

INSTITUTO FEDERAL GOIANO – CAMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-  
AGRONOMIA

ALTURA DE VOO INTERFERE NA DETECÇÃO  
ESPECTRAL DE *Heterodera glycines* EM SOJA?

Autora: Mylena Marques Dorneles  
Orientador: Tavvs Micael Alves

RIO VERDE, GO  
AGOSTO, 2022

INSTITUTO FEDERAL GOIANO – CAMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-  
AGRONOMIA

ALTURA DE VOO INTERFERE NA DETECÇÃO  
ESPECTRAL DE *Heterodera glycines* EM SOJA?

Mestranda: Mylena Marques Dorneles  
Orientador: Tavvs Micael Alves

Dissertação apresentada como parte das exigências para a obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – Linha de pesquisa: Tecnologias Sustentáveis em sistemas de produção e uso do solo e água.

RIO VERDE, GO  
AGOSTO, 2022

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

DD713a Dorneles , Mylena Marques  
ALTURA DE VOO INTERFERE NA DETECÇÃO ESPECTRAL DE  
Heterodera glycines EM SOJA? / Mylena Marques  
Dorneles ; orientador Tavvs Micael Alves ; co-  
orientador Gustavo Castoldi . -- Rio Verde, 2022.  
49 p.

Dissertação (Mestrado em Pós-Graduação em Ciências  
Agrárias - Agronomia ) -- Instituto Federal Goiano,  
Campus Rio Verde, 2022.

1. Agricultura digital. 2. agricultura 4.0. 3.  
fitonematoides. I. , Tavvs Micael Alves, orient. II.  
, Gustavo Castoldi, co-orient. III. Título.

# 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, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

## IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

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:      /      /

O documento está sujeito a registro de patente?      Sim      Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?      Sim      Não

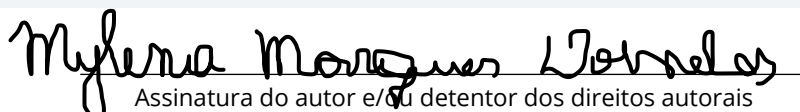
## DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

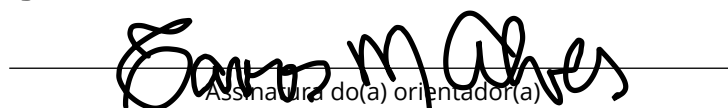
- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto 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;
- Que 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.

Local

/ /  
Data

  
Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

  
Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 83/2022 - NREPG-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

## ALTURA DE VOO INTERFERE NA DETECÇÃO ESPECTRAL DE *Heterodera glycines* EM SOJA?

Autora: Mylena Marques Dorneles  
Orientador: Dr. Tavvs Micael Alves

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

APROVADA em 12 de agosto de 2022.

Prof. Dr. Tavvs Micael Alves (Presidente)

Prof. Dr. Gustavo Castoldi (Avaliador Interno)

Prof. Dr. Alaerson Maia Geraldine (Avaliador Externo)

Profª. Dra. Darliane de Castro Santos (Avaliadora Interna)

Documento assinado eletronicamente por:

- Alaerson Maia Geraldine, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 29/08/2022 15:37:18.
- Darliane de Castro Santos, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 12/08/2022 12:51:18.
- Gustavo Castoldi, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 12/08/2022 12:25:38.
- Tavvs Micael Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 12/08/2022 12:15:22.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 11/08/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 414829  
Código de Autenticação: c4eaa2e336



## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus que me abençoou e concedeu a oportunidade de ter chegado até ao final do mestrado. É para honra e glória do Senhor que cheguei até aqui.

Agradeço a minha família que nunca mediu esforços para me incentivar nos estudos; em especial a minha mãe Eva Simone, que sempre me apoio para estudar; agradeço também ao meu pai Levi, que sempre torceu pelo meu sucesso. Aos meus avós José Antônio e Rita Maria, pelos conselhos e incentivos que me deram durante toda vida sempre acreditando e torcendo pelo meu melhor. Agradeço também a minha irmã Maysa, que sempre foi minha companheira. A minha prima Leandra e seu marido Cleidomar, que sempre me apoiaram e comemoraram comigo minhas conquistas por menores que sejam.

Agradeço imensamente ao meu orientador Dr. Tavvs Alves, pelo apoio, por todo conhecimento transmitido no decorrer desses 2 anos, pela paciência, pela dedicação, pelos conselhos, pela amizade e por me mostrar de forma simples o quanto a pesquisa é importante.

Agradeço a todos aos professores Dr. Alaerson Geraldine e Dr. Gustavo Castoldi, e aos coorientadores que tive durante o mestrado, todos foram fundamentais para a conclusão desta fase da minha vida me ensinando com paciência e dedicação.

Agradeço a todo corpo docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do campus Rio Verde e a CAPES, pela concessão da bolsa. Agradeço aos meus colegas de mestrado que estiveram comigo mesmo de forma remota durante a pandemia.

Agradeço ao grupo de pesquisa SapFly e ao polo de Inovação-EMBRAPII, pelo fornecimento dos equipamentos e estrutura necessária para a condução deste trabalho e a todos os servidores que estiveram me apoiando nesses momentos.

Minha gratidão aos colegas de laboratório pela amizade, pelo apoio e pelo auxílio nas etapas da minha pesquisa, sendo alguns deles: Rômulo, Demily, Leandro, Pedro Paulo, Autielis, Linconl, Emanuel, Gustavo, Lara, Pedro Bittencourt, Tamires, Eugênio, Jéssica, Priscila, Lucas, Alexandre, João Gabriel, Icaro, Antônio. Vocês fizeram minha caminhada mais feliz e leve me ensinando o valor e importância do trabalho em equipe.

Obrigada a todos por terem contribuído significativamente no desenvolvimento da minha vida profissional e pessoal! Deus abençoe a todos!

## **BIOGRAFIA DA AUTORA**

MYLENA MARQUES DORNELES, filha de Eva Simone Marques e Levi Campos Dorneles, nasceu no dia 23 de janeiro de 1997, na cidade de Itapuranga/Go. Em fevereiro de 2015, ingressou no curso de Bacharelado em Agronomia na Faculdade Evangélica de Goianésia – FACEG, graduando-se em dezembro de 2019. Em outubro de 2020, iniciou no curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia, no Instituto Federal Goiano – campus Rio Verde.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	v
ÍNDICE DE TABELAS .....	vi
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
1. INTRODUÇÃO GERAL .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1. Soja .....	3
2.2. <i>Heterodera glycines</i> .....	3
2.3. Sensoriamento Remoto .....	6
2.4. Drones .....	9
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	13
4. OBJETIVOS .....	21
4.1. Objetivo Geral .....	21
4.2. Objetivos Específicos .....	21
5. CAPÍTULO 1 – Does Flight Height Affect Spectral Detection of the Cyst Nematodes in Soybean? .....	22
ABSTRACT .....	22
1. INTRODUCTION.....	22
2. MATERIALS AND METHODS.....	24
2.2. <i>Study area, exploratory flights, and sampling regions</i> .....	24
2.3. <i>Spectral measurements</i> .....	25
2.4. <i>Nematological evaluations</i> .....	26
2.5. <i>Data Analysis</i> .....	27
3. RESULTS.....	27
3.1. <i>Pearson’s Correlation</i> .....	27
3.2. <i>Análise multivariada de componentes principais (PCA)</i> <b>Error! Bookmark not defined.</b>	31
3.3. <i>Forward Model Selection</i> .....	31
4. DISCUSSION.....	32
5. CONCLUSION.....	33
6. REFERENCES .....	34



## ÍNDICE DE FIGURAS

### REVISÃO DE LITERATURA

<b>Figura 1</b> - Ciclo de <i>Heterodera</i> spp. (Agrios, 2005).....	5
<b>Figura 2</b> - Ciclo de <i>Pratylenchus brachyurus</i> (Agrios, 2005). ... <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
<b>Figura 3</b> - Representação do espectro eletromagnético ( Florenzano, 2011).....	7
<b>Figura 4.</b> Comparando a refletância espectral de vegetação saudável, vegetação insalubre e solo em comprimentos de onda visíveis e NIR. ....	8
<b>Figura 5</b> - Exemplos de alguns drones comerciais de asa fixa: a) QuestUAV; b) SenseFly eBee; c) Trimble UX5; d) MAVinci Sirius Pro; e) PrecisionHawk Lancaster. (PÁDUA et al., 2017). 11	
<b>Figura 6</b> - Exemplos de alguns Drones comerciais de asa rotativa (Fonte: Rotorcraft .....	12

### CAPÍTULO 1

<b>Figure 1</b> - Exploratory flight using a multicopter drone and an RGB sensor flying at 120 m high. Potential spots of plants infested with <i>Heterodera glycines</i> on soybean were identified by a trained researcher using orthomosaic images. A subsequent field visit was done to confirm the infestation. ....	25
<b>Figure 2</b> - Orthomosaic images obtained with a quadcopter flying 40 (a), 80 (b), and 120 m high (c) for capturing spectral responses of soybean plants to <i>Heterodera glycines</i> . Sampling points at the center, edge, and outside the symptomatic clusters of plants. ....	26
<b>Figure 3</b> - Pearson correlation between <i>Heterodera glycines</i> and <i>Pratylenchus brachyurus</i> number variables and spectral responses of soybean plants obtained by drone coupled with the Sentera sensor flying at three different heights: 40 m (a), 80 m (b), 120 m (c) . S_Het (Soil <i>Heterodera</i> ), S_UC (Soil Unviable cyst), S_VC (Soil Viable cyst), S_Pratt (Soil <i>Pratylenchus</i> ), R_Het (Root <i>Heterodera</i> ), R_Pratt (Root <i>Pratylenchus</i> ), R_F (Root Female), R_UC (Root Unviable cyst) ; Sensor center wavelengths: X625,740nm (625-740nm), X500,565nm (500-565nm), X440-485nm (440-485nm), X825nm (825nm), X586nm (586nm), X615nm (615nm), X775nm (775nm), X661nm (661nm), X625nm (NDVI – red (625nm)), X850nm (NDVI – nir (850nm)), X720nm (NDRE – red border (720nm)), X840nm (NDRE – nir (840nm)). Correlations with an asterisk have a significance level of 0.05.....	29
<b>Figure 4</b> - Principal Component Analysis (PCA) including variables of numbers of <i>Heterodera glycines</i> and <i>Pratylenchus brachyurus</i> and spectral responses of soybean plants obtained by drone coupled with the Sentera sensor flying at three different heights: 40 m (a), 80 m (b) , 120 m (c). S_Het (Soil <i>Heterodera</i> ), S_UC (Soil Unviable cyst), S_VC (Soil Viable cyst), S_Pratt (Soil <i>Pratylenchus</i> ), R_Het (Root <i>Heterodera</i> ), R_Pratt (Root <i>Pratylenchus</i> ), R_F (Root Female), R_UC (Root Unviable cyst) ; Sensor center wavelengths: X625,740nm (625-740nm), X500,565nm (500-565nm), X440-485nm (440-485nm), X825nm (825nm), X586nm (586nm), X615nm (615nm), X775nm (775nm), X661nm (661nm), X625nm (NDVI – red (625nm)), X850nm (NDVI – nir (850nm)), X720nm (NDRE – red border (720nm)), X840nm (NDRE – nir (840nm)).....	30

## ÍNDICE DE TABELAS

### CAPÍTULO 1

**Table 1.** Forward model selection and Akaike's Information Criterion (AIC) used in the selection of models using spectral bands to estimate damage caused by *Heterodera glycines* and *Pratylenchus brachyurus* in soybeans flown over with the same sensor at three flight altitudes in 2020/21.....31

**Table 2.** Forward model selection and Akaike's Information Criterion (AIC) to estimate by direct selection the best prediction model considering all 13 spectral bands initially, selecting a subset of spectral bands that optimize the estimation of damage caused by *Heterodera glycines* in soybean for each altitude of flight in two consecutive years in 2021/22. ....32

## RESUMO

DORNELES, MYLENA MARQUES. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, agosto 2022. **Altura de voo interfere na detecção espectral de *Heterodera glycines* em soja?** Orientador: Dr. Tavvs Micael Alves; Coorientador: Dr. Gustavo Castoldi.

Impulsionado por uma crescente demanda por soja, o Brasil atingiu a liderança no ranking mundial de produção da cultura na safra de 2020/21. No entanto, ataques de nematoides parasitas de plantas, como *Heterodera glycines* pode reduzir a produtividade. Métodos de monitoramento não destrutivos como o sensoriamento remoto podem reduzir o número de amostragens e o custo de monitoramento, possibilitando identificar métodos de manejo que considerem a localização do ataque. Voos com drones em maiores alturas possibilitam cobrir maior área, conseqüentemente menor custo financeiro e de tempo. No entanto, sua pior resolução espacial pode confundir o efeito dos nematoides por maior quantidade de pixels mistos. Voos em baixa altura geram imagens com pixels menores, porém se torna um processo demorado e demanda maior número de imagens, maior tempo de voo e maior custo de processamento. O objetivo deste estudo foi determinar a altura de voo ideal e comprimentos de ondas espectrais para a identificação de plantas atacadas por *H. glycines*. Com auxílio de um dispositivo GPS portátil foram demarcados os pontos de amostragens nematológicas. Foram coletadas quatro amostras simples de solo e raiz (0 a 20 cm) no qual foram combinadas em uma amostra composta, para quantificar a população dos nematoides em amostras de solo e raiz. Os voos de drones foram realizados no mesmo dia da coleta de nematoides utilizando um sensor multiespectral em diferentes alturas: 40 m (pixel de 3 cm), 80 m (pixel de 6 cm) e 120 m (pixel de 9 cm). As variáveis obtidas nas avaliações foram submetidas separadamente a análise de variância e as médias foram comparadas pelo Forward model selection e Akaike's Information Criterion (AIC) e análise multivariada de componentes principais (PCA). As diferentes espécies de nematoides presentes neste estudo influenciam na escolha da banda espectral e podem ser identificados com modificações no modelo matemático/ associação de bandas e/ou altura de voo.

**Palavras-chave:** Agricultura digital, agricultura 4.0, fitonematoides.

## ABSTRACT

DORNELES, MYLENA MARQUES. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, August 2022. **Does flight height affect the spectral detection of *Heterodera glycines* in soybean?** Advisor: Dr. Tavvs Micael Alves; Co-advisor: Dr. Gustavo Castoldi.

Driven by a growing demand for soy, Brazil has reached the leadership in the world ranking of crop production in the 2020/21 harvest. However, attacks by plant parasitic nematodes such as *Heterodera glycines* can reduce productivity. Non-destructive monitoring methods such as remote sensing can reduce the number of samples and the monitoring cost, turning possible to identify management methods that consider the location of the attack. Flights with drones at greater heights turn possible to cover a greater area, consequently with lower financial and time costs. However, its worse spatial resolution can confound the nematode effect due to the high number of mixed pixels. Flights at low altitude generate images with smaller pixels, but it becomes a time-consuming process as it demands a greater number of images, longer flight time and higher processing cost. The aim of this study was to determine an ideal flight height and spectral wavelengths to identify the plants attacked by *H. glycines*. With the aid of a portable GPS device, the nematological sampling points were demarcated. Four singles soil and root samples (0 to 20 cm) were collected and combined into a composite sample to quantify the nematode population in them. Drone flights were performed on the same day of nematode collection using a multispectral sensor at different heights: 40 m (3 cm pixel), 80 m (6 cm pixel) and 120 m (9 cm pixel). The evaluated variables were submitted separately to analysis of variance and the means were compared by the Forward model selection and Akaike's Information Criterion (AIC) and multivariate analysis of principal components (PCA). The different species of nematodes present in this study influence the choice of the spectral band and can be identified with changes in the mathematical model/association of bands and/or flight height.

**Keywords:** Digital agriculture, agriculture 4.0, phytonematodes.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Com a crescente demanda por grãos de soja (*Glycine max L.*) e produtos derivados como farelo e óleo, o Brasil atingiu na safra de 2020/21 a liderança no ranking mundial de produção da cultura, aumentando 8,5% em comparação à safra anterior, atingindo a produção recorde de 135,4 milhões de toneladas (CONAB, 2021). No entanto, fatores bióticos causam preocupações aos produtores, como ataques de nematoides parasitas de plantas, responsáveis por causar consideráveis danos na cultura da soja em todo o mundo, podendo reduzir até 31% sua produtividade (ALLEN et al., 2017; NASU et al., 2018). O nematoide das lesões radiculares – *Pratylenchus brachyurus* e o nematoide de cisto - *Heterodera glycines* estão entre os principais problemas causadores de danos para a cultura da soja (DIAS et al., 2011; INOMOTO et al., 2011; JONES et al., 2013; PENG et al., 2016).

O monitoramento de ataques de nematoides na cultura não é algo simples, pois é um processo trabalhoso que demanda inúmeras visitas a área, requerendo amostras de solo e análises laboratoriais que possuem elevado custo (MARTINS et al., 2017). Diante disso faz-se necessário a utilização de métodos não destrutivos como o sensoriamento remoto, podendo reduzir o número de amostragens e produzir resultados satisfatórios pela alta precisão (ALVES et al., 2015). O sensoriamento remoto é uma tecnologia que permite obter dados da superfície terrestre sem que haja contato direto entre sensores e a superfície estudada (GUEDES e SILVA, 2018). Esse processo ocorre, por meio da captação da energia refletida e emitida e das medições quantitativas das interações da radiação. Sabe-se que para a aquisição dessas informações são utilizados sensores capazes de detectar energia de determinadas faixas do espectro eletromagnético e transformá-las em informações (BAJWA et al., 2017). Através desse processo, é descrito a composição da superfície terrestre, e esses sensores podem ser instalados em plataformas aéreas tripuladas e não tripuladas, terrestres e orbitais, permitindo a detecção de nematoides na área através do comportamento espectral da planta, antes não visto pelo produtor (MOLIN, 2015).

Atualmente, na agricultura pode-se utilizar o sensoriamento remoto para o monitoramento do comportamento espacial ou fisiológico de coberturas vegetais e através dos índices de vegetação é possível distinguir se há alguma falha em campo (ABREU e COUTINHO, 2014). Os sistemas de sensoriamento remoto possuem sensores como o RGB (red, green e blue) e sensores multiespectrais, que podem estar acoplados a Veículos

Aéreos Não Tripulados (VANTs), capazes de identificar bandas espectrais na faixa do visível e infravermelho próximo detectando o que não é visível a olho nu, permitindo desenvolvimento de algoritmos que auxiliam na obtenção de produtos aplicados a imagem digital de alta precisão em grandes áreas em curto intervalo de tempo (COLOMINA et al., 2014; ZHENG et al., 2018).

O aumento da produção e da capacidade produtiva da soja no Brasil, se dá pelos avanços científicos e disponibilidade de tecnologias para esse setor. Os veículos aéreos não tripulados estão ganhando mais importância por sua capacidade de agregar nas tomadas de decisões, coletar dados em vários horários do dia, possuir alta resolução espacial e disponibilidade de sensores multiespectrais. Com eles é possível ter informações mais rápidas e precisas, através de imagens e sensores, e é possível identificar danos fisiológicos ocasionados por estresses bióticos e abióticos (GUEDES e SILVA, 2018).

Essa ferramenta surge como alternativa entre outros métodos de monitoramento e já é utilizada no controle de nematoides, e é possível fazer identificação e mapeamento de reboleiras, distinguindo áreas mais críticas, possibilitando criar pontos específicos para aplicação de nematicidas, otimizando os custos de uma aplicação (ARANTES *et al.*, 2021).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Soja

A soja (*Glycine Max* L.) é uma cultura oleaginosa que tem sua origem na Ásia (SEDIYAMA et al., 2005). O grão de soja passou a ter importância econômica no século XX, e seus derivados como o óleo e a proteína da soja geravam grande interesse pelas indústrias, inicialmente ganhando destaque no mercado asiático e logo depois se expandindo para outras nações (EMBRAPA, 2020).

No Brasil, os primeiros registros de soja foram por volta do ano de 1882, quando iniciaram testes com algumas variedades na Bahia, levando posteriormente a vários outros estudos em diferentes regiões do país (BONATO e BONATO, 1987). Porém apenas no ano de 1908 foram trazidas cultivares para o consumo humano por imigrantes japoneses, sendo registrado o início dos plantios comerciais em 1924 no Rio Grande do Sul (MANDARINO, 2017). A soja surgiu no Brasil como opção de cultura de verão, a fim de evitar o desgaste excessivo de terra, substituindo o trigo. Após vários experimentos, sua adaptação, permitiu que a soja se tornasse uma projeção na agricultura, representando grande avanço no seu cultivo em escala mundial, transformando o Brasil em um dos principais produtores do grão internacionalmente (DALL'AGNOL, 2011).

Atualmente, a soja é uma das principais commodities do Brasil, sendo a quarta cultura mais cultivada no mundo (RAMIRO et al., 2019; VOLPATO et al., 2019). Entre os principais patógenos que afetam essa cultura há os nematoides parasitas de plantas, que podem ser encontrados no solo ou nas raízes de plantas já parasitadas, capazes de causar danos e redução na produção de soja em todo o mundo (NASU et al., 2018).

### 2.2. *Heterodera glycines*

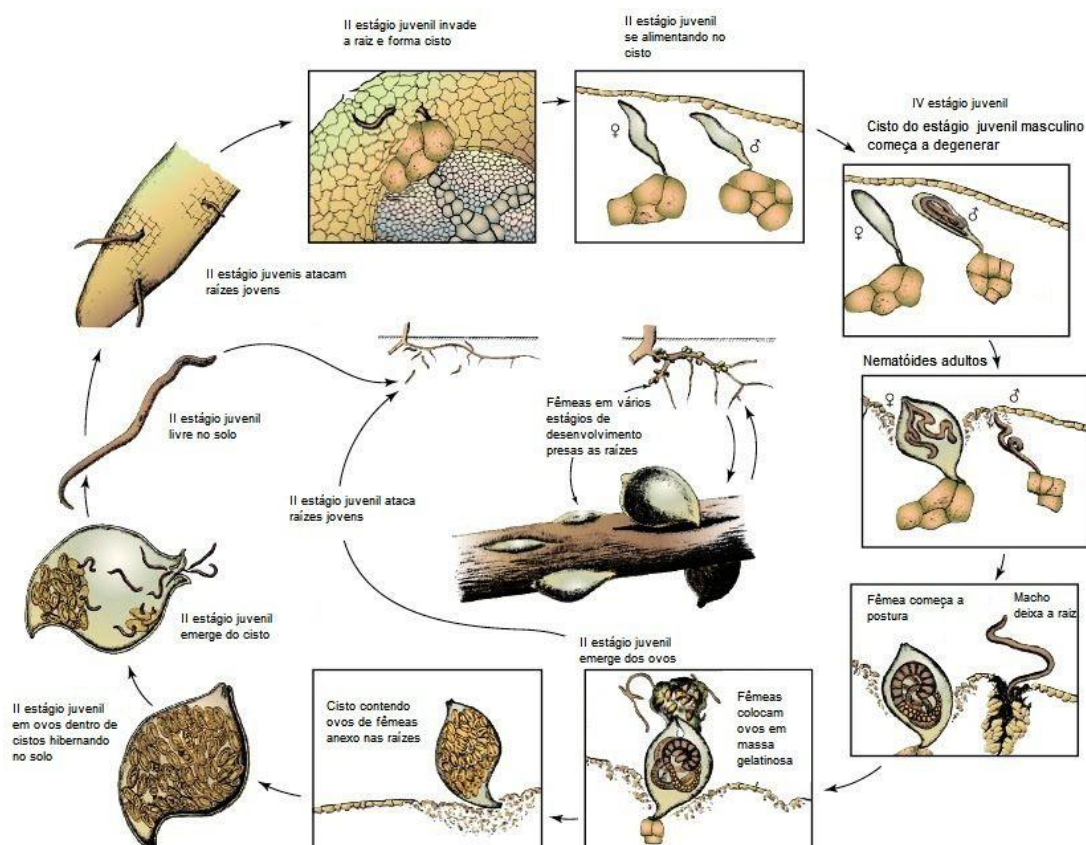
Os nematoides são responsáveis por causar consideráveis danos na cultura da soja em todo o mundo, podendo reduzir até 31% na produtividade da cultura (ALLEN et al., 2017; NASU et al., 2018). O nematoide de cisto (*Heterodera glycines*) é uma espécie economicamente importante para cultura da soja (DIAS et al., 2011; INOMOTO et al., 2011; JONES et al., 2013; PENG et al., 2016). Além dos danos às plantas parasitadas, os nematoides modificam a rizosfera das plantas, se tornando a “porta de entrada” para o crescimento de outros patógenos e vetores de fungos, bactérias e vírus, alternando processos fisiológicos do hospedeiro, podendo causar senescência prematura (BERGESON, 1971).

*Heterodera glycines* é um endoparasita sedentário que possuem um ciclo de vida que dura de 21 a 23 dias, corpo de 0,6 a 1,6 mm de comprimento, com formato vermiforme e cauda arredondada (Figura 1). O segundo estágio da fase juvenil (J2) é inicial a infecção. O nematoide emerge do solo e entra na raiz da planta com auxílio do seu estilete. A movimentação intracelular ocorre dentro da raiz pelas células corticais em direção a estela, induzindo uma célula inicial a gerar um sincício através de secreções da glândula endofágica. A partir disso o nematoide passa a se alimentar se tornando J2 adulto após três mudas sucessivas (FRAGOSO *et al.*, 2007).

O sincício serve como sítio de alimentação que fornece nutrientes necessários para o nematoide de cisto, fazendo com que esse nematoide dependa totalmente dele para sua sobrevivência (HUSSEY e GRUNDLER, 1988). As fêmeas são responsáveis por completar o ciclo de infecção e permanecer na raiz, possuindo entre 0,4 a 0,8 mm de comprimento, apresentando formato de um limão ligeiramente alongado, estas produzem ovos que permanecem no interior do seu corpo e após a sua morte, esse corpo se transforma em estrutura rígida de disseminação e resistência adquirindo coloração marrom, denominada cisto (YOUNG, 1992). O cisto contém em seu interior cerca de 200 a 600 ovos, que podem permanecer viáveis no solo por até 7 anos, mesmo sem a presença de um hospedeiro (CARES & BALDWIN, 1995).

Os sintomas de ataque do *H. glycines* aparecem em forma de reboleiras, ou seja, conjuntos de plantas agrupadas. As plantas apresentam nanismo, amarelecimento e clorose foliar. Isso pode interferir na quantidade de pigmentos e absorção da energia, conseqüentemente na reflectância da planta em comprimentos de onda da faixa do visível (ALLEN *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2017). Esses sintomas são facilmente confundidos com deficiência nutricional, podendo ser diferenciado pela sua ocorrência na época de florescimento da cultura, enquanto sintomas de falta de ferro, por exemplo, aparecem mais cedo no ciclo. Porém, para se obter um diagnóstico definitivo é necessário observar o sistema radicular da planta, que quando atacado apresenta redução e infestação com minúsculas fêmeas brancas do nematoide (EMBRAPA, 2011).





**Figura 1** - Ciclo de Heterodera spp. (Agrios, 2005).

O monitoramento de ataques de nematoides tradicionalmente requer visitas a lavoura e análises laboratoriais que possuem elevado custo (MARTINS *et al.*, 2017). Apresentam difícil controle pois sua ocorrência é no solo e raízes, possuindo a capacidade de sobreviver de uma safra para outra, fazendo com que seu manejo seja difícil e trabalhoso, por causa das aplicações de nematicidas precisarem atingir grande profundidade no solo (FORGE *et al.*, 1998; KROESE *et al.*, 2016).

A utilização de métodos não destrutivos como o sensoriamento remoto podem reduzir o número de amostragens com precisão adequada (ALVES *et al.*, 2015). O sensoriamento remoto é uma tecnologia que permite obter dados da superfície terrestre sem que haja contato direto entre eles. Esse processo ocorre por meio da captação da energia refletida e emitida pelas plantas. Sensores espectrais são utilizados para aquisição dessas informações em diferentes faixas do espectro eletromagnético por meio de plataformas terrestres, orbitais ou aéreas – aviões e veículos aéreos não tripulados (VANTS), popularmente chamados de drones. A detecção espectral de nematoides pode ser realizada precocemente, antes de sintomas visuais serem observados pelo produtor

(BAJWA *et al.*, 2017; GUEDES e SILVA, 2018; MOLIN *et al.*, 2015; ARANTES *et al.*, 2021).

### **2.3. Sensoriamento Remoto**

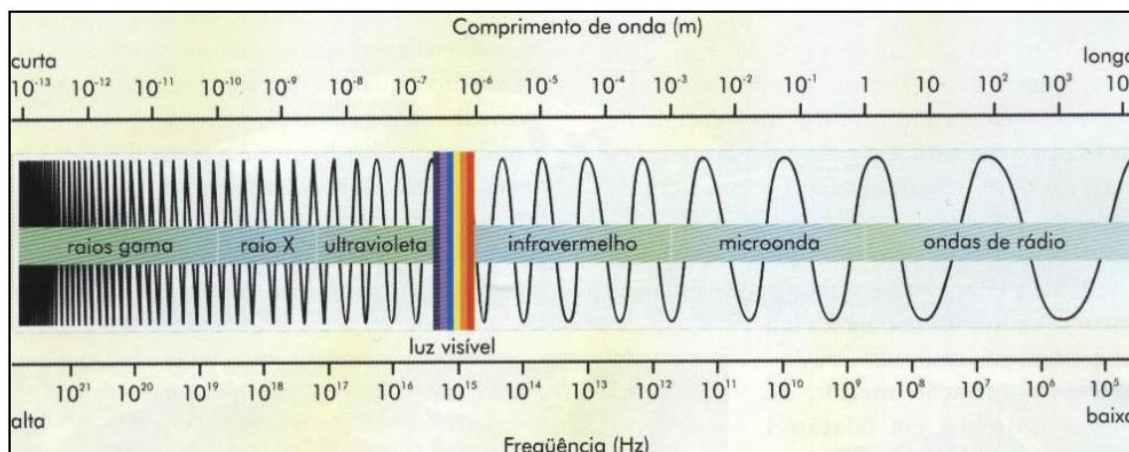
O sensoriamento remoto surgiu com a invenção da câmera fotográfica, utilizada como o primeiro instrumento para obtenção de fotografias aéreas. Uma das primeiras aplicações desse tipo de sensoriamento foi para uso militar, em que pequenas e leves câmeras fotográficas com disparador automático e pequenos rolos de filmes eram fixadas ao peito de um pombo-correio. Esses pombos sobrevoavam posições inimigas, registrando fotos da área e logo retornavam para seu local de origem estrategicamente escolhidos. Alguns desses pombos eram abatidos com tiros enquanto sobrevoava, porém muitos conseguiam retornar ao seu destino (DE MORAES NOVO, 2010; ROSA 1995).

Com a evolução das aplicações militares, passou-se a usar balões não tripulados substituindo os pombos. Esses balões continha uma câmera fixada e eram presos por cabos, suspensos até a altura ideal para que se registrasse fotos das posições inimigas. Após a obtenção das fotos, esses balões eram puxados de volta para checar informações. Na década de 1960 passou-se a utilizar veículos aéreos para o transporte dessas câmeras, surgindo assim, os aviões de espionagem conhecidos como U2. Esses aviões eram conduzidos por apenas um piloto, com grande variedade de equipamentos, sensores e câmeras. Porém, a grande revolução do sensoriamento remoto ocorreu com o lançamento de satélites de recursos naturais terrestres na década de 1970. Apesar de demandarem grandes investimentos e tempo para seu lançamento, eles podem orbitar em torno da terra por vários anos (COLWELL, 1985).

Com o passar dos anos o uso do sensoriamento remoto deixou de ser apenas militar, podendo ser aplicado na área da agricultura, permitindo obter dados da superfície terrestre sem que haja contato diretamente com o objeto em estudo. Para se obter esses dados são utilizados sensores que podem ser instalados em plataformas aéreas – aviões, drones; plataformas terrestres ou orbitais. Esses sensores detectam energias de diferentes faixas do espectro eletromagnético, por meio da captação da energia refletida e emitida da superfície terrestre (GUEDES e SILVA, 2018; MOLIN *et al.*, 2015).

A utilização do sensoriamento remoto em áreas para identificar nematoides pode ser um instrumento de grande ajuda no manejo, pois com o auxílio de sensores pode-se obter medidas de reflectância da cultura em diferentes faixas de comprimento de onda do espectro eletromagnético, nas regiões do visível e do infravermelho próximo (BATISTA

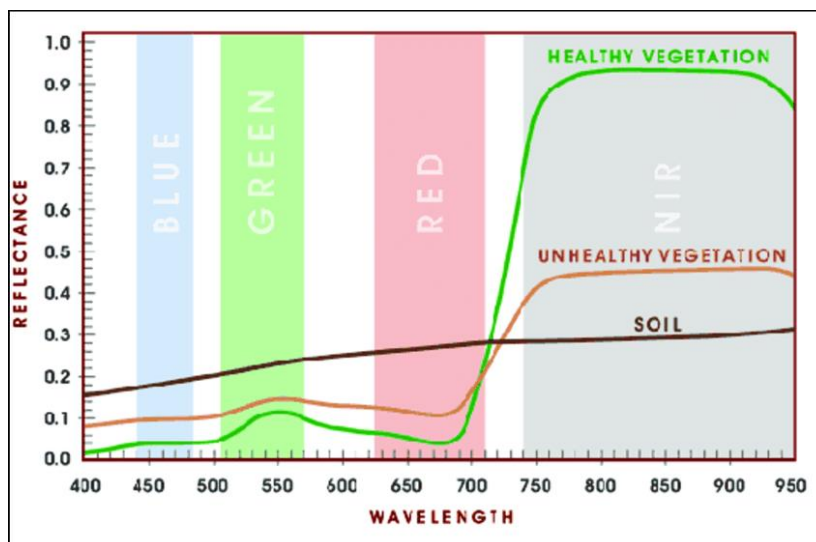
e RUDORFF, 1990; RUDORFF et al., 1997). O espectro eletromagnético é representado por várias regiões de acordo com a frequência e comprimento de ondas (Figura 3).



**Figura 2** - Representação do espectro eletromagnético (Florenzano, 2011).

A região do visível (400-700 nm) é subdividida em comprimentos de onda do azul, verde e vermelho (Figura 4). O cérebro humano não é capaz de identificar comprimentos de onda fora do espectro visível sem o auxílio de instrumentos complementares. Os responsáveis pela absorção de luz vermelha e azul são os pigmentos clorofilados presentes nas folhas, absorvendo menos porções verdes (KNIPLING, 1970).

Na faixa do infravermelho próximo são registrados a partir da radiação eletromagnética, entre a luz vermelha e as micro-ondas, compreendida entre 740 a 1300 nm (Figura 4). A reflectância do infravermelho sofre grande influência exercida pela estrutura interna das folhas, arquitetura das plantas e quantidade de área foliar. A energia dessa faixa espectral é dissipada por plantas saudáveis por não ser utilizada na fotossíntese (MYES, 1970).



**Figura 3.** Comparando a refletância espectral de vegetação saudável, vegetação insalubre e solo em comprimentos de onda visíveis e NIR.

A atividade fotossintética exercida pelas plantas está relacionada com a energia que o dossel da cultura reflete nos comprimentos de ondas na região do vermelho e infravermelho próximo (HOLBEN *et al.*, 1980; DAUGHTRY *et al.*, 1984). Quando uma planta está afetada por alguma doença ou deficiência nutricional, pode apresentar sintomas de amarelecimento e crescimento reduzido, afetando a resposta espectral, gerando contraste em relação às plantas saudáveis (BRENCHLEY, 1968).

Cada elemento que compõe a superfície terrestre apresenta um comportamento espectral em diferentes frequências de onda, sendo assim, o sensoriamento remoto é importante para identificar e observar esses alvos, gerando imagens que são produtos dessas observações. Essas imagens são registradas por sensores que separam as informações por comprimento de onda por meio do registro e armazenamento de sinais elétricos (EASTMAN, 1996; MOREIRA, 2005).

A estrutura de uma imagem é composta por uma matriz cartesiana de informações de pixels. Esses pixels são localizados individualmente por coordenadas X (linha) e Y (coluna) (EASTMAN, 1996; MORAES, 2002; NOVO, 2010). É possível identificar características a partir das diferentes resoluções dessas imagens, que são definidas:

- **Resolução Espectral:** É representada pela capacidade do sensor de distinguir diferentes intervalos de comprimento de ondas, ou seja, a largura em que o sensor opera. Se um sensor possui maior número de bandas referentes a diferentes regiões espectrais e com larguras estreitas de comprimentos de onda, esse sensor

possui melhor resolução espectral (FLORENZANO, 2011; MENESES e ALMEIDA, 2012).

- **Resolução Temporal:** Está relacionada com o tempo em dias, que o sensor leva para passar fazendo a cobertura de determinada área e da largura da faixa de imageamento. Normalmente esse tipo de resolução está relacionada com os satélites e seu período de passagem pelo mesmo ponto da superfície da Terra na mesma hora. Com a devida quantidade de imagens registradas sequencialmente, pode-se, por exemplo, acompanhar ciclos fenológicos de culturas (ZHANG *et al.*, 2020).
- **Resolução Espacial:** Está relacionada a capacidade do sensor distinguir objetos e ao tamanho do pixel da imagem, tipicamente apresentada em unidade de medida de comprimento (ex. centímetro). Pixel determina o tamanho dos objetos que poderá ser identificado em uma imagem (ZHANG *et al.*, 2019, 2020).
- **Resolução Radiométrica:** é determinada pela eficiência do sensor em detectar pequenos sinais e sua capacidade de identificar diferenças na intensidade de radiação de cada pixel na energia refletida e/ou emitida pelos elementos presentes na cena como rochas, solos, vegetações, água etc. (MORAES, 2002).

Atualmente sensores embarcados em drones são frequentemente utilizadas na agricultura para a obtenção das informações da superfície terrestre. As imagens de drones podem ser obtidas em condições parcialmente nubladas, diferentemente das imagens de satélite nessas condições. Também possuem a vantagem de voar em altitudes mais baixas e apresentar melhor resolução espacial (MATESE *et al.*, 2015).

Recentemente diversos estudos têm mostrado resultados positivos dos drones na agricultura para criação de mapas de solo (HUUSKONEN e OKSANEN, 2018), estimativa de evapotranspiração (NIU *et al.*, 2020) e detecção de pragas e doenças (CALOU *et al.*, 2020; MARSTON *et al.*, 2020; CALAMITA *et al.*, 2021). São boa opção ao produtor rural pela capacidade de obter rápidas informações para tomada de decisão antes de perdas econômicas (ZHANG e KOVACS, 2012; MULLA, 2013; BARBEDO, 2019; MAES e STEPPE, 2019).

#### 2.4. Drones

Os drones foram criados com o intuito militar. Rapidamente os drones deixaram de ser apenas empregados militarmente e no aeromodelismo e passaram a ser utilizados

pelo público em geral (DE BRUM, 2019). Sua tecnologia foi aberta para exploração comercial e aprimoramento tecnológico ao meio civil (CERBARO, 2016). Mais tarde os britânicos criaram o Queen Bee, um avião controlado por rádio, mais barato e utilizado como alvo durante o treinamento de pilotos da artilharia antiaérea (SILVA *et al.*, 2018).

Em 1973, após a segunda guerra mundial, a Força Aérea Americana desenvolveu um drone chamado Projeto Aquila, porém com pouca eficiência, pois voava poucos minutos, mesmo tendo sido projetado para voos com duração de 20 horas e precisava ser operado por 30 pessoas em solo (COSTA, 2019). O modelo que ficou marcado na história dos drones foi desenvolvido pelo engenheiro espacial israelita Abraham (Abe) Karem (REZENDE, 2018).

Os drones são veículos aéreos não tripulados (VANT'S), possuindo controle de voo, podendo receber comandos por meio de radiofrequência, infravermelho e, até mesmo obter coordenadas GNSS (Global Navigation Satellite System) para missões definidas previamente (JORGE, 2014). O primeiro drone brasileiro foi registrado como BQMIBR, sendo um protótipo de VANT que funcionava com propulsão a jato, voando pela primeira vez no ano de 1983, fabricado pela empresa CBT (Companhia Brasileira de Tratores), possuindo uma Turbina Tiete TJ-2, fabricada pelo CTA (Centro Tecnológico Aeroespacial). Objetivo desse protótipo era servir como alvo aéreo (MARINHO, 2019).

Atualmente os drones são classificados em asa fixa e rotativa, possuindo suas vantagens e limitações (WATTS *et al.* 2012; HOGAN *et al.* 2017):

- **drones de asa fixa:** apresentam uma estrutura estática de asas, com semelhança a um avião, que permite sua sustentação a partir do fluxo de ar. Possuem um corpo central com duas asas, e geralmente uma única hélice. Essas asas geram sustentação quando o drone está no ar, permitindo que a aeronave permaneça em voo (Figura 4).

*Vantagens:* um drone de asa fixa consegue cobrir maiores áreas comparados a drone multirrotores em um único ciclo de bateria se tornando ideais para mapeamento de grandes áreas ou lineares. Possuem também maior estabilidade, devido ao seu projeto de asa fixa.

*Desvantagens:* os drones de asa fixa necessitam de maior área de pouso e decolagens, são aeronaves que possuem maior custo e menos compacto.



**Figura 4** - Exemplos de alguns drones comerciais de asa fixa: a) QuestUAV; b) SenseFly eBee; c) Trimble UX5; d) MAVinci Sirius Pro; e) PrecisionHawk Lancaster. (PÁDUA et al., 2017).

- **drones de asa rotativa (multirrotores) (figura 5):** apresentam braços onde ficam localizados os motores elétricos nas pontas e hélices, comparados a helicópteros. Esses drones possuem um corpo central e múltiplos rotores responsáveis pela rotação das hélices para manobrar a aeronave. Os mais comuns são os que possuem quatro (quadricópteros), seis (hexacópteros) ou oito (octacópteros) rotores, podendo encontrar também outras combinações na quantidade de rotores. Com o auxílio desses rotores, uma vez no ar, o drone consegue variar sua velocidade relativa permitindo uma gama de movimentos.

*Vantagens:* possui maior facilidade na pilotagem, pois devido aos seus múltiplos motores podem realizar decolagens e aterrisagens verticais, exigindo também menos espaço para isso por causa do tamanho do equipamento. Possuem menor custo do que os drones de asa fixa. São mais compactos devido as suas várias hélices. Não exigem a área de superfície ou a envergadura, pois são projetados para dobrar e caber em caixas menores, se tornando fáceis para transportar.

*Desvantagens:* Multirrotores possuem a limitação quando a área mapeada em uma única bateria, seu tempo de voo é pequeno, demandando o uso de baterias adicionais.



**Figura 5** - Exemplos de alguns Drones comerciais de asa rotativa (Fonte: Rotorcraft)

O mercado de drones na agricultura aumentou significativamente a partir de 2000. Estes veículos aéreos de pequeno porte, controlados remotamente, possuindo capacidade de voo de minutos a horas. Os drones podem ser usados para pulverização de pesticidas (drones de atuação) ou para a detecção de pragas e doenças (drones sensores). Os drones sensores são usados para o gerenciamento de ataques reduzindo o tempo de procura e os danos ao meio ambiente. Além de serem uma opção mais econômica para os produtores, possuindo a vantagem de voar em altitudes mais baixas do que aeronaves tripuladas, e se comparados com sistemas orbitais (satélites) possui melhor resolução espacial das imagens e redução no número de pixels (PIMENTEL,1995).



### 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, K.M.P. de; COUTINHO, L.M.; Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação com ênfase em índice de vegetação e métricas da paisagem. **Vértices. Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro**, v. 16, n. 1, p. 173-198, 2014.

ALLEN, T.W.; BRADLEY, C.A.; SISSON, A.J.; BYAMUKAMA, E.; CHILVERS, M.I.; COKER, C.M.; Wrather, J.A. Soybean yield loss estimates due to diseases in the United States and Ontario, Canada, from 2010 to 2014. **Plant Health Progress**, v. 18, n. 1, p. 19-27, 2017.

ALVES, T.M.; R.D. MOON; I.V. MacRae and R.L. KOCH. Optimizing band selection for spectral detection of *Aphis glycines* Matsumura in soybean. **Pest Management Science**. 75:942-949.2019.

ALVES, T.M.; MACRAE, I.V.; KOCH, R.L. Soybean aphid (Hemiptera: Aphididae) affects soybean spectral reflectance. **Journal of Economy Entomology**, v. 108, n. 6, p. 2655-2664, 2015.

ARANTES, B. H. T.; MORAES, V. H.; GERALDINE, A. M.; ALVES, T. M.; ALBERT, A. M.; SILVA, G. J. D.; CASTOLDI, G. Spectral detection of nematodes in soybean at flowering growth stage using unmanned aerial vehicles. **Ciência Rural**, v. 51, 2021.

BAJWA, S.G.; RUPE, J.C.; MASON, J. Soybean disease monitoring with leaf reflectance. **Remote Sensing**, v. 9, p. 127-140, 2017.

BARBEDO, J.G.A. A review on the use of unmanned aerial vehicles and imaging sensors for monitoring and assessing plant stresses. **Drones**, v. 3, n. 2, p. 40, 2019.

BARBOSA, B.F.F.; DOS SANTOS, J.M.; BARBOSA, J.C.; SOARES, P.L.M.; RUAS, A.R.; DE CARVALHO, R.B. Aggressiveness of *Pratylenchus brachyurus* to sugarcane, compared with key nematode p. Zeae [agressividade de *P. brachyurus* à cana-de-açúcar, comparada ao do nematoide-chave p. Zeae]. **Nematropica**, p. 119-130, 2013.

BATISTA, G.T.; RUDORFF, B.F.T. Spectral response of soybean and field radiometry. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 45:111-121. 1990.

BERGESON, G.B. **Concepts of nematode-fungus associations in plant diseases complexes: a review**. Experimental parasitology, San Diego, California v. 54, p.301-314, 1971.

BONATO, E.R.; BONATO, A. L.V. **A soja no Brasil: história e estatística**. Londrina, EMBRAPA-CNPSo, 61p. 1987.

BRENCHLEY, G.H. Aerial photography for the study of plant diseases. **Annual Review of Phytopathology** 6:1-23. 1968.

CALAMITA, F.; IMRAN, H. A.; VESCOVO, L.; MEKHALFI, M. L.; LA PORTA, N. Early identification of root rot disease by using hyperspectral reflectance: the case of pathosystem grapevine/armillaria. **Remote Sensing**, v. 13, n. 13, p. 2436, 2021.

CALOU, V. B. C.; DOS SANTOS TEIXEIRA, A.; MOREIRA, L. C. J.; LIMA, C. S.; DE OLIVEIRA, J. B.; DE OLIVEIRA, M. R. R. The use of UAVs in monitoring yellow sigatoka in banana. **Biosystems engineering**, v. 193, p. 115-125, 2020.

CARES, J.E.; BALDWIN, J.G. Nematoides formadores de cistos do gênero *Heterodera*. In: LUZ, W.C.; FERNANDES, J.M.; PRESTES, A.M.; PICININI, E.C. Revisão Anual de Patologia de Plantas. Passo Fundo: **Revisão anual de patologia de plantas**, 1995, v. 3, p. 29-84.

CERBARO, V. A. Crop Drone: uma plataforma para coleta, armazenamento e disponibilização de dados agrícolas. 2016.

COLWELL, R.N. Manual of remote sensing. Second edition. United States: N.p.; 1985.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 92, p. 79-97, 2014.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos. V.8 – Safra 2020/21- N.8 – Oitavo levantamento**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 29 de maio de 2021.

COSTA, Rafaela Duarte. **Análise da atuação dos drones na segurança de um país.** 2019. Tese de Doutorado. Disponível em: <<https://run.unl.pt/handle/10362/91298>>. Acesso:07/07/2022.

DALL'AGNOL, A. A soja no brasil: evolução, causas, impactos e perspectivas. In: **Embrapa Soja-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: CONGRESO DE LA SOJA DEL MERCOSUR, 5.; FORO DE LA SOJA ASIA, 1., 2011, Rosário. Un grano: un universo. [Rosário: Asociación de la Cadena de la Soja Argentina], 2011. 4 p. 1 CD-ROM. MERCOSOJA 2011., 2011.

DAUGHTRY, C.S.T.; GALLO, K.P.; BIEHL, L.L.; KANEMASU, E.T.; ASRAR, G.; BLAD, B.L.; NORMAN, J.M.; GARDEN, B.R.; Spectral estimatives of agronomic characteristics of crops. **Machine processing of Remote Sensed Data Symposium.** Purdue University, W. Lafayette, IN, 1984.

DE BRUM, CAROLINE BUSSOLOTO et al. Uso dos drones nos procedimentos civis e criminais no brasil: considerações sob a ótica dos direitos fundamentais. **Drones e ciência**, p. 28, 2019.

DE MORAES NOVO, E.M.L. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações.** Editora Blucher, 2010.

DIAS, W.P.A.; GARCIA, J.F.V.; SILVA, E.G.E.S. CARNEIRO. **Nematoides em soja: identificação e controle.** Londrina, Embrapa Soja, p. 1, 2011.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2011. **Tecnologias de Produção de Soja Região Central do Brasil 2012 e 2013.** Londrina, Embrapa - Soja. 262 p. (Sistemas de Produção 15). 2011.

EMBRAPA. **Soja em números (safra 2019/20).** Disponível em: [https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dadoseconomicos#:~:text=Consumo%20interno%20de%20soja%20em,%2C9%20bilh%C3%B5es%20\(2019\)](https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dadoseconomicos#:~:text=Consumo%20interno%20de%20soja%20em,%2C9%20bilh%C3%B5es%20(2019).). Acesso em: 29 de maio de 2021.

EASTMAN, J.R. IDRISI for Windows. Editores da versão em português: HASENACK, H.; WEBER, E. Porto Alegre, UFRGS Centro de Recursos IDRISI, 1996. Disponível em <<http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo/arquivos/downloads>>. Acesso em: 2021.

FLORENZANO, T.G. Imagens de satélite para estudos ambientais. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2011. 97p.

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.

FRAGOSO, R.R.; LOURENÇO, I.T.; VIANA, A.A.B.; SOUZA, D.S.L.; ANDRADE, R.U.; MEHTA, A.; BRASILEIRO, A.C.M.; PINTO, E.R.C.; LIMA, L.M.; ROCHA, T.L.; SA, M.F.G. **Interação molecular planta-nematode**. Planaltina – DF: Embrapa Cerrados, 2007, 56 p.

FRANCHINI, J.C.; DEBIASI, H.; DIAS, W.P.; RAMOS JUNIOR, E.U.; SILVA, J.F.V. Perda de produtividade da soja em área infestada por nematoide das lesões radiculares na região médio norte do Mato Grosso. In: Bernardi, A. C. de C.; Naime, J. de M.; Resende, A.V. de; Bassoi, L. H.; Inamasu, R.Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: Embrapa, p.274-278, 2014.

GUEDES, J.C.F.; SILVA, S.M.P. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação: Princípios físicos, sensores e métodos. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, v.12, n.29, Pp. 127-144. mai./ago. de 2018.

HOGAN, S.; KELLY, N.; STARK, B.; CHEN, Y. Unmanned aerial systems for agriculture and natural resources. **California Agriculture**, v. 71, n. 1, p. 5-14, 2017.

HOLBEN, B.N.; TUCKER, C.J.; FAN, C.J. Spectral assesment of soybean leaf area and leaf biomass. **Photogrammetric Engineering e Remote Sensing** 46:651-656.1980.

HUSSEY, R.S.; GRUNDLER, F.M. Nematode parasitism of plants. **The physiology and biochemistry of free-living and plant-parasitic nematodes.**, p. 213-243, 1998.

HUUSKONEN, J.; OKSANEN, T. Soil sampling with drones and augmented reality in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 154, p. 25-35, 2018.

INOMOTO, M. M.; SIQUEIRA, K.; MACHADO, A.C. Sucessão de cultura sob pivô central para controle de fitonematoides: variação populacional, patogenicidade e estimativa de perdas. **Tropical Plant Pathology**, v. 36, n. 3, p. 178-185, 2011.

JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. **Embrapa Instrumentação-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2014.

JONES, J. T.; HAEGEMAN, A.; DANCHIN, E. G. J.; GAUR, H. S.; HELDER, J.; JONES, M. G. K.; KIKUCHI, T.; MANZANILLA-LOPEZ, R.; PALOMARES-RIUS, J. E.; WESEMAEL, W. M. L.; PERRY, R. N. Top 10 plant parasitic nematodes in molecular plant pathology. **Molecular Plant Pathology**, v. 14, n. 9, p. 946-961, 2013.

KNIPLING, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment** 3:155-159. 1970.

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.

MAES, W. H.; STEPPE, K. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. **Trends in plant science**, v. 24, n. 2, p. 152-164, 2019.

MANDARINO, J. M. G. **Origem e história da soja no Brasil**. Blog da EMBRAPA, 2017.

MARSTON, Z. P.; CIRA, T. M.; HODGSON, E. W.; KNIGHT, J. F.; MACRAE, I. V.; KOCH, R. L. Detection of stress induced by soybean aphid (Hemiptera: *Aphididae*) using multispectral imagery from unmanned aerial vehicles. **Journal of economic entomology**, v. 113, n. 2, p. 779-786, 2020.

MATESE, A.; TOSCANO, P.; DI GENNARO, S. F.; GENESIO, L.; VACCARI, F. P.; PRIMICERIO, J., ... & GIOLI, B. Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture. **Remote Sensing**, v. 7, n. 3, p. 2971-2990, 2015.

MARINHO, Carlos Alberto Branco. **Desenvolvimento do classificador Pixel Explorer (PEX), para a discretização de alvos em imagens multiespectrais**. 2019. Disponível em: < <https://repositorio.unb.br/handle/10482/37384>>. Acesso:02/07/2022.

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.

MENESES, P. R.; & ALMEIDA, T. D. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. **Universidade de Brasília, Brasília**, 2012.

MOLIN, J.P.; AMARAL, L.R.; COLAÇO, A.F. **Agricultura de Precisão**. 1ed. São Paulo: Oficina de textos, 2015.

MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. São José dos Campos, 2001. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)**. 208p.

MORAES, E.C. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos - SP: INPE, cap.1. 2002.

MULLA, D. J. Twentyfive years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems engineering**, v. 114, n. 4, p. 358-371, 2013.

MYES, V.I. Soil water and plant relations. In: National Academy of Sciences. **Remote Sensing with special reference to agricultural and forestry**. Washington. 1970.

NASU, É. D. G. C.; AMORA, D. X.; MONTEIRO, T. S. A.; ALVES, P. S.; DE PODESTÁ, G. S.; FERREIRA, F. C.; DE FREITAS, L. G. *Pochonia chlamydosporia* applied via seed treatment for nematode control in two soil types. **Crop protection**, v. 114, p. 106-112, 2018.

NICOL, J. M.; TURNER, S. J.; COYNE, D. L.; den NIJS, L.; HOCKLAND, S.; TAHNA MAAFI, Z. Current nematode threats to world agriculture. **Genomics and Molecular Genetics of Plant-Nematode Interactions**, p. 21-43, 2011.

NIU, H.; HOLLENBECK, D.; ZHAO, T.; WANG, D.; CHEN, Y. Evapotranspiration Estimation with Small UAVs in Precision Agriculture. **Sensors**, v. 20, n. 22, p. 6427, 2020.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 3380p. 2010.

PENG, D. L.; PENG, H.; WU, D. Q.; HUANG, W. K.; YE, W. X.; CUI, J. K. First report of soybean cyst nematode (*Heterodera glycines*) on soybean from Gansu and Ningxia China. **Plant disease**, v. 100, n. 1, p. 229-229, 2016.

PIMENTEL, D. Amounts of pesticides reaching target pests: environmental impacts and ethics. **Journal agricultural environmental ethics**. 8: 17-29.1995.

RAMIRO, J.; CIAMPI-GUILLARDI, M.; CALDAS, D. G. G.; MORAES, M. H. D. de; BARBIERI, M. C. G.; PEREIRA, W. V.; MASSOLA, J.R, N. S. Quick and accurate detection of *Sclerotinia sclerotiorum* and *Phomopsis* spp. in soybean seeds using qPCR and seed-soaking method. **Journal of Phytopathology**, v. 167, n. 5, p. 273-282, 2019.

REZENDE, Rodrigo Montezel Corrêa de. Drones: regulamentações e os impactos na segurança pública. Ciências Aeronáuticas-Unisul Virtual, 2018. Disponível em: < <https://www.riuni.unisul.br> >. Acesso:02/07/2022.

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto** - EDUFU- 1995.

RUDORFF, B.F.T.; MOREIRA, M.A.; OVIEDO, A.; FREITAS, J.G. Efeito do nitrogênio e do déficit hídrico na resposta espectral de cultivares de trigo. Anais, **Simpósio Latino Americano de Percepción Remota**. Mérida, Venezuela. CD-ROM. 1997.

SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R.C.; REIS, M.S. Melhoramento da soja. In: BORÉM, A. (Ed) **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: UFV, p. 553-604, 2005.

SILVA, Moisés Câmara da et al. A "revolução militar" dos drones (2001 a 2018): da "caçada humana" no Afeganistão às várias frentes de batalha no Oriente Médio e ao aumento da escala da guerra entre as "grandes potências". 2018. Disponível em: < <http://tede.bc.uepb.edu.br/jspui/handle/tede/3435> >. Acesso: 02/05/2022.

SOJA. Disponível em: <https://blogs.canalrural.com.br/embrapasoja/2017/04/05/origem-e-historia-da-sojano-brasil/>. Acesso em: 20 de junho de 2021.

VOLPATO, L.; ALVES, R. S.; TEODORO, P. E.; RESENDE, M. D. V. de; NASCIMENTO, M.; NASCIMENTO, A. C. C.; LUDKE, W. H.; SILVA, F. L. da &

BORÉM, A. Multi-trait multi-environment models in the genetic selection of segregating soybean progeny. **Plos One**, v. 14, n. 4, p. 1-22, 2019.

WATTS, A.C.; AMBROSIA, V.G.; HINKLEY, E.A. 2012. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. **Remote Sensing** 4: 1671–1692.

YOUNG, L.D. Epiphytology and life cycle. In: RIGGS, R.D.; WRATHER, J.A. **Biology and management of the soybean cyst nematode**. St. Paul: APS Press, 1992, p. 27-36.

ZHANG, C.; YUE, P.; TAPETE, D.; JIANG, L.; SHANGGUAN, B.; HUANG, L.; LIU, G. A deeply supervised image fusion network for change detection in high resolution bi-temporal remote sensing images. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 166, p. 183-200, 2020.

ZHANG, H.; SONG, B. H. RNA-seq data comparisons of wild soybean genotypes in response to soybean cyst nematode (*Heterodera glycines*). **Genomics Data**, v. 14, p. 36-39, 2017.

ZHANG, C.; KOVACS, J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. **Precision agriculture**, v. 13, n. 6, p. 693-712, 2012.

ZHENG, H.; CHENG, T.; LI, D.; ZHOU, X.; YAO, X.; TIAN, Y.; ZHU, Y. Evaluation of RGB, color-infrared and multispectral images acquired from unmanned aerial systems for the estimation of nitrogen accumulation in rice. **Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 824, 2018.



## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. Objetivo Geral**

- Otimizar a detecção espectral de *Heterodera glycines* e *Pratylenchus brachyurus* em soja utilizando drones.

### **4.2. Objetivos Específicos**

- Determinar a melhor altura de voo para otimizar a detecção espectral de nematoides.
- Determinar quais comprimentos de bandas foram capazes de otimizar a detecção espectral de nematoides.

## 5. CAPÍTULO 1 – Does Flight Height Affect Spectral Detection of Cyst Nematodes in Soybean?

(Normas de acordo com a revista Computers and Electronics in Agriculture)

### ABSTRACT

*Heterodera glycines* is a soybean-specific parasitic nematode responsible for economic yield losses worldwide. Soil and root sampling is important for monitoring *H. glycines*, but sampling cost is prohibitive for large areas. Remote sensing is a promising non-destructive technique for conveniently and precisely nematode monitoring, but ideal combinations between drone flight heights and spectral bands are unknown. The objective of this study was to optimize spectral detection of *H. glycines* by selecting the best multispectral bands at three drone flight heights. Large soybean fields infested with *H. glycines* were flown with a multispectral sensor at 40, 80, and 120 m, corresponding to pixels of 3, 6, and 9 cm respectively. In 2020 and 2021, soybean spectral reflectance was significantly associated with *H. glycines* found in roots and soil according to Pearson's correlation analyses, principal component analysis, and forward model selection. Visible spectral bands were best for the detection of plants attacked by *H. glycines*, while infrared spectral bands showed better results to optimize the detection of plants attacked by *P. brachyurus*. The most designed wave detection to optimize detection and the most designed wave detection to optimize detection. All soybeans can be detected from damage detected through 80 m study. Defining an ideal height and the best spectral bands to identify plants infested by *H. glycines* and *P. brachyurus* through images is an important tool to help the producer minimizing cost and time of image processing, field sampling and enabling control methods with localized application, however future research in relation to the flight height will be necessary to validate the results obtained in this study. Optimized flight height and spectral bands have the potential to reduce management costs by using drone imagery to guide nematode field sampling.

**Keywords:** digital agriculture; *Heterodera glycines*; unmanned aerial vehicles; drones; *Glycine max*; precision agriculture.

### 1. INTRODUCTION

Field sampling and laboratory analyses can be effective for preventing crop losses, but the cost and processing time of many samples can be prohibitive for extensive agriculture (Blevins et al., 1995; Dias et al., 2011). Remote sensing is a promising alternative for detecting plants' physiological responses to stressors without direct contact with plants or soil (Martinelli et al., 2015; Tetila et al., 2017; Niu et al., 2021). Accurate detection of infestations can reduce the time and cost of monitoring by guiding root and soil sampling and decreasing the number of samples sent to laboratory analyses (Zhang and Kovacs, 2012; Martins et al., 2017). Selecting the best spectral bands can optimize the stress detection, but the best flight and sensor settings are not typically determined

(Arantes et al., 2021). Forward model selection and Akaike's information criteria (AIC) have been used to optimize model selection (Alves et al., 2015, 2019).

The latest advances in drone and sensor technologies allowed data collection at much shorter time intervals than satellites and manned aircraft. Drone images also have a better spatial resolution (i.e., pixel size), providing spectral information at the plant level (Pimentel, 1995; Guedes and Silva, 2018; Iost Filho et al., 2020). Pixel is the smallest non-divisible element of the image representing the location and spectral information of the plants, soil, shadow, and other any element from the planet's surface (New, 2010). The pixels of the drone image typically vary from 1 to 30 cm depending on sensor and flight height (Lima et al., 2020).

In soybean, *Glycine max*, parasitic nematodes are important biotic stressors decreasing yield by around 30% (Allen et al., 2017; Nasu et al., 2018). Because of its worldwide importance for animal feed, oil, protein, and flour (Ramiro et al., 2019; Volpato et al., 2019), soybean requires intelligent efforts to safeguard production and prevent economic losses from nematodes and other pests. The soybean cyst nematode *Heterodera glycines* is a host-specific parasitic nematode of 0.4 to 0.8 mm in length commonly found on soybean worldwide (Peng et al., 2016; Allen et al., 2017; Nasu et al., 2019). The life cycle of this sedentary endoparasite lasts between 21 and 23 days. Females complete the infection cycle within the roots. Eggs remaining inside their body after death turn into a rigid structure of dissemination and resistance called cysts (Young, 1992). Cysts can remain viable in soil for up to 7 years without any plant host (Cares and Baldwin, 1995). Juveniles emerge from cysts early in the crop season. Plant infection starts with the second stage of the juvenile stage (Fragoso et al., 2007). Knowledge about the biology and ecology of *H. glycines* can be important for associating the nematodes in soil and roots with the expected plant physiological losses.

Plants attacked by *H. glycines* may be identified by clusters of yellow, short-size plants around the flowering development stage (Godoy, 2016). Visible symptoms typically disappear with crop development besides yield losses. Visible symptoms can also be easily confounded with other stressors such as water and nutritional deficiencies. Without the precise geographic location of the nematode clusters, nematicides are applied to the whole field in low doses (AMG's observation). This management strategy can increase the application cost and decrease product efficiency (Favoreto et al., 2019). Therefore, remote sensing is one of the most promising technologies to determine the location of attacked plants and increase the nematicides effectiveness by adjusting the higher effective doses to localized applications (Kroese et al., 2016; Bajwa et al., 2017; Guedes and Silva, 2018).

The objective of this study was to optimize spectral detection of *H. glycines* by selecting the best multispectral bands onboard the drone flying at three flight heights. We hypothesized that a) flight height would significantly affect the sensor capability of detecting soybean spectral responses to nematodes and b) larger pixel sizes from drones flying 120 m above the surface would be sufficient for plant-level spectral detection. Arantes et al. (2021) estimated the damage from *H. glycines* using soybean reflectance at the visible spectral range but were not able to optimize spectral band selection at different flight heights. Commercial application of drones for detecting nematodes requires

knowing if drone altitude needs to be adjusted according to different sensors, topography, and crop type.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### *2.2. Study area, exploratory flights, and sampling regions*

The study was carried out in dystrophic red latosol soil during the soybean crop seasons of 2020 and 2021. Fields were located near Montividiu city, GO, Brazil. This soybean-producing region is one of the most important in the country. The soybean fields selection was based on initial exploratory flights when the plants had five fully expanded trifoliolate leaves (i.e., V5 development stage). We prospected five farms with previous information about the natural infestation of *H. glycines* that were known to be cultivating susceptible cultivars to this nematode.

Because of the large size of the fields in the region, we flew a multirotor drone (Matrice 100 DJI, Shenzhen, China) equipped with an RGB sensor (20 MP CMOS, DJI, Shenzhen, China) at 120 m high for helping to locate potential areas with *H. glycines* (Figure 1a). The images were orthorectified (Pix4D 3.2.23, Pix4D SA, Lausanne, Switzerland). Yellow plants in images were potentially infested with *H. glycines* (QGIS Development Team, Boston, USA). The infestation was confirmed by subsequently entering the field, pulling some plants out, and checking for cysts in the roots.

Three sampling points were defined for each area chosen in the exploratory flights (Figure 1b). The sampling points were located based on the plants color gradient: the center of the cluster showing the most severe visual symptoms (point A); the edge of the cluster (i.e., transition between infested and healthy plants; point B), and outside the cluster showing predominantly green plants (i.e., potentially not affected by nematodes; point C). The sampling points were exported to a GPS receiver for guiding soil and root sampling (eTrex 30, Garmin Internacional, Olathe, KS).



**Figure 1** - Exploratory flight using a multirotor drone and an RGB sensor flying at 120 m high. Potential spots of plants infested with *Heterodera glycines* on soybean were identified by a trained researcher using orthomosaic images. A subsequent field visit was done to confirm the infestation.

### ***2.3. Spectral measurements***

A total of 24 sampling areas (i.e., 72 sampling points) were evaluated in the two years. When plants were at full flowering (R2 reproductive stage), we flew with another quadcopter drone (Inspire 2, DJI, China) equipped with an 8-band multispectral sensor: broadbands (625-740, 500-565, 440-485 nm); narrowbands (586, 615, 661, 775, 825 nm); NDVI sensor; and NDRE sensor (Dual Quad-Sensor, Senterra Inc. Minneapolis). Flights were performed with less than 20% cloud cover between 09:00 and 15:00 h to obtain good quality images. Within each field, flights were executed within two hours at 40, 80, and 120 m high, which corresponded to pixels of 3, 6, and 9 cm respectively (Figure 2). Lateral and frontal overlaps were set to 70%. Speed was set to 8 m/s. The images were orthorectified to create the mosaic of each evaluation date (Pix4D 3.2.23, Pix4D SA, Lausanne, Switzerland). The reflectance was obtained by the arithmetic mean of the pixel values in an area of interest of  $1.0 \times 0.5$  m ( $0.5$  m<sup>2</sup>) from the central part of each sampling point (QGIS software, QGIS Development Team, Boston, USA).



**Figure 2** - Orthomosaic images obtained with a quadcopter flying 40 (a), 80 (b), and 120 m high (c) for capturing spectral responses of soybean plants to *Heterodera glycines*. Sampling points at the center, edge, and outside the symptomatic clusters of plants.

#### **2.4. Nematological evaluations**

Root and soil sampling occurred on the same day of the spectral measurements using the multispectral sensor. A bucket of a composite sample was obtained by mixing four subsamples of plant and soil from 0-20 cm at each sampling point. From the mix, 10 g of roots were used for analysis. Fresh root mass was determined by weighing root material. Soil samples were processed by the centrifuge-flotation technique with sucrose (Jenkins, 1964). The juveniles, viable and unviable cysts were quantified in 100 cm<sup>3</sup> of soil (Loof 1991). In the roots, juveniles were extracted by grinding 10 g of root in a blender and centrifuging in sucrose and kaolin suspension (Coolen and D'Herde, 1972). The suspensions containing the material extracted from centrifugation, were evaluated under an optical microscope and Peters counting chamber (Southey, 1985). The identification of nematodes was determined with the aid of a morphological identification key (Loof, 1991). *Pratylenchus brachyurus* was found in the field samples because it is commonly found in the region (i.e., it would not be possible to isolate the nematode species under field conditions). Therefore, this study showed the predominant effects of *H. glycines* on soybean reflectance only. Field evaluations and visual inspections also supported the predominant effect of *H. glycines*.

The *H. glycines* females were quantified by washing the roots under strong jets of water and a set of overlapping sieves of 20 mesh and 100 mesh. The females that were trapped in the sieve of 100 mesh were collected and packed in beads. The remaining females from the aqueous suspension were filtered with filter paper (Andrade et al., 1995). After draining the excess water, the filter paper was placed on an acrylic plate. Viable and unviable females of *H. glycines* were determined at 10 g of roots. The *H. glycines* cysts were extracted by the method of sieving and suspension (Tihohod, 1993). The suspension containing the cysts was collected in beadings and later filtered on filter paper (Andrade et al., 1995).

## 2.5. Data Analysis

The values obtained from the 10 g of roots were converted to 1 g for visualization and statistical analyses. First, the mean soybean reflectance of each sampling area (0.5 m<sup>2</sup>) and nematological measurements were analyzed by Pearson's correlation analysis ("corrplot" package, R Development Core Team). Negative correlation values indicate inversely associated variables, while positive correlation values indicate variables increasing proportionally together. Coefficient of correlation ( $r$ ) ranges from -1 to 1. Values closer to 1 indicated stronger positive correlation. Values closer to -1 indicated stronger negative correlation.

Principal Component Analysis (PCA) was used to represent the variables in a biplot containing all nematodes and spectral measurements for each flight separately. Lastly, soybean spectral reflectance at each spectral band ( $x$ ) was used to estimate the number of nematodes ( $y$ ) using simple linear regression models ( $y \sim x + 1|block$ ). A variable was added as random in all following statistical analyses to quantify the effect of different sampling areas (*block*).

We considered that the number of nematodes in the roots represented the damage associated with nematode feeding, nutrient extraction, rhizosphere changes, and pathogen gateways. The cysts were considered the structures of dissemination and resistance and thus were associated with the complete cycle of nematodes in the area. Juveniles were considered indicative of nematode development. Thus, the statistical analysis assumed that the physiological effects on plants were predominantly caused by the nematodes found in the samples.

Forward model selection and Akaike's Information Criterion (AIC) were used to select the best prediction models for estimating damage caused by the nematodes on soybean at each flight height (Alves et al., 2019). The selection of models was performed for each flight and nematode species, individually ( $\alpha = 0.05$ , nlme library, R Development Core Team). The first variable added to models referred to the spectral band with the lowest P-value of the simple linear regressions. The selection of models was completed with only the first variable when the spectral bands were not associated with nematode damage (i.e.,  $P > 0.05$  for all simple linear regressions). The remaining spectral bands were added one by one to the model. The models incorporated new spectral bands using a combined criterion of lower AIC value and significant P-value for added spectral bands (Alves et al., 2019). The AIC was calculated using the generic function:  $AIC = 2\kappa - 2\ln(L)$ , where  $\kappa$  represented the number of parameters in the model, and  $L$  represented the maximum value of the likelihood function for the model. The best model presented the lowest AIC value.

## 3. RESULTS

### 3.1. Pearson's Correlation

For 40 m height (Figure 3a), the variable *Pratylenchus* root (R\_Pratt) showed a negative correlation for wavelengths in the visible region (586, 500-665, 625-740, 440-

485 and 625 nm) that is, when increasing the amount of *Pratylenchus* in the root, there is a decrease in the behavior of these wavelengths. There was no positive correlation.

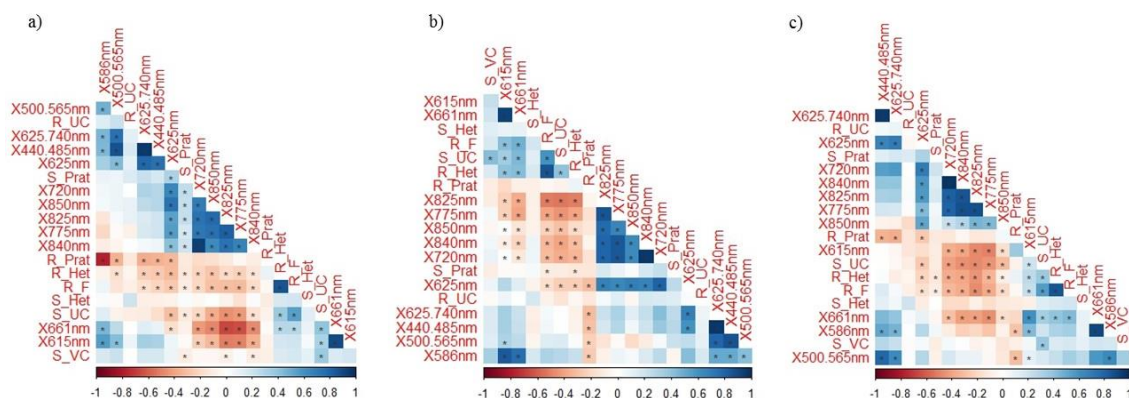
The variable *Heterodera*-root (R\_Het), showed a negative correlation for wavelengths mostly in the NIR region (720, 850, 825, 775 and 840 nm), also for wavelengths in the visible region (625-740 nm) and for the variables unviable root cyst (R\_UC) and *Pratylenchus*-soil (S\_Pratt), that is, when increasing the population of *Heterodera* in root, these variables decreased, which had a negative correlation.

There was a positive correlation of *Heterodera* in soil with the female root variables (R\_F) and non-viable soil cyst (S\_UC) and with the wavelength of 661nm, that is, when there is a high value of one, the value of the other variable will also be high. The variable *Heterodera*-soil (S\_Het) did not present any correlation with significant P-value. The variable *Pratylenchus*-soil (S\_Pratt) showed a positive correlation for wavelengths in the NIR region (720, 850, 825, 775, 840 nm) and a negative correlation for the wavelengths 625 and 661 nm, and for the variables *Heterodera*-soil, female-root and non-viable soil cyst.

For 80 m height (Figure 3b), the variable *Heterodera*-soil did not present any correlation with significant P-value. The variable *Pratylenchus*-soil did not present a positive correlation, only negative for variables female-root and *Heterodera*-root. The *Heterodera*-root variable presented mostly negative correlation for wavelengths in the NIR range (825, 775, 850, 840, 720 nm) and positive correlation for the 615 and 661 nm wavelengths and for the variables female-root and non-viable soil cyst. For the variable *Pratylenchus*-root, there was a negative correlation in the wavelengths in the visible region (625-740, 440-485, 500-565, 586 nm).

For the height of 120 m (Figure 3c), the variable *Heterodera*-soil did not present any correlation with significant P-value. The variable *Pratylenchus*-soil did not present a positive correlation, only negative for the variables *Heterodera*-root and female root. The variable *Heterodera*-root showed a negative correlation for the wavelengths 625, 720, 840, 775, 850 and 825 nm, and for the variable *Pratylenchus*-soil; and positive relationship for the variables unviabl soil cyst, female-root and *Heterodera*-root, and for the wavelengths 615 and 661 nm. The variable *Pratylenchus*-root did not present a significant positive correlation, only negative for wavelengths in the visible region (440-485, 625-740, 500-565, 586 nm).



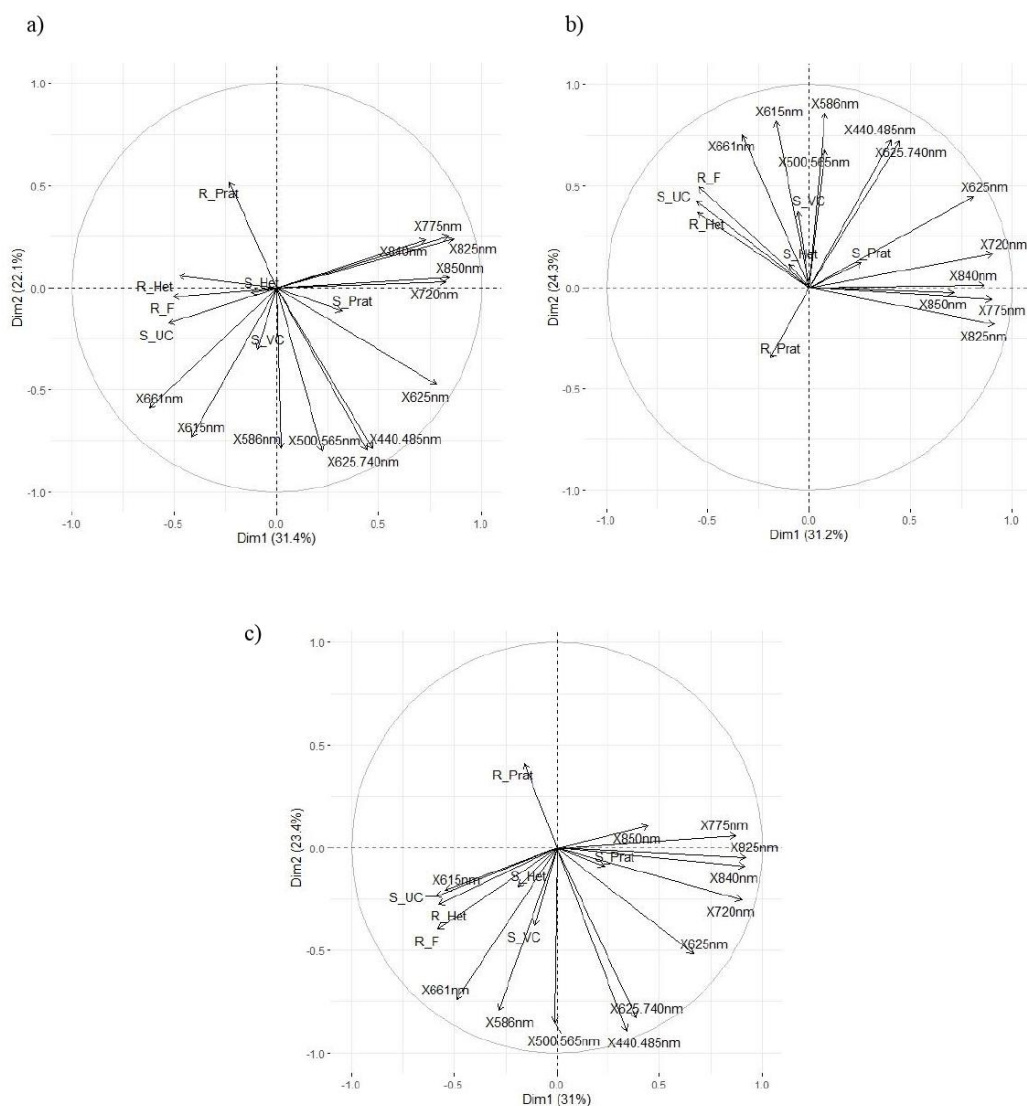


**Figure 3** - Pearson correlation between *Heterodera glycines* and *Pratylenchus brachyurus* number variables and spectral responses of soybean plants obtained by drone coupled with the Sentera sensor flying at three different heights: 40 m (a), 80 m (b), 120 m (c) . S\_Het (Soil *Heterodera*), S\_UC (Soil Unviable cyst), S\_VC (Soil Viable cyst), S\_Pr (Soil *Pratylenchus*), R\_Het (Root *Heterodera*), R\_Pr (Root *Pratylenchus*), R\_F (Root Female), R\_UC (Root Unviable cyst) ; Sensor center wavelengths: X625,740nm (625-740nm), X500,565nm (500-565nm), X440-485nm (440-485nm), X825nm (825nm), X586nm (586nm), X615nm (615nm), X775nm (775nm), X661nm (661nm), X625nm (NDVI – red (625nm)), X850nm (NDVI – nir (850nm)), X720nm (NDRE – red border (720nm)), X840nm (NDRE – nir (840nm)). Correlations with an asterisk have a significance level of 0.05.

### 3.2.

Figure 4 shows the analysis of principal components for the three different heights studied.

At the flight height of 40 m (Figure 4a) results were obtained in two dimensions that summarized 53.5% of the data variance, 31.4% in the first (Dim1) and 22.1% in the second dimension (Dim2). The variables *Heterodera*-root and female-root presented similar contributions to Dim2, this was verified by the variables that have a longer vector and that were closer to the Dim2 axis. A negative relationship was observed between *Pratylenchus*-root with wavelengths in the visible region (500-565nm, 440-485nm, 625-740nm, 625nm). There are high correlations between the viable soil cyst variables with the 661nm and 615nm wavelengths, as they formed acute angles between the variables, also between the *Pratylenchus*-soil variables with the 625nm wavelength. There is no correlation between *Pratylenchus*-root and the variables 775nm, 840nm and 825nm, as it forms an angle close to 90 degrees. There is no correlation between the variables *Heterodera*-soil and unviable soil cyst with the wavelength of 625nm, as it forms an angle close to 90 degrees, as shown in Figure 4a.



**Figure 4** - Principal Component Analysis (PCA) including variables of numbers of *Heterodera* glycines and *Pratylenchus* brachyurus and spectral responses of soybean plants obtained by drone coupled with the Sentra sensor flying at three different heights: 40 m (a), 80 m (b), 120 m (c). S\_Het (Soil *Heterodera*), S\_UC (Soil Unviable cyst), S\_VC (Soil Viable cyst), S\_Pr at (Soil *Pratylenchus*), R\_Het (Root *Heterodera*), R\_Pr at (Root *Pratylenchus*), R\_F (Root Female), R\_UC (Root Unviable cyst); Sensor center wavelengths: X625,740nm (625-740nm), X500,565nm (500-565nm), X440-485nm (440-485nm), X825nm (825nm), X586nm (586nm), X615nm (615nm), X775nm (775nm), X661nm (661nm), X625nm (NDVI – red (625nm)), X850nm (NDVI – nir (850nm)), X720nm (NDRE – red border (720nm)), X840nm (NDRE – nir (840nm)).

At the flight of 80 m height (Figure 4b) results were obtained in two dimensions that summarized 55.5% of the data variance, 31.2% in the first and 24.3% in the second dimension. A negative relationship was observed between *Pratylenchus*-root and bands in the visible region (440-485nm, 625-740nm, 625nm), the greater the population of *Pratylenchus* present in the root, the lower the reflectance of the bands in the visible region. There was also a negative relationship between *Pratylenchus*-root and *Pratylenchus*-soil, the greater the population present in the root, the smaller the population present in the soil. There are high correlations between the viable soil cyst variables with bands in the visible region (661nm, 615nm, 500-565nm, 586nm) as they formed sharp angles between the variables. There is no correlation between the female-root, unviable

soil cyst and *Heterodera*-root and *Heterodera*-soil variables with the bands in the infrared region (720nm, 840nm, 850nm, 775nm and 825nm), as it forms an angle close to 90 degrees, as shown in figure 2b.

At the flight of 120 m height (Figure 4c) results were obtained in two dimensions that summarized 54.4% of the data variance, 31% in the first and 23.4% in the second dimension. A negative relationship was observed between *Pratylenchus*-root and the bands (440-485nm, 625-740nm, 625nm). There are high correlations between the unviable soil cyst, *Heterodera*-root, *Heterodera*-soil and female-root variable with the 615nm band, as they formed acute angles between the variables, as well as the variables viable soil cyst, 661nm and 586nm. There is no correlation between the *Heterodera*-root, female-root and *Heterodera*-soil variables with the 720nm, 840nm and 825nm bands, as they form an angle close to 90 degrees, as shown in figure 4c.

### 3.3. Forward Model Selection

The band selection model for the year 2020/21 (Table 1) selected spectral bands that act in the visible and near infrared spectrum for the variables. That is, the bands selected in the model can optimize the detection of this variable. Also requiring smaller combinations of spectral bands. Models that showed negative values were not able to optimize detection.

**Table 1.** Forward model selection and Akaikes's Information Criterion (AIC) used in the selection of models using spectral bands to estimate damage caused by *Heterodera glycines* and *Pratylenchus brachyurus* in soybeans flown over with the same sensor at three flight altitudes in 2020/21.

<i>Variavel dependente</i>	<i>Altitude</i>		
	<b>40 m</b>	<b>80 m</b>	<b>120 m</b>
<i>Pratylenchus brachyurus</i> (soil)	$7,85 + 0,00005 \times \lambda_{615nm}$ ; P = 0,999; AIC = 450,71	$16,90 + 0,12 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,560; AIC = 404,87	$6,41 + 0,02 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,922; AIC = 458,17
<i>Pratylenchus brachyurus</i> (root)	$53,07 - 0,16 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,901; AIC = 630,73	$130,52 - 1,23 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,257; AIC = 564,66	$96,75 - 0,75 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,498; AIC = 640,91
<i>Heterodera glycines</i> (juveniles in soil)	$387,99 - 4,35 \times \lambda_{675nm-750nm}$ P = 0,035; AIC = 677,92	$3,30 + 1,09 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,527; AIC = 608,60	$364,33 - 4,02 \times \lambda_{615-750nm}$ P = 0,003; AIC = 689,04
<i>Heterodera glycines</i> (viable soil cyst)	$-12,76 + 0,30 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,402; AIC = 493,48	$-93,09 + 0,70 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,027; AIC = 488,98	$-121,53 + 0,90 \times \lambda_{530-570nm}$ P = 0,021; AIC = 496,62
<i>Heterodera glycines</i> (unviable soil cyst)	$20,13 + 0,68 \times \lambda_{825-850nm} - 0,85 \times \lambda_{825nm}$ P < 0,001; AIC = 424,74	$10,29 - 0,04 \times \lambda_{825-850nm} - 0,85 \times \lambda_{825nm}$ P = 0,726; AIC = 360,40	$16,55 - 0,11 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,485; AIC = 442,95
<i>Heterodera glycines</i> (juveniles in root)	$-48,49 - 0,07 \times \lambda_{765-725nm} + 0,74 \times \lambda_{530-570nm} - 0,29 \times \lambda_{640-700nm}$ P < 0,001; AIC = 395,12	$3,88 - 0,33 \times \lambda_{675-725nm}$ P < 0,001; AIC = 348,50	$23,05 - 0,15 \times \lambda_{675-725nm} + 0,50 \times \lambda_{675-725nm} - 0,25 \times \lambda_{640-700nm}$ P < 0,001; AIC = 370,59
<i>Heterodera glycines</i> (viable root cyst)	$-0,61 + 0,02 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,243; AIC = 199,03	$-0,61 + 0,02 \times \lambda_{615nm}$ P < 0,005; AIC = 194,38	$4,23 - 0,03 \times \lambda_{675-725nm}$ P = 0,017; AIC = 192,21

<i>Heterodera glycines</i> (unviable root cyst)	$3,33 - 0,04 \times \lambda_{775nm}$ P = 0,013; AIC = 155,53	$-0,57 + 0,02 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,220; AIC = 146,57	$-0,13 + 0,01 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,467; AIC = 164,39
--	---	--	--

Significant P-values were obtained for the variables unviable soil cyst soil and *Heterodera*-root at 40 m height; *Heterodera*-root and female-root to the height of 80 m; and *Heterodera*-soil and in root for 120 m height. The height that presented the lowest AIC values for all variables was 80 m, except for the female-root, which presented the lowest AIC value at the 120 m height (Table 1).

The band selection model for the year 2021/22 (Table 2) selected spectral bands that act in the visible spectrum for the variable *Heterodera glycines* in the soil. That is, the bands selected in the model can optimize the detection of this variable. Also requiring smaller combinations of spectral bands. Models that showed negative values were not able to optimize detection. Some variables were removed from the model. There were not enough *Pratylenchus brachyurus* numbers to affect spectrally.

**Table 2.** Forward model selection and Akaike's Information Criterion (AIC) to estimate by direct selection the best prediction model considering all 13 spectral bands initially, selecting a subset of spectral bands that optimize the estimation of damage caused by *Heterodera glycines* in soybean for each altitude of flight in two consecutive years in 2021/22.

<b>Dependent variable</b>	<b>Altitude</b>		
	<b>40 m</b>	<b>80 m</b>	<b>120 m</b>
<i>Pratylenchus brachyurus</i> (soil)	$1,49 - 0,01 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,546; AIC = 63,61	$0,66 - 0,0015 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,907; AIC = 72,20	$1,17 - 0,06 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,582; AIC = 71,90
<i>Heterodera glycines</i> (juveniles in soil)	$32,61 + 0,30 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,674; AIC = 173,74	$21,33 + 0,63 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,461; AIC = 219,38	$110,33 - 0,50 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,442; AIC = 219,53
<i>Heterodera glycines</i> (viable soil cyst)	$-15,73 + 0,33 \times \lambda_{615nm}$ P = 0,007; AIC = 98,03	$-28,95 + 0,31 \times \lambda_{630-690m}$ P = 2,94; AIC = 107,34	$-57,87 + 0,46 \times \lambda_{586nm}$ P = 5,695; AIC = 89,44

Significant P-value was obtained for the variable viable soil cyst at 40 m height; the lowest AIC values were obtained for *Heterodera glycines* in the soil at 40 m height and for viable soil cyst at 120 m height (Table 2).

#### 4. DISCUSSION

With the use of remote sensing and its improvements in agriculture, it became possible to increase the efficiency of optimizing nematode detection in the field, select spectral bands, better flight heights, and minimize their losses in agricultural production. The present study evaluated the relationship of soybean canopy reflectance in naturally infested areas at three different flight heights and sought to determine the best flight height and which sensor wavelengths were able to optimize the spectral detection of these areas.

The *H. glycines* variables presented mostly negative correlation in relation to the *P. brachyurus* variables (Figure 3 and Figure 4). This can be explained by their life habits

and competition between species. *H. glycines* nematodes are sedentary endoparasites and *P. brachyurus* are migratory endoparasites, this difference in population is explained by the fact that there is competition between species with different habits. Endoparasites with migratory habits can break the plant tissue, hindering the feeding of sedentary endoparasitic nematodes so, places where there is a greater population of one, may have a smaller population of the other (Lawn & Noel, 1990).

There was no significant correlation for the variable Heterodera-soil variable at the three heights. For *P. brachyurus* -soil there was a positive correlation only at the 80 m height in wavelengths in the infrared (nir) range. *Pratylenchus brachyurus* in root showed no positive correlation at any height, showing only negative correlation for wavelengths in the visible region and for *H. glycines*-root and female-root variables.

The positive correlation of wavelengths in the visible range with *H. glycines* variables and wavelengths in the nir range with *P. brachyurus* reinforces what Arantes et al. (2021) found in their work, where the spectral range of the visible were sufficient to estimate *H. glycines*, thus using low-cost sensors; and to estimate *P. brachyurus*, multispectral sensors containing the nir band are needed. These spectral changes of plants that occur in the visible region can be considered because of effects caused by nematode attacks bringing biophysical and biochemical changes, which can reduce biomass and photosynthetic pigments (Taiz and Zeiger, 2017). Bjawa et al. (2017) in their study also associates attacks of *H. glycines* with the spectral response of plants in the wavelength in the red region, which is responsible for the plant's energy absorption by the pigments; plants attacked by *H. glycines* have a high degree of chlorosis.

Wavelengths in the visible range, specifically the red band, are more affected by *H. glycines* due to its attack mode, which is mainly in the region of the root system, thus the plant loses its high-water absorption capacity and nutrients via xylem and by presenting chlorotic symptoms, which affects the absorption of sunlight for photochemical processes (Taiz and Zeiger, 2017).

The study of Arantes et al. showed that multispectral sensors were more efficient for the detection of *P. brachyurus*, since the wavelength that is capable of estimating damage to this nematode is in the NIR range. In our study, we found this result when performing Pearson's correlation, where *P. brachyurus* positively correlated with wavelengths in the NIR range, the same occurred in relation to PCA. However, when creating forward model models, the wavelengths selected as the best to estimate damage from this nematode, were in the red region. This can be explained because there are not enough numbers of *P. brachyurus* to affect spectrally, so there is little population in relation to *H. glycines* showing a spectral response in the visible region, since the greatest damage is caused by *H. glycines*.

Both heights showed similar detection capabilities. However, through the AIC it is possible to differentiate a better height for flights that were at 80 m. Choosing an ideal height is a very important factor for the producer, as it can save time to obtain data, longer battery life, and consequently lower battery costs, which is an accessory that has a high value to obtain.

## 5. CONCLUSION

In conclusion, the variables of *Heterodera glycines* and *Pratylenchus brachyurus* present in this study influence the choice of spectral band and can be identified with modifications in the mathematical model/band association and/or flight height. Wavelengths in the visible region were shown to be more suitable for optimizing the detection of *H. glycines* and wavelengths in the nir region were shown to be more suitable for optimizing the detection of *P. brachyurus*.

The flight height affects the spectral detection capacity of the sensor, despite all being able to detect damage caused by the nematodes present in the study to soybean plants. Through the AIC was defined that the best height is 80 m.

Defining an ideal height and the best spectral bands to identify plants infested by *H. glycines* and *P. brachyurus* through images is an important tool to help the producer minimizing cost and time of image processing, field sampling and enabling control methods with localized application, however future research in relation to the flight height will be necessary to validate the results obtained in this study.

## 6. REFERENCES

- ALLEN, T.W.; BRADLEY, C.A.; SISSON, A.J.; BYAMUKAMA, E.; CHILVERS, M.I.; COKER, C.M.; ... & Wrather, J.A. Soybean yield loss estimates due to diseases in the United States and Ontario, Canada, from 2010 to 2014. **Plant Health Progress**, v. 18, n. 1, p. 19-27, 2017.
- ALLEN, T.W.; BRADLEY, C.A.; SISSON, A.J.; BYAMUKAMA, E.; CHILVERS, M.I.; COKER, C.M.; ... & Wrather, J.A. Soybean yield loss estimates due to diseases in the United States and Ontario, Canada, from 2010 to 2014. **Plant Health Progress**, v. 18, n. 1, p. 19-27, 2017.
- ALVES, T.M.; MACRAE, I.V.; KOCH, R.L. Soybean aphid (Hemiptera: *Aphididae*) affects soybean spectral reflectance. **Journal of Economy Entomology**, v. 108, n. 6, p. 2655-2664, 2015.
- ALVES, T.M.; R.D. MOON; I.V.MacRae; R.L.KOCH. Optimizing band selection for spectral detection of *Aphis glycines* Matsumura in soybean. **Pest Management Science**, v. 75, p. 42-949, 2019.
- ANDRADE, P.J.M.; ASMUS, G.L.; SILVA, J.F.V. A new system for detection and counting of *Heterodera glycines* cysts recovered from soil samples. **Brazilian Plant Pathology**, v. 20, p. 358, 1995.
- ARANTES, B. H. T.; MORAES, V. H.; GERALDINE, A. M.; ALVES, T. M.; ALBERT, A. M.; SILVA, G. J. D.; CASTOLDI, G. Spectral detection of nematodes in soybean at flowering growth stage using unmanned aerial vehicles. **Ciência Rural**, v. 51, 2021.
- BAJWA, S.G.; RUPE, J.C.; MASON, J. Soybean disease monitoring with leaf reflectance. **Remote Sensing**, v. 9, p. 127-140, 2017.
- BLEVINS, D. G.; DROPKIN, V. H.; LUEDDERS, V. D. 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**, v.18, n.3, p.579-591, 1995.

CARES, J.E.; BALDWIN, J.G. Cyst-forming nematodes of the genus *Heterodera*. In: LUZ, W.C.; FERNANDES, J.M.; PRESTES, A.M.; PICININI, E.C. Annual Review of Plant Pathology. Passo Fundo: **Annual review of plant pathology**, 1995, v. 3, p. 29-84.

COOLEN, W.A.; D'HERDE, C.J. A method for the quantitative extraction of nematodes from plant tissue, **Ghent: State Agriculture Research Center**, 1972.

DIAS, W.P.A.; GARCIA, J.F.V.; SILVA, E.G.E.S. CARNEIRO. **Soybean nematodes: identification and control**. Londrina, Embrapa Soja, p. 1, 2011.

FAVORETO, L.; Meyer, M. C.; Dias-Arieira, C. R.; Machado, A. C. Z.; Santiago, D. C.; Ribeiro, N. R. Diagnosis and management of phytonematodes in soybean. **Agricultural Report**, v. 40, n. 306, p. 18-29, 2019.

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.

FRAGOSO, R.R; LOURENÇO, I.T.; VIANA, A.A.B.; SOUZA, D.S.L.; ANDRADE, R.U.; MEHTA, A.; BRASILEIRO, A.C.M.; PINTO, E.R.C.; LIMA, L.M.; ROCHA, T.L.; SA, M.F.G. **Molecular plant-nematode interaction**. Planaltina – DF: Embrapa Cerrados, 56 p., 2007.

GODOY, C. V. et al. Soy diseases. **Plant Pathology Manual**, v. 2, p. 657-676, 2016.

GUEDES, J.C.F.; SILVA, S.M.P. Remote sensing in the study of vegetation: Physical principles, sensors and methods. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, v.12, n.29, Pp. 127-144. mai./ago. de 2018.

IOST FILHO, F. H.; HELDENS, W. B., KONG, Z.; DE LANGE, E. S. Drones: innovative technology for use in precision pest management. **Journal of economic entomology**, v. 113, n. 1, p. 1-25, 2020.

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

KNIPLING, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment** 3:155-159. 1970.

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.

LAWN, D. A.; NOEL, G. R. Effects of temperature on competition between *Heterodera glycines* and *Pratylenchus scribneri* on soybean. **Nematropica**, 20, 57-69, 1990.

LIMA, G.A.; BRAVO, D.T.; DE ARAÚJO, S.A. Use of convolutional neural networks for the detection of objects in aerial images acquired by drones. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 50702-50713, 2020.

LOOF, P. A.A. The family *Pratylenchidae* Thorne, 1949. In: **Manual of agricultural nematology**. New York, NY, USA, Marcel Dekker, p. 363-421, 1991.

MARTINELLI, F.; SCALENGHE, R.; DAVINO, S.; PANNO, S.; SCUDERI, G.; RUISI, P.; VILLA, P.; STROPPIANA, D.; BOSCHETTI, M.; GOULART, L.R.; DAVIS, CE.;

- DANDEKAR, A.M. Advanced methods of plant disease detection. A review. **Agronomy for Sustainable Development**. 35, 1-25, 2015.
- 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.
- MOLIN, J.P.; AMARAL, L.R.; COLAÇO, A.F. **Precision agriculture**. 1ed. São Paulo: Oficina de textos, 2015.
- MYES, V.I. Soil water and plant relations. In: National Academy of Sciences. **Remote Sensing with special reference to agricultural and forestry**. Washington. 1970.
- NASU, É. D. G. C., AMORA, D. X., MONTEIRO, T. S. A., ALVES, P. S., DE PODESTÁ, G. S., FERREIRA, F. C., & DE FREITAS, L. G. Pochonia chlamydosporia applied via seed treatment for nematode control in two soil types. **Crop protection**, v. 114, p. 106-112, 2018.
- NIU, Y.; HAN, W.; ZHANG, H.; ZHANG, L.; CHEN, H. Estimating fractional vegetation cover of maize under water stress from UAV multispectral imagery using machine learning algorithms. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 189, p. 106414, 2021.
- NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 3380p. 2010.
- PENG, D. L.; PENG, H.; WU, D. Q.; HUANG, W. K.; YE, W. X.; CUI, J. K. First Report of Soybean Cyst Nematode (*Heterodera glycines*) on Soybean from Gansu and Ningxia China. *Plant Disease*, 2016.
- PIMENTEL, D. Amounts of pesticides reaching target pests: environmental impacts and ethics. **Journal agricultural environmental ethics**. 8: 17-29.1995.
- RAMIRO, J.; CIAMPI-GUILLARDI, M.; CALDAS, D. G. G.; MORAES, M. H. D. de; BARBIERI, M. C. G.; PEREIRA, W. V.; MASSOLA, J.R, N. S. Quick and accurate detection of *Sclerotinia sclerotiorum* and *Phomopsis* spp. in soybean seeds using qPCR and seed-soaking method. **Journal of Phytopathology**, v. 167, n. 5, p. 273-282, 2019.
- SOUTHEY, J.F. Laboratory methods for work with plant and soil nematode. **Technical Bulletin. Ministry of Agriculture and Fisheries**, n. 2, 1985.
- TAIZ, L., ZEIGER, E. **Plant physiology**. 6. ed., Artmed, p. 171-180, 2017.
- TETILA, E. C.; MACHADO, B. B.; BELETE, N. A.; GUIMARÃES, D. A.; PISTORI, H. Identification of soybean foliar diseases using unmanned aerial vehicle images. **IEEE Geoscience and remote sensing letters**, v. 14, n. 12, p. 2190-2194, 2017.
- TIHOHOD, D. **Applied Agricultural Nematology**, FUNEP - UNESP, Jaboticabal, 372 p, 1993.
- VOLPATO, L., ALVES, R. S., TEODORO, P. E., RESENDE, M. D. V. de, NASCIMENTO, M., NASCIMENTO, A. C. C., LUDKE, W. H., SILVA, F. L. da & BORÉM, A. Multi-trait multi-environment models in the genetic selection of segregating soybean progeny. **Plos One**, v. 14, n. 4, p. 1-22, 2019.



WEI, T. AND SIMKO, V. **R package "corrplot"**: Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.84). Available from <https://github.com/taiyun/corrplot>. 2017.

YOUNG, L.D. Epiphytology and life cycle. In: RIGGS, R.D.; WRATHER, J.A. **Biology and management of the soybean cyst nematode**. St. Paul: APS Press, p. 27-36, 1992.

ZHANG, C.; KOVACS, J.M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. **Precision agriculture**, v. 13, n. 6, p. 693-712, 2012.

ZHANG, H.; SONG, B. H. RNA-seq data comparisons of wild soybean genotypes in response to soybean cyst nematode (*Heterodera glycines*). **Genomics Data**, v. 14, p. 36-39, 2017.