considerando que a população de nematoide pode variar muito de ponto a ponto em um raio de alguns décimos de centímetros

Em suma para o caso dos nematoides, dos quais possuem mobilidade baixa, o mapeamento das áreas infectadas e a identificação de locais com maiores níveis de população, ajuda a prevenir o espalhamento para outros locais do talhão, além de permitir um manejo localizado, mantendo a sustentabilidade e a diminuição de custos.