



NELSON JÚNIOR DIAS VILELA

**USE OF AERIAL IMAGERY AND HIGH-THROUGHPUT
PHENOTYPING IN SOYBEAN CROP**

**LAVRAS-MG
2023**

NELSON JÚNIOR DIAS VILELA

**USE OF AERIAL IMAGERY AND HIGH-THROUGHPUT PHENOTYPING IN
SOYBEAN CROP**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi
Orientador

**LAVRAS-MG
2023**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Vilela, Nelson Júnior Dias.

Use of aerial imagery and high-throughput phenotyping in
soybean crop / Nelson Júnior Dias Vilela. - 2023.

65 p.: il.

Orientador(a): Adriano Teodoro Bruzi.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Ferrugem asiática. 2. Fenotipagem de alto rendimento. 3.
Imagens aéreas. I. Bruzi, Adriano Teodoro. II. Título.

NELSON JÚNIOR DIAS VILELA

**USO DE IMAGENS AÉREAS E FENOTIPAGEM DE ALTO RENDIMENTO NA
CULTURA DE SOJA**

**USE OF AERIAL IMAGERY AND HIGH-THROUGHPUT PHENOTYPING IN
SOYBEAN CROP**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 28 de julho de 2023.

Dr. Adão Felipe dos Santos

Dr. Arthur Tavares de Oliveira Melo

Dra. Christiane Augusta Diniz Melo

Dr. Gabriel Mendes Villela

UFLA

Inova Genética Ltda

UFLA

GDM Seeds

Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi
Orientador

**LAVRAS-MG
2023**

*Aos meus pais, Nelson Antonio Vilela e Ilma Maria Leite Dias, e aos demais familiares, pelo carinho e confiança com que sempre me ajudaram, apoiaram e incentivaram para que eu conseguisse chegar até aqui. À minha noiva Jessica Francisco Raymundo que esteve ao meu lado durante essa caminhada me incentivando e acreditando nos meus sonhos.
Com todo amor, respeito, admiração e gratidão.
Dedico*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Agricultura (DAG), pela oportunidade concedida para a realização do mestrado.

Aos meus pais, Nelson Antonio Vilela e Ilma Maria Leite Dias, pelo apoio incondicional e valores transmitidos.

Aos demais familiares, pelo apoio e ajuda durante todas as etapas da minha formação.

À minha noiva Jéssica Francisco Raymundo, pelo amor, companheirismo, compreensão e incentivo, e por ser minha fonte de inspiração.

Ao Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi, pela amizade, orientação, dedicação e ensinamentos que foram essenciais para meu crescimento profissional.

Ao Prof. Dr. Gabriel Ferraz e ao Prof. Dr. Lucas Santana, pela colaboração na coleta das imagens.

Ao Msc. Mateus Ribeiro Piza e ao Msc. Marcelo Junqueira Ferraz pela colaboração com as análises das imagens e dos dados.

Aos integrantes do Grupo Pesquisa Soja, pela convivência, amizade, companheirismo, ensinamentos e ajuda na condução dos experimentos.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

A ferrugem asiática da soja, causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi*, é a doença mais severa da cultura e pode causar perdas de produtividade de até 100%. Outro patógeno que merece destaque na cultura é o oídio (*Erysiphe diffusa*), cujo o recrudescimento tem se tornado destaque nos últimos anos. Logo, com o objetivo de se manter alto rendimento de grãos o número de aplicações foliares com fungicidas tem aumentado sobremaneira. Assim, o desenvolvimento de novas cultivares resistentes é um passo primordial na preservação da produtividade potencial da cultura e o emprego de multilinhas figura-se como uma estratégia promissora na busca pela resistência durável. O uso de imagens aéreas e fenotipagem de alto rendimento na cultura da soja é uma abordagem inovadora que tem ganhado destaque na agricultura moderna, pois permite a obtenção de informações detalhadas em larga escala de forma rápida, eficiente, objetiva e com baixo custo quando comparada com metodologias tradicionais. Dessa forma, objetivou-se correlacionar índices de vegetação obtidos por veículos aéreos não tripulados com a produtividade de grãos, severidade da ferrugem asiática e de oídio na cultura da soja em condições tropicais. Foram avaliadas seis cultivares de soja comerciais com tecnologia INOX® (TMG 7060 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7262 RR, TMG 7062 IPRO, TMG 7363 RR, TMG 7067 IPRO), uma multilinha (mistura de linhagens) e uma testemunha suscetível a ferrugem asiática e oídio (M6410 IPRO). Os experimentos foram conduzidos em Lavras, Ijaci e Nazareno, no estado de Minas Gerais, na safra 2020/21. O delineamento utilizado foi o de blocos completos casualizados, sendo os tratamentos compostos em parcelas subdivididas em faixas, 4 x 8 (quatro manejos de aplicações de fungicida e sete cultivares + uma multilinha), com três repetições, sendo o número de aplicações dispostos nas parcelas e as cultivares nas sub parcelas. As imagens foram coletadas usando dois drones, um DJI Mavic Pro equipado com câmera vermelho-verde-azul (RGB) e um DJI Matrice 100 com câmera Parrot Sequoia (multiespectral). Foram avaliados os caracteres severidade da ferrugem asiática, severidade de oídio, índice de desfolha, produtividade de grãos e os índices de vegetação NDVI e MPRI. Utilizou-se a análise conjunta (multiambiente) e análise de parcela subdividida no tempo. As análises estatísticas dos dados foram realizadas utilizando o ambiente R. Os índices de vegetação NDVI e MPRI apresentam alta correlação entre si, o que permite a utilização tanto de câmeras RGB, quanto multiespectral para o emprego da fenotipagem de alto rendimento na avaliação da produtividade de grãos e severidade de oídio na cultura da soja em clima tropical de altitude. Não houve correlação significativa entre a severidade de ferrugem asiática e os demais caracteres avaliados, o que dificulta o emprego de imagens aéreas visando a quantificação da severidade da doença de *Phakopsora pachyrhizi* em condições tropicais.

Palavras-chave: Interação genótipo x ambiente. Ferrugem asiática. Fenotipagem de alto rendimento. Imagens aéreas.

ABSTRACT

Asian soybean rust, caused by the fungus *Phakopsora pachyrhizi*, is the most severe disease in the crop and can cause yield losses of up to 100%. Another pathogen that deserves attention in the crop is powdery mildew (*Erysiphe diffusa*), which has seen a resurgence in recent years. Therefore, in order to maintain high grain yields, the number of foliar applications of fungicides has greatly increased. Thus, the development of new resistant cultivars is a crucial step in preserving the potential productivity of the crop, and the use of multilines emerges as a promising strategy in the pursuit of durable resistance. The use of aerial imagery and high-throughput phenotyping in soybean crop is an innovative approach that has gained prominence in modern agriculture, as it allows for the rapid, efficient, objective, and cost-effective collection of detailed information on a large scale when compared to traditional methodologies. Thus, the objective was to correlate vegetation indices obtained from unmanned aerial vehicles with grain yield, severity of Asian soybean rust and mildew severity in soybean crops under tropical conditions. Six commercial soybean cultivars with INOX® technology (TMG 7060 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7262 RR, TMG 7062 IPRO, TMG 7363 RR, TMG 7067 IPRO), a multiline (a mixture of lines), and a susceptible control for Asian soybean rust and powdery mildew (M6410 IPRO) were evaluated. The experiments were conducted in Lavras, Ijaci, and Nazareno, in the state of Minas Gerais, Brazil, during the 2020/21 growing season. The experimental design used was a randomized complete block design, with treatments decomposed into split-plot strips, 4 x 8 (four fungicide application managements and seven cultivars + one multiline), with three replications, with the number of applications in the plots and cultivars in the subplots. The images were collected using two drones, a DJI Mavic Pro equipped with a red-green-blue (RGB) camera and a DJI Matrice 100 with a Parrot Sequoia (multispectral) camera. The evaluated traits included severity of Asian soybean rust, powdery mildew severity, defoliation index, grain yield, and the vegetation indices NDVI and MPRI. Joint analysis (multi-environment) and split-plot analysis over time were performed. Statistical analyses were conducted using the R environment. The NDVI and MPRI vegetation indices showed a high correlation, allowing for the use of both RGB and multispectral cameras in high-throughput phenotyping for evaluating grain yield and powdery mildew severity in soybean crops under tropical highland climates. There was no significant correlation between Asian soybean rust severity and the other evaluated traits, which complicates the use of aerial images for quantifying the severity of *Phakopsora pachyrhizi* in tropical conditions.

Keywords: Genotype x environment interaction. Asian soybean rust. High-throughput phenotyping. Aerial imagery.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
2.1 A cultura da soja.....	11
2.2 Ferrugem asiática da soja (FAS).....	13
2.3 Resistência genética para o controle da ferrugem asiática.....	16
2.4 Oídio da soja (<i>Erysiphe difusa</i>).....	18
2.5 Imagens aéreas e fenotipagem de alto rendimento.....	20
REFERÊNCIAS.....	26
CAPÍTULO 2 ASSOCIATION BETWEEN VEGETATION INDICES OBTAINED THROUGH UAV WITH GRAIN YIELD AND DISEASE SEVERITY IN SOYBEAN	36
1 INTRODUCTION.....	37
2 MATERIALS AND METHODS.....	38
2.1 Study area.....	38
2.2 Genetic treatments and experimental process.....	40
2.3 Data collection.....	42
2.4 Statistical analysis of phenotypic data.....	45
3 RESULTS and DISCUSSION.....	48
4 CONCLUSIONS.....	61
REFERENCES.....	62

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO

O maior desafio para as áreas de ciências agrárias e para o melhoramento de plantas é atender às necessidades de uma população que deve atingir até 2050 mais de 9 bilhões de pessoas (UNESA, 2019). Esse objetivo é desafiador porque a taxa atual de ganho genético é de 1,3% ao ano, o que é insuficiente para acompanhar o crescimento populacional. Para se obter cultivares com estabilidade e elevada produção de grãos em diferentes ambientes é necessária uma abordagem interdisciplinar, associando o melhoramento de plantas com a fisiologia, agronomia e engenharia. A associação dessas áreas contribui para uma melhor conexão e entendimento da relação genótipo/fenótipo, resultando em cultivares de alto rendimento e tolerantes a estresses (LEMOS et al., 2023).

Avanços em técnicas como o sequenciamento do DNA também se perfaz uma ferramenta para atingir esses objetivos; no entanto, a falta de acesso a recursos avançados de fenotipagem limita a capacidade de se elucidar caracteres de herança quantitativa tais como produção de matéria verde e seca, produtividade de grãos e tolerância a estresses abióticos, limitando assim, o desenvolvimento de cultivares tolerantes e/ou resistentes (SINGH et al., 2016).

O uso de imagens aéreas obtidas por meio de aeronaves remotamente pilotadas (RPA's), tem se tornado cada vez mais acessível, com a redução no custo dos equipamentos e softwares utilizados para o tratamento das imagens e composição de ortomosaicos. Na última década, imagens aéreas obtidas com RPA têm proporcionado novas visões do ambiente produtivo, subsidiando a tomada de decisão sobre práticas para aprimorar os sistemas de produção, focando no aumento de produtividade e/ou redução de custos. Essa é uma área de conhecimento em franca expansão e a divulgação de informações sobre o tema é importante para acelerar o uso dos conhecimentos gerados pela pesquisa (EMBRAPA, 2018).

A RPA é uma plataforma de sensoriamento remoto que pode ser equipada com diferentes sensores capazes de coletar informações valiosas sobre o dossel das culturas. Comumente utilizado na agricultura são os sensores simples e multiespectrais, abrangendo o espectro eletromagnético visível (RGB) e infravermelho (NIR), respectivamente (QUEIROZ et al., 2022). E durante o ciclo da cultura, as plantas apresentam diferentes respostas espectrais o que levou ao desenvolvimento de índices de vegetação. Os índices de vegetação baseados nos valores de reflectância, são associados aos aspectos fisiológicos, fitossanitários e

fitotécnicos das plantas (HENRIQUES et al., 2021). As informações obtidas por sensores RGB apesar de provarem ser econômicas em estudos de fenotipagem, os índices gerados podem apresentaram erros na identificação da vegetação, principalmente na zona que delimita a vegetação e o solo (FUENTES-PEAILILLO et al., 2018). Além de sofrer influência das condições de radiação solar heterogêneas, gerando índices de vegetação com valores variados (BENDIG et al., 2015).

Estimar o potencial produtivo das culturas durante o ciclo de desenvolvimento sempre foi um dos objetivos da pesquisa agrícola. A produtividade é determinada por um conjunto de fatores governados pelas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, por fatores associados ao clima, como a temperatura e a precipitação e suas interações com fatores bióticos como as pragas e doenças, além das características genéticas das plantas (EMBRAPA, 2018). Neste contexto, o emprego de imagens aéreas figura-se como uma ferramenta oportuna para geração de imagens aéreas obtidas com drones e por consonância a estimação de índices de vegetação que possam ser correlacionados com a produtividade de grãos.

A fenotipagem de plantas é a avaliação abrangente de características complexas, como crescimento, desenvolvimento, tolerância, resistência, arquitetura, fisiologia, ecologia, produção e a medição básica de parâmetros quantitativos individuais que formam a base para características mais complexas (IPPN, 2019). Para atingir esse objetivo, a fenotipagem recorre a conhecimentos das ciências biológicas, ciência da computação, matemática e engenharia.

Atualmente, as avaliações das características fenotípicas para resistência a doenças em programas de melhoramento dependem amplamente da avaliação visual de especialistas, sendo esta laboriosa e podendo gerar viés entre os diferentes avaliadores e as diferentes repetições experimentais. Portanto, a fenotipagem de plantas se tornou um importante campo de pesquisa no melhoramento de plantas (YU et al., 2016).

Dessa forma, objetivou-se correlacionar índices de vegetação obtidos por meio de uma RPA com a produtividade de grãos, severidade de ferrugem asiática e severidade de oídio na cultura da soja em condições tropicais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cultura da soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma planta originária da China que foi domesticada há cerca de cinco mil anos, a partir da espécie silvestre *Glycine soja* (HYMOWITZ, 1970). A sua comercialização iniciou-se no século XVII, embora restrito aos países orientais, como China e Japão. Segundo CÂMARA (2011), no final do século XV e início do século XVI, a leguminosa foi trazida para o ocidente através de navios europeus e foi introduzida na Europa como planta ornamental. A partir deste ponto, foram realizados estudos científicos acerca da produtividade e do desenvolvimento da espécie. O interesse pelo cultivo da soja se deu no fim do século XIX e início do século XX, quando os norte-americanos iniciaram a sua exploração comercial, primeiro como forrageira e, posteriormente, como grãos.

No Brasil, as mais antigas citações encontradas na literatura sobre soja se referem a experimentos conduzidos na Bahia por Gustavo Dutra em 1882. No entanto, a cultura apresentou baixa adaptação a latitude do estado, e novas cultivares foram introduzidas nos estados de São Paulo e Rio Grande do Sul, em 1891, as quais obtiveram um melhor desempenho (SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015).

No Rio Grande Sul, a soja reencontrou condições favoráveis para se desenvolver e expandir, devido à semelhança climática com o local de origem dos cultivares nos Estados Unidos. Em meados dos anos 50, com a política de incentivos fiscais à produção de trigo, a soja passou a ser praticada em larga escala, sendo adotada como a melhor opção para o cultivo de verão na rotação com o trigo de inverno (EMBRAPA, 2004).

A partir da década de 70, com a melhora do preço no mercado mundial, o cultivo da soja passou a ter maior importância entre as culturas implantadas no Brasil. Nesse momento, os estados do Rio Grande do Sul e Paraná eram os principais produtores do grão no país. O desenvolvimento de cultivares adaptadas para diferentes regiões e investimentos em pesquisas permitiram a expansão do cultivo para áreas de cerrado, o que colocou o Brasil como destaque entre os principais produtores de soja no mundo (BORÉM, 2005).

A sojicultura contribuiu para uma revolução socioeconômica e tecnológica das lavouras brasileiras, proporcionando progresso e desenvolvimento de atividades agrícolas. O processo de mecanização e investimentos em novas tecnologias foi maximizado, o que

resultou na expansão da fronteira agrícola, na profissionalização e no incremento de transações comerciais internacionais. Isso ajudou a impulsionar outras áreas da agroindústria nacional, como a suinocultura e avicultura (EMBRAPA, 2014).

O Brasil deverá colher 315,8 milhões de toneladas de grãos em 2022/2023, em uma área de 78,1 milhões de hectares, e a soja (*Glycine max* (L.) Merr.) se destacou como a principal cultura semeada. Atualmente, corresponde à cerca de 56% da área total semeada com grãos no país. A boa rentabilidade da cultura estimulou os produtores a cultivá-la (CONAB, 2023).

O Brasil está situado no mercado internacional como o maior produtor mundial de soja. O grão de soja é extremamente importante, não só como fonte de alimento, mas também como fonte de energia renovável (EMBRAPA, 2014). A região Centro-Oeste é responsável por quase metade da produção nacional, e juntamente com a região Sul, contribui com mais de 75% da produção nacional. Em uma visão geral, a soja passou de uma área cultivada de 6,9 milhões de hectares na safra 1976/77, com produção de 12,1 milhões toneladas, para 44,0 milhões de hectares na safra 2022/23, com produção total estimada de 155,7 milhões de toneladas. Nota-se grande aumento na produtividade média nacional, que passou de 1.748 kg ha⁻¹ para 3.537 kg ha⁻¹, respectivamente (CONAB, 2023).

O complexo agroindustrial da soja tem expressiva importância socioeconômica para o Brasil, pois movimenta um amplo número de agentes e organizações ligados aos mais diversos setores socioeconômicos, como empresas de pesquisa e desenvolvimento, fornecedores de insumos, indústrias de máquinas e equipamentos, produtores rurais, cooperativas agropecuárias, cooperativas agroindustriais, processadoras, produtores de óleo, fabricantes de ração e usinas de biodiesel, dentre outras. Em outros termos, o supracitado complexo é um vital gerador de riquezas, empregos e divisas, se transformando em um dos principais vetores de desenvolvimento regional do país (EMBRAPA, 2014).

Visto que a demanda por alimentos e fontes bioenergéticas como a soja é crescente, cada vez mais se torna necessário ampliar a produção brasileira do grão, associando o aumento de produtividade, a adaptação da cultura a novas áreas agricultáveis e sistemas de produção agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

2.2 Ferrugem asiática da soja (FAS)

Até 1992, a *P. pachyrhizi* foi reconhecida como a única espécie que causa a ferrugem da soja, mas Ono; Buriticá e Hennen (1992) desenvolveram um estudo detalhado da comparação entre isolados americanos e asiáticos. Eles demonstraram que os isolados da Ásia e Austrália eram morfologicamente distintos da patogênese dos isolados americanos, sendo proposta a separação do agente causal da ferrugem da soja em duas espécies. Então, deram o nome de *Phakopsora pachyrhizi* do Hemisfério Oriental (Ásia e Austrália) e *Phakopsora meibomia* do Hemisfério Ocidental.

P. pachyrhizi foi relatada pela primeira vez no Japão, em 1903. Nas primeiras décadas desse século, a ferrugem da soja foi descrita em todo o Hemisfério Oriental, mas com registros de epidemias severas apenas nas regiões tropicais e subtropicais da Ásia e Austrália (BROMFIELD, 1984; GRAU; HARTMAN; SINCLAIR; RUPE, 1999).

Phakopsora pachyrhizi é nativo do leste da Ásia e Oceania e era exclusivo dessas regiões até o início da década de 50. Em 1951, foi identificada a ferrugem asiática na Índia (SHARMA; MEHTA, 1996), e em 1994 no Havaí, EUA (KILLGORE; HEU; GARDNER, 1994). Durante a segunda metade da década de 90, o patógeno disseminou-se pelo continente africano (LEVY, 2005).

DESLANDES (1979) descreveu dentro de campos de teste de soja, a presença de ferrugem na cidade de Lavras (MG), esta questão levantou um risco potencial para a produção dos Brasil. A não confirmação de possíveis danos, ao longo dos anos, reduziu a prioridade da pesquisa em doenças. Na safra 1990/91, a ferrugem desenvolveu epidemias em Minas Gerais e no Distrito Federal. Estes surtos esporádicos, principalmente em cultivares suscetíveis, indicaram o potencial destrutivo da doença. Em áreas experimentais da Universidade Federal de Uberlândia, houve ferrugem severa em cultivares suscetíveis, como a MG/BR 46 (Conquista) (JULIATTI et al., 2003).

Apesar do achado de *P. pachyrhizi* em amostras, o primeiro relato da doença (YORINORI, 2002) é considerado no início dos anos 2000. Esse ano foi marco inicial da ferrugem asiática no continente americano, pois a partir desta data, a doença foi rapidamente disseminada pelo Hemisfério Ocidental e começou a ocorrer em níveis epidêmicos nos principais estados produtores de soja no Brasil, causando danos de 10 a 80% na produção. O custo dos danos causados pela ferrugem, de 2002/2003 a 2016/2017, atingiu o montante de US\$ 15 bilhões (EMBRAPA, 2017).

Os sintomas da doença são caracterizados por pequenos pontos com coloração pardo-avermelhado na parte adaxial (superior) das folhas. Na face abaxial (inferior) das folhas os sintomas iniciais são visualizados com uma ou mais urédias, que ao romper liberam uredosporos, no qual formam pequenas pústulas foliares que são classificadas conforme a coloração da lesão, ou seja, se for do tipo castanho claro, com muitos soros urediniais e muitos esporos, a lesão é denominada do tipo TAN. Se a lesão apresentar coloração castanho avermelhada, com poucos soros urediniais e pouco ou nenhum esporo, a lesão é denominada do tipo *reddish brown* ou RB. Vale ressaltar, que com a lesão do tipo RB, após a infecção do patógeno, as células do hospedeiro próximas ao local de infecção morrem, devido a uma reação de hipersensibilidade (RIBEIRO, 2009).

Em geral, as condições climáticas ideais para a cultura favorecem o estabelecimento e o desenvolvimento da doença. O fungo infecta as plantas em temperaturas que variam de 10 a 27,5°, e quando o período mínimo de orvalho é de 6 horas (NARVAEZ et al., 2007). O molhamento contínuo das folhas, causado pelo orvalho ou pela chuva, também favorece o desenvolvimento da doença, considerando que a chuva é um fator importante na determinação dos níveis epidêmicos no campo (DEL PONTE et al., 2006).

A sobrevivência do fungo ao longo do ano depende da continuidade da produção de uredósporos em um hospedeiro adequado. Juntamente com a soja, mais de 90 outras espécies de leguminosas são hospedeiros de *P. pachyrhizi* (SLAMINKO et al., 2008).

Em todo o mundo, as áreas de produção de soja onde a FAS ocorre podem ser divididas em dois tipos: onde o fungo sobrevive o ano todo se houver um hospedeiro adequado, e onde as epidemias de ferrugem dependem da dispersão de longa distância do inóculo de uma fonte (LI et al., 2010). As condições ambientais em grande parte do Brasil, Paraguai e Bolívia, são propícias à sobrevivência do patógeno durante todo o ano, enquanto a ocorrência de epidemias de ferrugem na Argentina e nos Estados Unidos depende da dispersão de uredósporos produzidos em áreas distantes dessas regiões (LI et al., 2010; PIVONIA; YANG, 2004).

Antes da introdução de *P. pachyrhizi* no Brasil, a semeadura da soja para produção de sementes foi uma prática comum na entressafra sob irrigação (junho a setembro), principalmente na região do Cerrado. Após a introdução da FAS, estas áreas de soja transformaram uma ponte verde para o fungo sobreviver durante a entressafra (EMBRAPA, 2013). Isso foi observado na safra regular, em que a incidência de ferrugem foi registrada

durante a fase vegetativa da soja semeada em áreas próximas. Na safra 2003/2004, a ferrugem foi relatada 25 dias após a germinação nos municípios de Sorriso, Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Sapezal e Primavera do Leste, no estado de Mato Grosso, e no município de Goiânia, no estado de Goiás, Brasil (GODOY et al., 2016).

Com o objetivo de reduzir o inóculo, a partir de 2005, a recomendação técnica foi adotar um período sem soja, de 90 dias sem a soja irrigada e sem a utilização voluntária de soja nos campos. No entanto, devido a liberação de soja *Roundup Ready* (Monsanto Company, Saint Louis, Mo, United States) no mesmo ano, a soja irrigada foi semeada na entressafra para multiplicar as sementes além do recomendado. Na entressafra de 2005, foram semeados 16.000 ha de soja no município de Primavera do Leste, no estado do Mato Grosso (GODOY et al., 2016).

Na safra 2005/2006, a ferrugem foi reportada novamente no estádio vegetativo, em áreas irrigadas do município de Guaíra, no estado de São Paulo, e dos municípios de Primavera do Leste e Alto Garças, no estado de Mato Grosso. Em Primavera do Leste, a ferrugem foi observada 18 dias após a germinação, exigindo até sete aplicações de fungicida para seu controle (GODOY et al., 2016).

Em 2004, a unidade de pesquisa Embrapa Soja, localizada no estado do Paraná, lançou um projeto de sistema de alerta. Este sistema foi projetado para informar a assistência técnica, pública e privada, sobre os problemas detectados durante a estação de crescimento, para orientar possíveis soluções e capturar informações sobre o desempenho da cultura nas diversas regiões produtoras. De 2004/2005 a 2006/2007, o sistema de alerta hospedou o mapa de ocorrências FAS, um sistema em tempo real usado para monitorar a distribuição da doença em todo o Brasil. Desde 2007/2008, o Consórcio Antiferrugem também está hospedado no site (CONSÓRCIOANTIFERRUGEM, 2015).

Programas para monitorar doenças são importantes para culturas com ampla distribuição geográfica ou para doenças que podem causar perdas econômicas rápidas e grandes, tais como a requeima da batata (KRAUSE; MASSIE, 1975), ferrugem nas culturas de cereais (VERREET; KLINK; HOFFMANN, 2000), e ferrugem da soja nos Estados Unidos (SIKORA et al., 2014).

A temporada oficial de cultivo de soja no Brasil começa em 16 de setembro, após o término do primeiro período sem soja. Após a implementação da restrição de soja na entressafra, a FAS tende a iniciar em novembro, com exceção de anos com eventos El Niño,

como observado em 2009/2010. No entanto, as ocorrências iniciais da doença podem variar entre as estações de crescimento. Portanto, os esforços de monitoramento são para relatar com precisão as primeiras ocorrências, para alertar os produtores sobre a necessidade de iniciar o controle com fungicidas (GODOY et al., 2016).

2.3 Resistência genética para o controle da ferrugem asiática

A resistência das plantas pode ser definida como a capacidade do hospedeiro em impedir o crescimento e desenvolvimento do patógeno. A resistência parcial é caracterizada pela redução da taxa epidêmica, pela diminuição do número e tamanho das lesões, pela diminuição da produção de urediniosporos e pelo aumento do período latente. Isso reduz a quantidade de inóculo e a intensidade da doença durante o ciclo da cultura (JULIATTI, 2018).

A resistência natural é uma alternativa comum explorada por melhoristas de plantas para o controle de doenças e envolve a implantação de fontes naturalmente resistentes. Para FAS, pode reduzir o custo do controle químico, melhorar a eficiência e reduzir a pressão de seleção para resistência a fungicidas (GODOY et al., 2016).

A reação de resistência de plantas de soja a *P. pachyrhizi* é frequentemente controlada por genes de resistência específicos que interagem com genes de avirulência do patógeno. Isso leva a uma interação genética específica que culmina na imunidade desencadeada, envolvendo a produção de espécies reativas de oxigênio e hipersensibilidade, resposta no local da infecção (PETER; JOHN, 2010). Essa interação envolve o desenvolvimento de raças patogênicas que diferem em genes de avirulência para um determinado gene de resistência de plantas.

Para explorar a variação natural da resistência, o rastreamento de germoplasma em larga escala tem sido empregado juntamente com marcadores moleculares e/ou clonagem posicional, para identificar genes de resistência que conferem resistência em uma ampla gama de germoplasma de plantas cultivadas e seus parentes silvestres. Até agora, mais de 1.600 acessos de soja foram testados quanto à resistência ou tolerância à FAS, mas poucas fontes adicionais foram identificadas. Nenhuma linhagem de soja foi encontrada com resistência de amplo espectro a todos os isolados de *P. pachyrhizi* (MILES et al., 2008; MILES; FREDERICK; HARTMAN, 2006).

Até o momento, sete genes de locos de resistência dominante foram mapeados (Rpp1 a Rpp7) e são descritos na reação de resistência à infecção por *P. pachyrhizi* com o

aparecimento de lesões marrom-avermelhadas (RB), enquanto plantas suscetíveis reagem com a formação de lesões TAN – marrom clara/bronzeada (CHILDS et al., 2018). Alguns autores relataram que esses genes dominantes isolados não são eficazes quando confrontados com diferentes isolados na população de *P. pachyrhizi* (BONDE et al., 2006; MILES et al., 2011; YAMANAKA et al., 2008).

Embora haja pesquisadores investigando a resistência genética contra *P. pachyrhizi* (WALKER et al., 2011), ainda não estão disponíveis cultivares resistentes a todas as raças desse fungo (CALVO et al., 2008; GOELLNER et al., 2010), sendo o controle através de pulverizações com fungicidas ainda a alternativa mais viável na redução das perdas de produtividade (LEVY, 2005).

A mistura de plantas visando o controle de doenças consiste em utilizar multilinhas (misturas de linhagens com características fenotípicas e agronômicas semelhantes) ou misturas de cultivares (agronomicamente compatíveis e uniformes), e se assemelha, na realidade, à piramidação de genes de resistência, porém, em diferentes genótipos, e não em um único (MUNDT, 2002; MUNDT, 2014; WOLFE, 1985). A utilização de linhagens agronomicamente semelhantes nas multilinhas torna-se uma estratégia promissora devido à maior durabilidade da resistência e melhor estabilidade no rendimento da cultura quando esta é afetada por alguma patologia e existe grande variabilidade patogênica (BOTELHO et al., 2011; MUNDT, 2002; WOLFE, 1993).

Os princípios da teoria de misturas foram originalmente elaborados para resistência a doenças e seriam uma mistura de dois componentes, que consiste em misturar uma cultivar suscetível e uma cultivar totalmente resistente (LEONARD, 1969). Uma mistura de cultivares com diferentes reações de resistência reduz a taxa de doença, pois um grande número de esporos é depositado em cultivares resistentes, diluindo assim, o inóculo que cai nos hospedeiros suscetíveis. Assim, a heterogeneidade espacial de uma mistura de genótipos cria uma barreira física para a propagação da doença. O que se espera com o uso de multilinhas é reduzir a disseminação de patógenos e, assim, aumentar a durabilidade da resistência (MUNDT, 2002).

Para alcançar êxito na utilização de multilinhas é necessário identificar linhagens com diferentes reações de resistência aos patógenos relevantes de determinada cultura e selecionar as que apresentarem boa capacidade de compensação em mistura, ou seja, linhagens com boa complementação (JENSEN, 1952).

Trabalhos recentes têm relatado a eficiência do uso de misturas de cultivares e de multilinhas como estratégia de controle de doenças em várias culturas. Em maçã, Didelot; Brun e Parisi (2007) verificaram redução na incidência e na severidade da sarna, causada pelo fungo *Venturia inaequalis*, quando avaliaram duas misturas diferentes de cultivares e cada cultivar plantadas em monocultivo. Raboin et al. (2012), investigando o uso de misturas com diferentes proporções de cultivares suscetíveis a 100 isolados de *Magnaporthe oryzae*, obtiveram resultados que comprovam eficiência das misturas na redução de brusone do arroz.

Segundo Helland E Holland (2001), através da adoção de multilinhas é possível reduzir a ocorrência de doenças e aumentar assim, a estabilidade de cultivo, pelo fato de diminuir na população de plantas o número de genótipos suscetíveis, o que reduz a dispersão do agente patogênico. Em feijoeiro, Botelho et al. (2011) concluiu que a utilização de misturas constituídas por linhagens de feijoeiro com diferentes padrões de resistência a *Colletotrichum lindemuthianum*, representa uma boa estratégia para reduzir o progresso de antracnose no campo de cultivo e, conseqüentemente, reduzir a perda de produtividade pelo ataque do patógeno. Em soja não se tem relatos do emprego desta estratégia para resistência a doenças.

2.4 Oídio da soja (*Erysiphe difusa*)

O oídio [*Erysiphe difusa* (Cooke & Peck) U. Braun & S. Takamatsu], é uma das doenças que recebe destaque na cultura da soja no Brasil, devido as significativas perdas que pode causar às lavouras de soja (ALMEIDA; FORCELINI; GARCES-FIALLOS, 2017), também sendo umas das mais antigas doenças da cultura.

Observado pela primeira vez na Alemanha, no ano de 1921, posteriormente nos Estados Unidos em 1931, e no Brasil apenas durante a safra 1996/1997 a doença foi reportada, já como uma grande epidemia, favorecida pelo clima seco associado a temperaturas baixas e cultivares susceptíveis nas lavouras (IGARASHI et al., 2020).

O oídio consiste em uma doença, no qual o patógeno é considerado obrigatório, ou seja, o fungo se desenvolve em toda parte aérea da planta, sendo mais predominante na haste, folhas e pecíolos com raras observações do fungo em vagens. Entre os sintomas característicos tem-se a presença de eflorescência branca, pulverulenta, podendo recobrir folhas, com alterações de coloração, que quando passa do branco para o castanho-

acinzentado, sinaliza condição de infecção severa tendo por consequência abscisão foliar (JUHÁSZ et al., 2013).

Esses danos estão relacionados a interferência do fungo na fotossíntese, na retirada de nutrientes das células e na redução da quantidade de luz que chega às folhas, gerando perdas que podem chegar a 40% (BERGAMIN FILHO; AMORIM; REZENDE, 2011), sendo recomendado nestas situações o uso de tratamento químico para mitigação de danos (YORINORI, 1997).

A condição ideal para o desenvolvimento do fungo ocorre em ambientes secos e frios (IGARASHI et al., 2020), com temperatura variando entre 18° a 24°C e umidade relativa baixa (BRASIL et al., 2018). Dentre os fatores que interferem no desenvolvimento da doença destaca-se a fase de desenvolvimento da cultura bem como a época de semeadura.

O patógeno é disseminado principalmente pelo vento, que pode distribuir os conídios a longas distancias. O processo de pré-infecção, germinação e reprodução de *Erysiphie difusa*, inicia cerca de três horas após a inoculação, com oito horas o apêndice de infecção é formado. Posteriormente, o patógeno penetra nas células epidérmicas, forma os haustórios e após 144 horas formam os conídios (SARTORATO; YORINORI, 2001). Vale ressaltar que a água pode atuar como agente de controle, removendo estruturas do fungo da superfície do hospedeiro, prejudicando seu desenvolvimento e dispersão (BERGAMIN FILHO; AMORIM; REZENDE, 2011).

Difícilmente o oídio é controlado por técnicas convencionais devido ao grande número de esporos produzidos pelo fungo e sendo disseminados pelo vento, por sementes, restos culturais e por algumas plantas daninhas. A utilização de cultivares resistentes pode ser adotada e consiste na forma mais eficiente de controle da doença. No entanto, mesmo cultivares resistentes podem se tornar suscetíveis quando semeadas em épocas que favoreçam a doença, tornando necessário a aplicação de fungicidas (SILVA, 2019).

Entre os principais ingredientes ativos registrados para controle da doença, temos os principais grupos de fungicidas sistêmicos, que são, os benzimidazóis, triazóis, estrobilurinas, e mais recentemente as carboxamidas, com possibilidade do uso de misturas prontas de fungicidas tradicionalmente utilizados contra o oídio, possuindo aproximadamente 14 produtos comerciais registrados (ALMEIDA; FORCELINI; GARCES-FIALLOS, 2017).

2.5 Imagens aéreas e fenotipagem de alto rendimento

Nas ciências aplicadas, o termo sensoriamento remoto se refere à obtenção de imagens à distância sobre a superfície terrestre, utilizando sensores embarcados a plataformas como as aeronaves e satélites. O sensoriamento remoto oferece solução sinótica para o monitoramento de plantas, tendo potencial de uso na agropecuária (DÖRNHÖFER; OPPELT, 2016; YU et al., 2016). O sensoriamento remoto aplicado à agricultura é baseado na espectroscopia da radiação refletida após interação da radiação eletromagnética incidente proveniente do sol com diferentes alvos na superfície da terra. Essas medidas são oriundas do espectro refletido, mas especificadamente abrangendo a região do visível (0.4 – 0.7 μm), infravermelho próximo (0.7 – 1.3 μm) e infravermelho de ondas curtas (1.3 – 2.5 μm) (JORGE; INAMASU, 2014). O uso de imagens capturadas por satélites tem grande utilidade na agricultura, todavia possui algumas limitações decorrentes da frequência na obtenção de imagens, da presença de nuvens que inviabilizam seu uso, custos elevados e necessidade de conhecimento específico para o processamento das imagens (SAMSEEMOUNG et al., 2012).

Por outro lado, o uso de RPA, popularmente conhecidos como drones, permite a obtenção de imagens aéreas de grandes áreas com menor custo, maior flexibilidade e alta resolução espacial, o que viabiliza o uso desta ferramenta em larga escala. A estimativa de parâmetros biofísicos e bioquímicos com alta acurácia e baixo custo são importantes para a evolução das práticas de manejo e do potencial produtivo de sistemas de produção dentro dos preceitos da agricultura de precisão (VIBHUTE; BODHE, 2012). O alto rendimento e precisão espacial na estimativa destas características por meio de imagens aéreas obtidas por drones pode ajudar na avaliação do comportamento de genótipos, práticas de manejo e impactos de estresses bióticos e abióticos, contribuindo na tomada de decisão dos produtores (FRANCHINI et al., 2018).

A fenotipagem vegetal é a avaliação abrangente de características vegetais complexas, como crescimento, desenvolvimento, tolerância, resistência, arquitetura, fisiologia, ecologia, rendimento e a medida básica de parâmetros quantitativos individuais que formam a base para características mais complexas (IPPN, 2019). O fenótipo da planta inclui essas características complexas, e exemplos de seus parâmetros de medição direta são a morfologia da raiz (CLARK et al., 2011; WALTER; SILK; SCHURR, 2009) biomassa (GOLZARIAN et al., 2011; MENZEL et al., 2009) características das folhas (ARVIDSSON; PÉREZ-RODRÍGUEZ; MUELLER-ROEBER, 2011; JANSSEN et al., 2009), características

dos frutos (BREWER et al., 2006; MONFORTE et al., 2013), características relacionadas ao rendimento (DUAN et al., 2011), eficiência fotossintética (BAURIEGEL; GIEBEL; HERPPICH, 2011) e resposta ao estresse biótico e abiótico (BALACHANDRAN et al., 1997; RAO; LAXMAN, 2013).

Dado o rápido desenvolvimento da triagem de genótipos de alto rendimento no melhoramento de plantas e na genômica para crescimento relacionado, produtividade e tolerância a diferentes estresses bióticos e abióticos, há uma demanda por mais dados de fenotipagem eficazes e confiáveis para apoiar a melhoria genética das culturas modernas. As avaliações atuais das características fenotípicas para resistência a doenças ou estresse em programas de melhoramento dependem amplamente da pontuação visual de especialistas, que consome tempo e pode gerar viés entre diferentes especialistas e repetições experimentais. A fenotipagem de plantas tornou-se um importante campo de pesquisa em melhoramento de plantas (FRITSCHÉ-NETO; BORÉM, 2016).

A fenotipagem de plantas tem como objetivo medir características complexas relacionadas ao crescimento, produtividade e adaptação ao estresse, com certa exatidão e precisão em diferentes escalas de organização, dos órgãos aos dosséis (FIORANI; SCHURR, 2013). Para atingir esse objetivo, a fenotipagem recorre a conhecimentos das ciências biológicas, ciência da computação, matemática e engenharia. Nos últimos anos, plataformas de fenotipagem de alto rendimento foram implantadas em câmaras de crescimento ou estufas (APPF, 2014; GERMPLASM, 2014). Essas plataformas usam robótica, controle ambiental preciso e tecnologias de imagem (hardware e software) para avaliar o crescimento e o desempenho da planta. No entanto, essas plataformas são projetadas para uma variedade limitada de espécies, abrangendo pequenas plantas de roseta, como *Arabidopsis* (ARVIDSSON; PÉREZ-RODRÍGUEZ; MUELLER-ROEBER, 2011; GRANIER et al., 2006; JANSEN et al., 2009) e as principais culturas de cereais (DEIKMAN; PETRACEK; HEARD, 2012; GOLZARIAN et al., 2011; YANG et al., 2013). Devem ser desenvolvidas plataformas e soluções genéricas que permitam a avaliação fenotípica simultânea de várias espécies (LI; ZHANG; HUANG, 2014).

Para analisar as interações gene-ambiente ($G \times A$) e modelar respostas fenotípicas, o esquema para fenotipagem de plantas geralmente inclui um projeto experimental, medição quantitativa e interpretação dos resultados. O projeto experimental deve considerar diferentes ambientes de crescimento (um ambiente controlado ou um campo). Também inclui

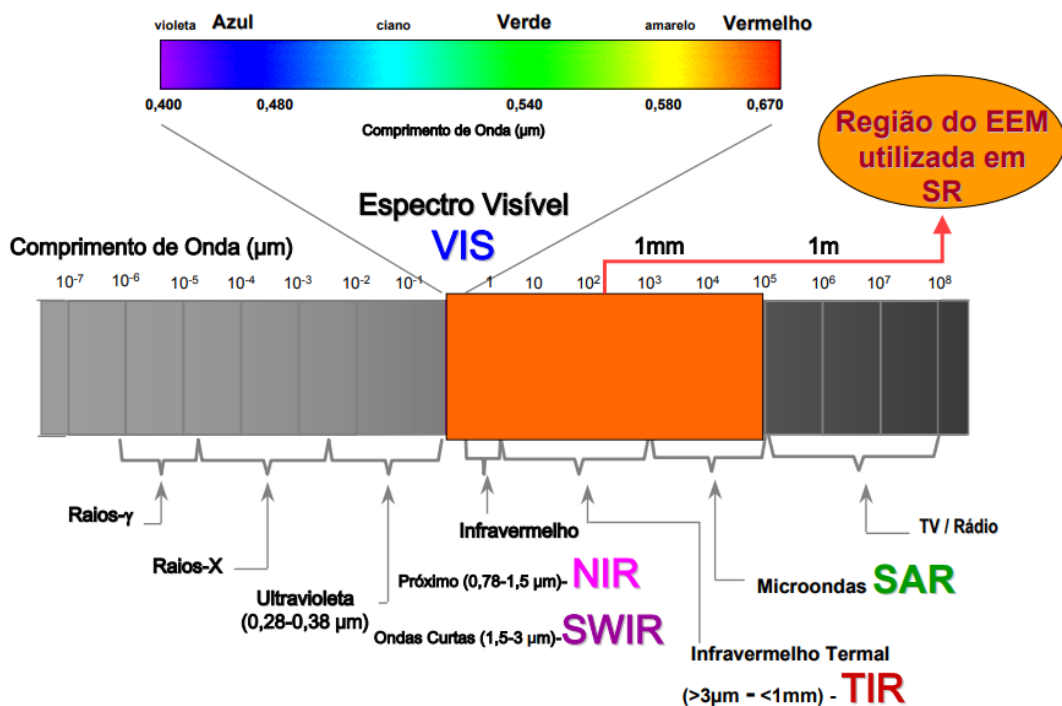
simultaneamente a infraestrutura de crescimento da planta, monitoramento ambiental, manuseio de substratos e instalações de biossegurança. A medição quantitativa se beneficia fortemente de novas tecnologias de imagem, mas precisa de protocolos experimentais padronizados, incluindo calibração de sensor de imagem e uma definição precisa de rotinas de processamento de dados brutos, como parte das melhores práticas para a fenotipagem de plantas. A interpretação dos resultados requer a integração de metadados experimentais nos esquemas de dados para o fenótipo medido, dados genômicos e ambientais (FIORANI; SCHURR, 2013; WHITE et al., 2012).

A quantificação do fenótipo da planta é uma etapa fundamental para a implementação da fenotipagem da planta. As técnicas modernas de geração de imagens têm alta resolução e permitem a visualização de dados multidimensionais e multiparâmetros. Técnicas de imagem são usadas para quantificar características complexas sob crescimento, rendimento e aplicações relacionados ao estresse para fenotipagem de plantas em sistemas ambientais controlados (em câmaras de crescimento ou em estufa) ou no campo (ARVIDSSON; PÉREZ-RODRÍGUEZ; MUELLER-ROEBER, 2011; BERGER; PARENT; TESTER, 2010; WHITE et al., 2012). O uso de técnicas de imagem para monitorar o crescimento das plantas e respostas dinâmicas sob estresse em tempo real também pode ser alcançado com maior facilidade. Os algoritmos de análise de imagem são os principais fatores para o avanço de estudos baseados em imagem que exigem a quantificação de fenótipos de plantas para partes como raízes, caules, folhas, sementes e flores. Mais de 180 softwares diferentes de análise de imagens foram descritos em um site para o estudo da biologia vegetal (QUANTITATIVEPLANT, 2023).

Algumas dessas ferramentas requerem entradas do usuário, como seleção manual de pontos, enquanto outras são automatizadas ou semi-automáticas. Os algoritmos típicos de segmentação são baseados em um modelo de cores e um valor limite e podem avaliar o tempo de crescimento da planta e a geometria da roseta, extraindo a área projetada da brotação e os parâmetros geométricos em uma imagem 2D (LEISTER et al., 1999). A extração de recursos e análise de imagens para a exploração 2D e 3D do crescimento e arquitetura das raízes são úteis para a fenotipagem de plantas (BISKUP et al., 2007). Com base nas imagens do fenótipo, as medições quantitativas para características complexas relacionadas ao crescimento, rendimento e aplicações ao estresse dependem principalmente de algoritmos de processamento de imagem.

Imagem de plantas é mais do que apenas “tirar fotos”. O objetivo da imagem é medir quantitativamente um fenótipo através da interação existente entre a radiação eletromagnética e as plantas. Cada componente das células e tecidos vegetais possui propriedades de absorvância, refletância e transmitância específicas para o comprimento de onda. Por exemplo, a clorofila A e B absorve fótons principalmente na região azul e vermelha do espectro visível (FIGURA 1); a água tem suas principais características de absorção nos comprimentos de onda próximos e curtos e a celulose absorve fótons em uma região ampla entre 2200 e 2500 nm. A geração de imagens em diferentes comprimentos de onda é usada para diferentes aspectos da fenotipagem das plantas. A imagem visível é usada principalmente para medir aspectos da arquitetura da planta, como biomassa projetada com base em imagem, área foliar, cor, dinâmica de crescimento, vigor de plântulas, morfologia das sementes, arquitetura radicular, avaliação da severidade das doenças foliares, produtividade e número e distribuição de frutos (LI; ZHANG; HUANG, 2014).

Figura 1 – Espectro eletromagnético.



Fonte: Crosta (2007).

A imagem por fluorescência foi usada para detecção de doenças na resistência genética a doenças. A imagem infravermelha térmica pode caracterizar a temperatura da planta para detectar diferenças na condutância estomática como medida da resposta da planta

ao estado da água e taxa de transpiração para adaptação ao estresse abiótico. A espectroscopia de imagem pode fornecer informações sobre os direcionadores da dinâmica de crescimento por meios como medir padrões de crescimento espaço-temporal durante experimentos e também para coletar dados de espectroscopia de plantas para quantificar índices de vegetação, conteúdo de água e parâmetros de composição de sementes e composição de pigmentos em estudos de potencial de rendimento (LI; ZHANG; HUANG, 2014).

Atualmente, as técnicas de imagem para fenotipagem de plantas incluem principalmente imagens por fluorescência, imagens por infravermelho térmico, imagens visíveis, espectroscopia de imagem e outras técnicas (RM, PET e CT). Os portadores de informações de detecção são considerados ondas eletromagnéticas. Plantas saudáveis interagem (absorvem, refletem, emitem, transmitem e fluorescem) com radiação eletromagnética de uma maneira diferente das interações vegetais infectadas. Esse achado é explicado principalmente pelo fato de as plantas terem propriedades ópticas diferentes. Técnicas de imagem são muito úteis para detectar essas propriedades, especialmente aquelas que não podem ser vistas a olho nu. A fenotipagem de plantas com base em informações de reflexão espectral depende das propriedades da luz emergente do dossel após várias interações (como reflexões, transmissões e absorções) com os tecidos da planta (LI; ZHANG; HUANG, 2014).

A assinatura espectral do dossel dessa radiação difusa refletida é descrita pela razão entre a intensidade da luz refletida e a da luz iluminada para cada comprimento de onda visível (400 a 750 nm), infravermelho próximo (750 a 1200 nm) e infravermelho de ondas curtas Regiões espectrais (1200–2400 nm). A refletância da folha é definida como a proporção da luz irradiada que é refletida pela folha. A interação foliar da radiação eletromagnética com as plantas varia com o comprimento de onda da radiação. Devido à forte absorção por pigmentos fotoativos (clorofilas, antocianinas e carotenóides) em comprimentos de onda visíveis, o dossel tem baixa refletância (LI; ZHANG; HUANG, 2014).

Na banda do infravermelho próximo, o dossel tem alta refletância por causa da dispersão múltipla nas interfaces célula-ar no tecido foliar interno. Na faixa de ondas largas do infravermelho médio, as folhas saudáveis têm menor refletância devido à absorção pela água, proteínas e outros constituintes do carbono. Devido ao seu alto conteúdo de água (emissividade entre 0,97 e 0,99), as folhas saudáveis emitem radiação na faixa de infravermelho térmico ($\pm 10 \mu\text{m}$) de acordo com a temperatura. As folhas parecem verdes

porque a faixa de luz verde (550 nm) é refletida de forma relativamente eficiente quando comparada às faixas azul, amarela e vermelha, que são absorvidas por pigmentos fotoativos. Em aproximadamente 670 nm, as alterações de refletância fazem com que a borda vermelha mude para comprimentos de onda mais curtos (a transição acentuada da baixa refletância visível para a alta refletância NIR) (LI; ZHANG; HUANG, 2014).

A RPA surgiu como uma importante ferramenta para a agricultura de precisão (KING, 2017). No entanto, há poucas informações na literatura sobre o uso prático de imagens sinóticas e de índices de vegetação, obtidos com câmeras que captam a região do visível, como ferramenta para ajustes de manejo, objetivando aumento de produtividade e/ ou redução dos custos de produção (RAOUFAT et al., 2020). Por outro lado, sensores multiespectrais são capazes de medir a radiação eletromagnética refletida pela vegetação e tem sido uma ferramenta com alto potencial na identificação de injurias ocasionadas por patógenos, pragas, deficiência nutricional e herbicidas (GALVANI FILHO, 2020). Ou seja, o vasto conhecimento produzido nessa área de conhecimento não tem sido traduzido em uso prático no agronegócio.

A determinação da severidade de uma doença pela análise visual é demorada e sujeita a erros, visto que tal método de quantificação é subjetivo. Na análise visual, em função da limitação do olho humano em identificar ligeiras diferenças, pode incorrer de erros de anotação e transcrição das informações (CANTERI et al., 1999), além da subjetividade humana na interpretação da severidade das doenças (VALE et al., 2004). Essas informações podem ser obtidas com maior precisão por meio de softwares que quantifiquem a área foliar afetada a partir de análises de imagens aéreas.

Imagens aéreas obtidas por RPA é uma ferramenta de fácil aplicação, sendo possível coletar diversas imagens em tempo relativamente reduzido, para posterior processamento com o auxílio de softwares específicos de leitura de imagens (ZABOT et al., 2008). Além disso, as análises por imagens RGB apresentam menor custo, maior eficiência e elimina a subjetividade da análise visual (GONG et al., 2013). No entanto, os sensores RGB ainda não foram totalmente exploradas para fenótipo de resistência a doenças (KEFAUVER et al., 2015). Dessa forma, objetivou-se com o estudo apresentar e discutir possíveis utilizações de imagens aéreas, obtidas com RPA equipado com câmera simples, em sistemas de produção que envolvem a cultura da soja (LI; ZHANG; HUANG, 2014).

REFERÊNCIAS

- ACQUAAH, G.; AL-KHAYRI, J. M.; JAIN, S. M.; JOHNSON, D. V. Conventional Plant Breeding Principles and Techniques. **Advances in Plant Breeding Strategies: Breeding, Biotechnology and Molecular Tools**, p. 115-158, 2016.
- ALMEIDA, R. d.; FORCELINI, C. A.; GARCES-FIALLOS, F. R. Chemical control of foliar diseases in soybean depends on cultivar and sowing date. **Bioscience Journal**, 33, n. 5, p. 1188-1196, 2017.
- AMARAL, L. d. O.; BRUZI, A. T.; RESENDE, P. M. d.; SILVA, K. B. Pure line selection in a heterogeneous soybean cultivar. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, 19, p. 277-284, 2019.
- APPF. **Australian plant phenomics facility**. 2014. Disponível em: <https://www.plantphenomics.org.au/>. Acesso em: 10 October 2014.
- ARAUS, J. L.; KEFAUVER, S. C.; ZAMAN-ALLAH, M.; OLSEN, M. S. et al. Translating high-throughput phenotyping into genetic gain. **Trends in plant science**, 23, n. 5, p. 451-466, 2018.
- ARVIDSSON, S.; PÉREZ-RODRÍGUEZ, P.; MUELLER-ROEBER, B. A growth phenotyping pipeline for *Arabidopsis thaliana* integrating image analysis and rosette area modeling for robust quantification of genotype effects. **New Phytologist**, 191, n. 3, p. 895-907, 2011.
- BALACHANDRAN, S.; HURRY, V. M.; KELLEY, S. E.; OSMOND, C. B. et al. Concepts of plant biotic stress. Some insights into the stress physiology of virus-infected plants, from the perspective of photosynthesis. **Physiologia Plantarum**, 100, n. 2, p. 203-213, 1997.
- BARBOSA, M. Uma abordagem para análise de dados com medidas repetidas utilizando modelos lineares mistos. 2009.
- BARROS, H. B.; SEDIYAMA, T.; SILVA REIS, M.; CECON, P. R. Efeito do número de aplicações de fungicidas no controle da ferrugem asiática da soja. **Acta Scientiarum Agronomy**, 30, n. 2, 2008.
- BAURIEGEL, E.; GIEBEL, A.; HERPPICH, W. B. Hyperspectral and chlorophyll fluorescence imaging to analyse the impact of *Fusarium culmorum* on the photosynthetic integrity of infected wheat ears. **Sensors**, 11, n. 4, p. 3765-3779, 2011.
- BENDIG, J.; YU, K.; AASEN, H.; BOLTEN, A.; BENNERTZ, S.; BROSCHEIT, J.; GNYP, M. L.; BARETH, G. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation**, v. 39, p. 79-87, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.012>.
- BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M. Importância das doenças de plantas. **Manual de fitopatologia: princípios e conceitos**, 2011.
- BERGER, B.; PARENT, B.; TESTER, M. High-throughput shoot imaging to study drought responses. **Journal of experimental botany**, 61, n. 13, p. 3519-3528, 2010.

BISKUP, B.; SCHARR, H.; SCHURR, U.; RASCHER, U. W. E. A stereo imaging system for measuring structural parameters of plant canopies. **Plant, cell & environment**, 30, n. 10, p. 1299-1308, 2007.

BONDE, M. R.; NESTER, S. E.; AUSTIN, C. N.; STONE, C. L. et al. Evaluation of virulence of *Phakopsora pachyrhizi* and *P. meibomia* isolates. **Plant Disease**, 90, n. 6, p. 708-716, 2006.

BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. 2005.

BOTELHO, F. B. S.; RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. D. F. B.; ROSA, H. J. A. Multiline as a Strategy to Reduce Damage Caused by *Colletotrichum lindemuthianum* in Common Bean. (Report). **Journal of Phytopathology**, 159, n. 3, p. 175, 2011.

BRASIL, S. d. O. S.; MARQUES, L. D. L.; DA SILVA, R. F. B.; FREITAS, D. C. L. et al. Importância da resistência de plantas no controle de oídio: um levantamento de cultivares de soja no Brasil. **Revista Científica Rural**, 20, n. 2, p. 188-202, 2018.

BREWER, M. T.; LANG, L.; FUJIMURA, K.; DUJMOVIC, N. et al. Development of a controlled vocabulary and software application to analyze fruit shape variation in tomato and other plant species. **Plant physiology**, 141, n. 1, p. 15-25, 2006.

BROMFIELD, K. R. Soybean rust, monograph. No. 11. **American Phytopathological Society**, St. Paul, MN, 1984.

BRUZI, A. T.; RAMALHO, M. A. P.; ABREU, Â. d. F. B. Performance of common bean families from cross between of andean and mesoamerica lines on grain yield and resistance to *Phaeoisariopsis griseola*. **Ciência e Agrotecnologia**, 31, n. 3, p. 650-655, 2007.

CALVO, E. S.; KIIHL, R. A. S.; GARCIA, A.; HARADA, A. et al. Two major recessive soybean genes conferring soybean rust resistance. (RESEARCH)(Author abstract)(Report). **Crop Science**, 48, n. 4, p. 1350, 2008.

CÂMARA, G. M. S. Introdução ao agronegócio da soja. PIRACICABA: ESALQ, LVP, p.1-18. 2011.

CANDIAGO, S.; REMONDINO, F.; DE GIGLIO, M.; DUBBINI, M. et al. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. **Remote sensing**, 7, n. 4, p. 4026-4047, 2015.

CANTERI, M.G., VITTI, A.J., AMORIM, L., BERGAMIN FILHO, A. Refletância e avaliação visual como indicadores de severidade de doenças foliares comparados à produtividade do amendoim. **Summa Phytopathologica**, v.25, n.3. p.228-233, 1999.

CARNEIRO, A. K.; BRUZI, A. T.; PEREIRA, J. L. d. A. R.; ZAMBIAZZI, E. V. Stability analysis of pure lines and a multiline of soybean in different locations. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, 19, n. 4, p. 395-401, 2019.

CARVALHO, J. P. S.; BRUZI, A. T.; MOREIRA, F. M. d. S.; SILVA, K. B. et al. Combining abilities of soybean progenies and bradyrhizobium strains for biological nitrogen fixation. **Crop Science**, 63, n. 1, p. 29-42, 2023.

CASTRO, D. G.; DE MOURA, A. M.; ALVES, N. B.; TOMÉ, L. M. et al. Multiline aiming at phenotypic stability and rice blast resistance. **Bioscience Journal**, 38, n. e38100, p. 1981-3163, 2022.

CHILDS, S. P.; KING, Z. R.; WALKER, D. R.; HARRIS, D. K. et al. Discovery of a seventh Rpp soybean rust resistance locus in soybean accession PI 605823. **Theoretical and Applied Genetics**, 131, n. 1, p. 27-41, 2018/01/01 2018.

CLARK, R. T.; MACCURDY, R. B.; JUNG, J. K.; SHAFF, J. E. et al. Three-dimensional root phenotyping with a novel imaging and software platform. **Plant physiology**, 156, n. 2, p. 455-465, 2011.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos. Brasília**, p. Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2023. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 25 jun. 2023.

CONSÓRCIOANTIFERRUGEM. **Ferrugem da soja**. p. Consórcio Antiferrugem, 2015. Disponível em: www.consorcioantiferrugem.net. Acesso em: 07 mai. 2019.

CORDEIRO, J. P. C.; CÂMARA, G.; MOURA, U. F.; BARBOSA, C. C. et al., 2005, **Algebraic Formalism over Maps**. 49-65.

COVARRUBIAS-PAZARAN, G. Genome-assisted prediction of quantitative traits using the R package sommer. **PloS one**, 11, n. 6, p. e0156744, 2016.

CROSTA, A. P. Detalhando a composição química/molecular dos materiais superficiais. 2007. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte@80/2007/08.22.22.16/doc/07_09h00-AlvaroCrosta.pdf>.

DEIKMAN, J.; PETRACEK, M.; HEARD, J. E. Drought tolerance through biotechnology: improving translation from the laboratory to farmers' fields. **Current opinion in biotechnology**, 23, n. 2, p. 243-250, 2012.

DEL PONTE, E. M.; GODOY, C. V.; LI, X.; YANG, X. B. Predicting severity of asian soybean rust epidemics with empirical rainfall models. **Phytopathology**, 96, n. 7, p. 797, 2006.

DESLANDES, J. A. Ferrugem da soja e de outras leguminosas causada por *Phakopsora pachyrhizi* no Est. Minas Gerais. **Fitopatologia Brasileira**, 1979.

DIDELLOT, F.; BRUN, L.; PARISI, L. Effects of cultivar mixtures on scab control in apple orchards. **Plant Pathology**, 56, n. 6, p. 1014-1022, 2007.

DÖRNHÖFER, K.; OPPELT, N. Remote sensing for lake research and monitoring—Recent advances. **Ecological Indicators**, 64, p. 105-122, 2016.

DUAN, L.; YANG, W.; HUANG, C.; LIU, Q. A novel machine-vision-based facility for the automatic evaluation of yield-related traits in rice. **Plant Methods**, 7, n. 1, p. 44, 2011.

EMBRAPA. **Sistemas de Produção, 6: Tecnologia de produção de soja – região central do Brasil 2005**. Londrina - PR, p. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2004. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/54294/1/Sistemas-de-Producao-6.pdf>. Acesso em: 08 mai. 2019.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja -Região Central do Brasil 2014**. Londrina, p. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA, 2013. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/95489/1/SP-16-online.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2019.

EMBRAPA. **O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro 2014**. Londrina, p. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA, 2014. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/104753/1/O-agronegocio-da-soja-nos-contextos-mundial-e-brasileiro.pdf>. Acesso em: 08 mai. 2019.

EMBRAPA. **Boas práticas para o enfrentamento da ferrugem-asiática da soja**. Londrina, p. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1074899/boas-praticas-para-o-enfrentamento-da-ferrugem-asiatica-da-soja>. Acesso em: 08 mai. 2019.

EMBRAPA. **Uso de imagens aéreas obtidas com drones em sistemas de produção de soja**. 2018.

FINOTO, E. L.; CARREGA, W. C.; SEDIYAMA, T.; DE ALBUQUERQUE, J. A. A. et al. Efeito da aplicação de fungicida sobre caracteres agronômicos e severidade das doenças de final de ciclo na cultura da soja. **Revista Agro@ mbiente On-line**, 5, n. 1, p. 44-49, 2011.

FIORANI, F.; SCHURR, U. Future scenarios for plant phenotyping. **Annual review of plant biology**, 64, p. 267-291, 2013.

FUENTES-PEAILILLO, F.; ORTEGA-FARIAS, S.; RIVERA, M.; BARDEEN, M.; MORENO, M. Comparison of vegetation indices acquired from RGB and Multispectral sensors placed on UAV. **Ieee International Conference On Automation/Xxiii Congress Of The Chilean Association Of Automatic Control (Ica-Acca)**, out. 2018. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ica-acc.2018.8609861>.

FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. **Fenômica: como a fenotipagem de próxima geração está revolucionando o melhoramento de plantas**. Editora UFV, 2016. 8572695583.

GALVANI FILHO, M. E. **Detecção e quantificação de ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) na cultura da soja por imagens multiespectrais**. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Proteção de Plantas, Instituto Federal Goiano, Urutai, 2020.

GERALDO, G.; ADAMI, P. F. Analysis of combined strategies for the management of Asian soybean rust. **African Journal of Plant Science**, 14, n. 8, p. 297-307, 2020.

GERMPLASM, W. G. **Project Narrative-ksu Wheat Genetics**. 2014. Disponível em: http://www.wheatgenetics.org/downloads/Projects/HTP_ProjectNarrative_20130219.pdf. Acesso em: 10 October 2014

GESTEIRA, G. d. S.; BRUZI, A. T.; ZITO, R. K.; FRONZA, V. et al. Selection of early soybean inbred lines using multiple indices.: Dryad Digital Repository 2018.

GODOY, C. V.; KOGA, L. J.; CANTERI, M. G. Diagrammatic scale for assessment of soybean rust severity. **Fitopatologia Brasileira**, 31, n. 1, p. 63-68, 2006.

- GODOY, C. V.; SEIXAS, C. D. S.; SOARES, R. M.; MARCELINO-GUIMARÃES, F. C. et al. Asian soybean rust in Brazil: Past, present, and future. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, 51, n. 5, p. 407-421, 2016.
- GOELLNER, K.; LOEHRER, M.; LANGENBACH, C.; CONRATH, U. et al. Phakopsora pachyrhizi, the causal agent of Asian soybean rust. **Molecular Plant Pathology**, 11, n. 2, p. 169-177, 2010.
- GOLZARIAN, M. R.; FRICK, R. A.; RAJENDRAN, K.; BERGER, B. et al. Accurate inference of shoot biomass from high-throughput images of cereal plants. **Plant methods**, 7, n. 1, p. 2, 2011.
- GONÇALVES, L. M.; BARBOSA, B. D. S.; MACIEL, D. T.; SANTOS, H. F. D. Variabilidade Espacial E Temporal Do Índice Vegetação Mpri Aplicado Às Imagens De Grama São Carlos Obtidas Por Aeronave Remotamente Pilotada/Space And Temporary Variability Of The Index Vegetation Applied To Images Obtained By A Remotely Piloted Aircraf. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, 11, n. 4, p. 340-349, 2017.
- GONG, A.; WU, X.; QIU, Z.; HE, Y. A handhelp device for leaf area measurement. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 98, p. 74-80, 2013.
- GRANIER, C.; AGUIRREZABAL, L.; CHENU, K.; COOKSON, S. J. et al. PHENOPSIS, an automated platform for reproducible phenotyping of plant responses to soil water deficit in Arabidopsis thaliana permitted the identification of an accession with low sensitivity to soil water deficit. **New Phytologist**, 169, n. 3, p. 623-635, 2006.
- GRAU, C. R.; HARTMAN, G. L.; SINCLAIR, J. B.; RUPE, J. C. Compendium of soybean diseases.: APS Press St. Paul, MN 1999.
- HARTLEY, H. O. The maximum F-ratio as a short-cut test for heterogeneity of variance. **Biometrika**, 37, n. 3/4, p. 308-312, 1950.
- HELLAND, S. J.; HOLLAND, J. B. Blend response and stability and cultivar blending ability in oat. (Statistical Data Included). **Crop Science**, 41, n. 6, p. 1689, 2001.
- HENDERSON, C. R. Best linear unbiased estimation and prediction under a selection model. **Biometrics**, p. 423-447, 1975.
- HENRIQUES, H. J. R.; SCHWAMBACH, D. A.; FERNANDES, V. J. M.; CORTEZ, J. W. Vegetation indices and their correlation with second-crop corn grain yield in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 20, p. 13, 2021. DOI: 10.18512/rbms2021v20e1195.
- HIRANO, M.; HIKISHIMA, M.; SILVA, A. J. d.; XAVIER, S. A. et al. Validação de escala diagramática para estimativa de desfolha provocada pela ferrugemasiática em soja. **Summa Phytopathologica**, 36, p. 248-250, 2010.
- HOYOS-VILLEGAS, V.; FRITSCHI, F. B. Relationships among vegetation indices derived from aerial photographs and soybean growth and yield. **Crop Science**, 53, n. 6, p. 2631-2642, 2013.
- HYMOWITZ, T. On the domestication of the soybean. **Economic botany**, 24, n. 4, p. 408-421, 1970.

IGARASHI, S.; OLIVEIRA, G. M.; CAMARGO, L. C. M.; FALKOSKI FILHO, J. et al. Danos causados pela infecção de oídio em diferentes estádios fenológicos da soja. **Arquivos do Instituto Biológico**, 77, p. 245-250, 2020.

IPPN. **International Plant Phenotyping Network. Plant Phenotyping**. 2019. Disponível em: www.plantphenomics.com Acesso em: 19 December 2019.

JANSEN, M.; GILMER, F.; BISKUP, B.; NAGEL, K. A. et al. Simultaneous phenotyping of leaf growth and chlorophyll fluorescence via GROWSCREEN FLUORO allows detection of stress tolerance in *Arabidopsis thaliana* and other rosette plants. **Functional Plant Biology**, 36, n. 11, p. 902-914, 2009.

JENSEN, N. F. Intra-varietal Diversification in Oat Breeding 1. **Agronomy Journal**, 44, n. 1, p. 30-34, 1952.

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

JUHÁSZ, A. C. P.; DE PÁDUA, G. P.; WRUCK, D. S. M.; FAVORETO, L. et al. Desafios fitossanitários para a produção de soja. 2013.

JULIATTI, B. C. M. **Biochemical, Physiological And Epidemiological Characterization Of Soybean Genotypes (Glycine Max) With Partial Resistance Against Soybean Rust (Phakopsora Pachyrhizi Sydow & P.Sydow)**. 2018. 134 f. - Fitopatologia, UFLA, Lavras.

JULIATTI, F. C.; BORGES, E. N.; PASSOS, R. R.; CALDEIRA JÚNIOR, J. C. et al. Doenças da soja. **Cultivar Caderno Técnico**, Pelotas RS, 47, p. 3-14, 2003.

KEFAUVER, S. C.; EL-HADDAD, G.; VERGARA-DIAZ, O.; ARAUS, J. L. RGB picture vegetation indexes for High-Throughput Phenotyping Platforms (HTPPs). **Spie Proceedings**, 14 out. 2015. SPIE. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2195235>.

KILLGORE, E.; HEU, R.; GARDNER, D. E. First report of soybean rust in Hawaii. **Plant Disease**, 78, p. 1216, 1994.

KING, A. The future of agriculture. **Nature**, 544, n. 7651, p. S21-S23, 2017.

KRAUSE, R. A.; MASSIE, L. B. Predictive Systems: Modern Approaches to Disease Control. **Annual Review of Phytopathology**, 13, n. 1, p. 31-47, 1975

LEISTER, D.; VAROTTO, C.; PESARESI, P.; NIWERGALL, A. et al. Large-scale evaluation of plant growth in *Arabidopsis thaliana* by non-invasive image analysis. **Plant Physiology and Biochemistry**, 37, n. 9, p. 671-678, 1999.

LEMOES, R. d. C.; PÁDUA, J. M. V.; BRUZI, A. T.; OLIVEIRA, V. B. d. et al. Comparison between doubled haploid lines and lines obtained via the bulk method in tobacco. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, 22, 2023.

LEONARD, K. J. Factors affecting rates of stem rust increase in mixed plantings of susceptible and resistant oat varieties. **Phytopathology**, 1969.

LEVY, C. Epidemiology and chemical control of soybean rust in southern Africa. **Plant Disease**, 89, p. 669-674, 2005.

LI, L.; ZHANG, Q.; HUANG, D. A review of imaging techniques for plant phenotyping. **Sensors**, 14, n. 11, p. 20078-20111, 2014.

LI, X.; ESKER, P. D.; PAN, Z.; DIAS, A. P. et al. The Uniqueness of the Soybean Rust Pathosystem: An improved understanding of the risk in different regions of the world. **Plant Disease**, 94, n. 7, p. 796-806, 2010.

MAIMAITIJIANG, M.; GHULAM, A.; SIDIKE, P.; HARTLING, S. et al. Unmanned Aerial System (UAS)-based phenotyping of soybean using multi-sensor data fusion and extreme learning machine. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 134, p. 43-58, 2017.

MATTIAZZI, P. Escala diagramática para avaliação da severidade do oídio em soja. **Reunião De Pesquisa De Soja Da Região Central Do Brasil**, XXV, p. 168, 2003.

MENZEL, M. I.; TITTMANN, S.; BUEHLER, J.; PREIS, S. et al. Non-invasive determination of plant biomass with microwave resonators. **Plant, cell & environment**, 32, n. 4, p. 368-379, 2009.

MILES, M.; MOREL, W.; RAY, J.; SMITH, J. et al. Adult Plant Evaluation of Soybean Accessions for Resistance to *Phakopsora pachyrhizi* in the Field and Greenhouse in Paraguay. **Plant Disease**, 92, n. 1, p. 96-105, 2008.

MILES, M. R.; BONDE, M. R.; NESTER, S. E.; BERNER, D. K. et al. Characterizing resistance to *Phakopsora pachyrhizi* in soybean. **Plant Disease**, 95, n. 5, p. 577-581, 2011.

MILES, M. R.; FREDERICK, R. D.; HARTMAN, G. L. Evaluation of Soybean Germplasm for Resistance to *Phakopsora pachyrhizi*. Evaluation of Soybean Germplasm for Resistance to *Phakopsora pachyrhizi*.: Plant Management Network 2006.

MONFORTE, A. J.; DIAZ, A.; CAÑO-DELGADO, A.; VAN DER KNAAP, E. The genetic basis of fruit morphology in horticultural crops: lessons from tomato and melon. **Journal of experimental botany**, 65, n. 16, p. 4625-4637, 2013.

MOREIRA, F. F.; ROJAS DE OLIVEIRA, H.; LOPEZ, M. A.; ABUGHALI, B. J. et al. High-throughput phenotyping and random regression models reveal temporal genetic control of soybean biomass production. **Frontiers in Plant Science**, 12, p. 715983, 2021.

MUNDT, C. C. USE OF MULTILINE CULTIVARS AND CULTIVAR MIXTURES FOR DISEASE MANAGEMENT. **Annual Review of Phytopathology**, 40, n. 1, p. 381-410, 2002.

MUNDT, C. C. Durable resistance: a key to sustainable management of pathogens and pests. **Infection, Genetics and Evolution**, 27, p. 446-455, 2014

NARVAEZ, D.; O'BRIEN, G.; MAROIS, J.; WRIGHT, D. The effects of duration and temperature of leaf wetness periods on Asian soybean rust under field conditions. **Phytopathology**, 97, n. 7, p. S83-S83, 2007.

NEGRISOLI, M. M.; SILVA, F. N. d.; NEGRISOLI, R. M.; LOPES, L. d. S. et al. Impact of Fungicide Application Timing Based on Soybean Rust Prediction Model on Application Technology and Disease Control. **Agronomy**, 12, n. 9, p. 2119, 2022.

ONO, Y.; BURITICÁ, P.; HENNEN, J. F. Delimitation of *Phakopsora*, *Physopella* and *Cerotelium* and their species on Leguminosae. **Mycological research**, 96, n. 10, p. 825-850, 1992.

PETER, N. D.; JOHN, P. R. Plant immunity: towards an integrated view of plant–pathogen interactions. **Nature Reviews Genetics**, 11, n. 8, p. 539, 2010.

PIVONIA, S.; YANG, X. Assessment of the potential year-round establishment of soybean rust throughout the world. **Plant Disease**, 88, n. 5, p. 523-529, 2004.

QUANTITATIVEPLANT. **Plant Image Analysis**. 2023. Disponível em: <<https://www.quantitative-plant.org/>>.

QUEIROZ, D. M. de; VALENTE, D. S. M.; PINTO, F. de A. de C.; BORÉM, A. **Agricultura Digital**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2022. 224 p.

RABOIN, L.-M.; RAMANANTSOANIRINA, A.; DUSSERE, J.; RAZASOLOFONANAHARY, F. et al. Two-component cultivar mixtures reduce rice blast epidemics in an upland agrosystem. **Plant Pathology**, 61, n. 6, p. 1103-1111, 2012.

RAMALHO, M. A. P.; ABREU, Â. d. F. B.; SANTOS, J. B. d.; NUNES, J. A. R. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. UFLA, Lavras: 2012. 522 p.

RAO, N. K. S.; LAXMAN, R. H. Phenotyping horticultural crops for abiotic stress tolerance. In: **Climate-Resilient Horticulture: Adaptation and Mitigation Strategies**: Springer, 2013. p. 147-157.

RAOUFAT, M. H.; DEHGHANI, M.; ABDOLABBAS, J.; KAZEMEINI, S. A. et al. Feasibility of satellite and drone images for monitoring soil residue cover. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, 19, n. 1, p. 56-64, 2020.

RESENDE, M. D. V. d.; SILVA, F. F. e.; AZEVEDO, C. F. Estatística matemática, biométrica e computacional: Modelos mistos, multivariados, categóricos e generalizados (REML/BLUP), inferência bayesiana, regressão aleatória, seleção genômica, QTL-GWAS, estatística espacial e temporal, competição, sobrevivência. **Viçosa: UFV**, 2014.

RIBEIRO, A. S. **Estratégias para a obtenção de linhagens com resistência durável à ferrugem asiática da soja**. Lavras, MG (Brazil), 2009.

SAKAMOTO, T.; GITELSON, A. A.; NGUY-ROBERTSON, A. L.; ARKEBAUER, T. J. et al. An alternative method using digital cameras for continuous monitoring of crop status. **Agricultural and Forest Meteorology**, 154, p. 113-126, 2012.

SAMSEEMOUNG, G.; SONI, P.; JAYASURIYA, H. P. W.; SALOKHE, V. M. Application of low altitude remote sensing (LARS) platform for monitoring crop growth and weed infestation in a soybean plantation. **Precision Agriculture**, 13, n. 6, p. 611-627, 2012.

SARTORATO, A.; YORINORI, J. T. Oídios de leguminosas: feijoeiro e soja.: Embrapa Meio Ambiente Jaguariúna: 255-284 p. 2001.

SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. **Soja do Plantio à Colheita**. Viçosa, MG: 2015. 333 p.

- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.
- SHARMA, N. D.; MEHTA, S. K. Soybean rust in Madhya Pradesh. **Acta Botanica Indica**, 24, p. 115-116, 1996
- SIKORA, E. J.; ALLEN, T. W.; WISE, K. A.; BERGSTROM, G. et al. coordinated effort to manage soybean rust in North America: A success story in soybean disease monitoring. **Plant disease**, 98, n. 7, p. 864-875, 2014.
- SILVA, A. J. D.; CANTERI, M. G.; SILVA, A. L. D. Haste verde e retenção foliar na cultura da soja. **Summa Phytopathologica**, 39, n. 3, p. 151-156, 2013.
- SILVA, K. B.; BRUZI, A. T.; ZAMBIAZZI, E. V.; SOARES, I. O. et al. Adaptability and stability of soybean cultivars for grain yield and seed quality. **Genetics and Molecular Research**, 16, n. 2, p. 1-15, 2017.
- SILVA, M. S. L. PRINCIPAIS DOENÇAS DA CULTURA DA SOJA (*Glycine max* (L.) Merrill). 2019.
- SINGH, A.; GANAPATHYSUBRAMANIAN, B.; SINGH, A. K.; SARKAR, S. Machine learning for high-throughput stress phenotyping in plants. **Trends in plant science**, 21, n. 2, p. 110-124, 2016
- SLAMINKO, T.; MILES, M.; FREDERICK, R.; BONDE, M. et al. New Legume Hosts of *Phakopsora pachyrhizi* Based on Greenhouse Evaluations. **Plant Disease**, 92, n. 5, p. 161-111, 2008.
- SOARES, I. O.; REZENDE, P. M. d.; BRUZI, A. T.; ZAMBIAZZI, E. V. et al. Adaptability of soybean cultivars in different crop years. **Genetics and Molecular Research**, 14, p. 8995-9003, 2015.
- TEAM, R. D. C. R: A language and environment for statistical computing. (No Title), 2010.
- UNESA. **United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division** p. UNESA, 2019. Disponível em: <http://www.unpopulation.org> Acesso em: 12 December 2019.
- VALE, F. X. R.; JESUS JR., W. C.; ZAMBOLIM, L. **Epidemiologia aplicada ao manejo de doenças de plantas**. Belo Horizonte: Editora Perfil, 2004. 531p
- VERREET, J.; KLINK, H.; HOFFMANN, G. Regional Monitoring for Disease Prediction and Optimization of Plant Protection Measures: The IPM Wheat Model. **Plant Disease**, 84, n. 8, p. 816-826, 2000
- VIBHUTE, A.; BODHE, S. K. Applications of image processing in agriculture: a survey. **International Journal of Computer Applications**, 52, n. 2, 2012.
- VILELA, N. J. D. **Estabilidade E Manejo Integrado Visando Ao Controle De Ferrugem Asiática Por Meio Do Emprego De Multilinhas**. 2019. -, UFLA, LAVRAS-MG.
- VON BUEREN, S. K.; BURKART, A.; HUENI, A.; RASCHER, U. et al. Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations. **Biogeosciences**, 12, n. 1, p. 163-175, 2015.

- WALKER, D. R.; BOERMA, H. R.; PHILLIPS, D. V.; SCHNEIDER, R. W. et al. Evaluation of USDA soybean germplasm accessions for resistance to soybean rust in the Southern United States (RESEARCH)(Author abstract)(Report). **Crop Science**, 51, n. 2, p. 678, 2011.
- WALTER, A.; SILK, W. K.; SCHURR, U. Environmental effects on spatial and temporal patterns of leaf and root growth. **Annual review of plant biology**, 60, p. 279-304, 2009.
- WARD, B. P.; GUEDIRA, G. B.; TYAGI, P.; KOLB, F. L. et al. Multienvironment and multitrait genomic selection models in unbalanced early-generation wheat yield trials. **Crop Science**, 59, n. 2, p. 491-507, 2019.
- WHITE, J. W.; ANDRADE-SANCHEZ, P.; GORE, M. A.; BRONSON, K. F. et al. Field-based phenomics for plant genetics research. **Field Crops Research**, 133, p. 101-112, 2012.
- WICKHAM, H.; AVERICK, M.; BRYAN, J.; CHANG, W. et al. Welcome to the Tidyverse. **Journal of open source software**, 4, n. 43, p. 1686, 2019.
- WOLFE, M. The current status and prospects of multiline cultivars and variety mixtures for disease resistance. **Annual review of phytopathology**, 23, n. 1, p. 251-273, 1985.
- WOLFE, M. S. Can the strategic use of disease resistant hosts protect their inherent durability? In: **Durability of disease resistance**: Springer, 1993. p. 83-96
- YAMANAKA, N.; DA SILVA, D. C. G.; PASSIANOTTO, A. L. d. L.; NOGUEIRA, L. M. et al. Identification of DNA markers and characterization of the genes for resistance against asian soybean rust. **Embrapa Soja-Capítulo em livro técnico-científico (ALICE)**, 2008.
- YANG, W.; DUAN, L.; CHEN, G.; XIONG, L. et al. Plant phenomics and high-throughput phenotyping: accelerating rice functional genomics using multidisciplinary technologies. **Current opinion in plant biology**, 16, n. 2, p. 180-187, 2013.
- YANG, Z.; WILLIS, P.; MUELLER, R., 2008, **Impact of band-ratio enhanced AWIFS image to crop classification accuracy**. 1-11.
- YORINORI, J. T. Cultivares de soja resistentes a *Microsphaera diffusa*. **Fitopatologia Brasileira**, 22, 1997.
- YORINORI, J. T. Epidemia da ferrugem da soja (*Phakopsora pachyrhizi*) no Brasil e no Paraguai, em 2001 e 2002. **Fitopatologia Brasileira**, 27, p. 178, 2002.
- YU, N.; LI, L.; SCHMITZ, N.; TIAN, L. F. et al. Development of methods to improve soybean yield estimation and predict plant maturity with an unmanned aerial vehicle based platform. **Remote Sensing of Environment**, 187, p. 91-101, 2016.
- ZABOT, L.; DUTRA, L. M. C.; MENEZES, N. L. de; GARCIA, D. C.; LUDWIG, M. P.; SANTOS, V. J. dos. Uso de imagens digitais para avaliação de plântulas de feijão. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 30, n. 2, p. 184-192, 2008.
- ZAMBIAZZI, E. V.; BRUZI, A. T.; ZUFFO, A. M.; SOARES, I. O. et al. Effects and management of foliar fungicide application on physiological and agronomical traits of soybean. **Australian Journal of Crop Science**, 12, n. 2, p. 265, 2018.
- ZAMBOLIM, L. O que o engenheiros-agrônomos deve saber para orientar corretamente o uso de produtos fitossanitários. ampl. **Universidade Federal de Viçosa, MG**. Suprema, 2019.

CAPÍTULO 2 ASSOCIATION BETWEEN VEGETATION INDICES OBTAINED THROUGH UAV WITH GRAIN YIELD AND DISEASE SEVERITY IN SOYBEAN

ABSTRACT

Aerial images, captured through drones or satellites, provide a comprehensive view of soybean crop at various growth stages. These images offer valuable insights into plant vigor, spatial distribution, population density, leaf health, and other important parameters. The objective of this study was to establish correlations between vegetation indices obtained from unmanned aerial vehicles and grain yield, severity of asian soybean rust, and powdery mildew in soybean crop under tropical conditions. Six commercial soybean cultivars with INOX® technology (TMG 7060 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7262 RR, TMG 7062 IPRO, TMG 7363 RR, TMG 7067 IPRO), a multiline (a mixture of lines), and a susceptible control for asian soybean rust and powdery mildew (M6410 IPRO) were evaluated. The experiments took place in Lavras, Ijaci, and Nazareno, located in the state of Minas Gerais, during the 2020/21 season. The experimental design used was a randomized complete block design, with treatments divided into split-plot strips (4 fungicide application managements and 7 cultivars + one multiline) in three replicated. The number of applications was assigned to the main plots, while cultivars were assigned to the subplots. Two drones were used to collect the images: a DJI Mavic Pro equipped with a red-green-blue (RGB) camera, and a DJI Matrice 100 with a Parrot Sequoia (multispectral) camera. The evaluated traits included asian soybean rust severity, powdery mildew severity, defoliation index, grain yield, and vegetation indices NDVI and MPRI. Joint analysis (multi-environment) and split-plot analysis over time were performed, with statistical analyses conducted using the R environment. The NDVI and MPRI vegetation indices exhibited a strong correlation, allowing for the use of both RGB and multispectral cameras in high-throughput phenotyping to assess grain yield and powdery mildew severity in soybean crops in tropical high-altitude climates. However, no significant correlation was found between Asian soybean rust severity and the other evaluated traits, making it challenging to employ aerial images for quantifying the severity of *Phakopsora pachyrhizi* disease under tropical conditions.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill. *Phakopsora pachyrhizi*. High-throughput phenotyping. Grain yield. *Erysiphie difusa*. RGB and Multispectral Camera.

1 INTRODUCTION

In applied sciences, the term “remote sensing” refers to the acquisition of remote images of the Earth's surface using sensors aboard aircraft or satellites. Remote sensing provides a synoptic solution for plant monitoring and has potential applications in agriculture (DÖRNHÖFER; OPPELT, 2016; YU et al., 2016). Remote sensing applied to agriculture is based on the spectroscopy of reflected radiation resulting from the interaction of incident electromagnetic radiation from the sun with different targets on the Earth's surface. These measurements originate from the reflected spectrum, specifically covering the visible region (0.4 - 0.7 μm), near-infrared (0.7 - 1.3 μm), and shortwave infrared (1.3 - 2.5 μm) regions (JORGE; INAMASU, 2014).

The most common types of remote sensing devices used for plant phenotyping include multispectral, hyperspectral, fluorescence, and thermal sensors or imagers using reflected or emitted radiation from the canopy. Additionally, digital red-green-blue (RGB) cameras are widely used, and in fact, most current low-cost approaches to phenotyping are based on RGB image exploitation (ARAUS et al., 2018).

The use of remote sensing with drones or Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) provides a flexible platform, rapidly acquiring data over large areas and potentially providing high spatial resolution images (± 1 mm per pixel). Applications of this technology include plant stress detection (THENKABAIL et al., 2004), measuring plant chlorophyll content (BLACKBURN; FERWERDA, 2008), identifying differences in percentage of green vegetation cover (CHEN et al., 2008), extracting biochemical variables such as nitrogen and lignin (BLACKBURN; FERWERDA, 2008; DALPONTE et al., 2009), discriminating soil cover types (THENKABAIL et al., 2004), detecting crop moisture variations (COLOMBO et al., 2008), detecting subtle variations in leaf pigment concentrations (YANG et al., 2009, ZHAO et al., 2007), modeling biophysical characteristics and agricultural crop yields (THENKABAIL et al., 2000; HOUBORG et al., 2009), improving sparse vegetation change detection (LYON et al., 1998), and assessing absolute leaf water content in plants (JOLLINEAU; HOWARTH, 2008).

In the literature, there are reports of the efficiency of soybean phenotyping, aiding in crop improvement by evaluating canopy cover, vigor characteristics, leaf area, and plant development under stress conditions (MOREIRA et al., 2021).

To assess and monitor the growth of a particular crop, various vegetation indices can be developed, which involve algebraic operations on values obtained from different spectral bands, primarily in the visible and near-infrared regions, also known as spectral bands. Subsequently, it is possible to correlate these indices with crop variables, such as biomass, canopy coverage, and chlorophyll content (MAIMAITIJIANG et al., 2017; SAKAMOTO et al., 2012). This allows for envisioning the experimental capabilities and operational applications of image use.

The evaluation of vegetation indices obtained from aerial images represents a fast, cost-effective, and reliable resource for crop monitoring (CANDIAGO et al., 2015), facilitating non-destructive and real-time monitoring (VON BUEREN et al., 2015). Based on the above, the objective was to study the association between vegetation indices obtained by unmanned aerial vehicles (UAV's) and the severity of rust, powdery mildew, and grain yield in tropical conditions in soybean crop.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Study area

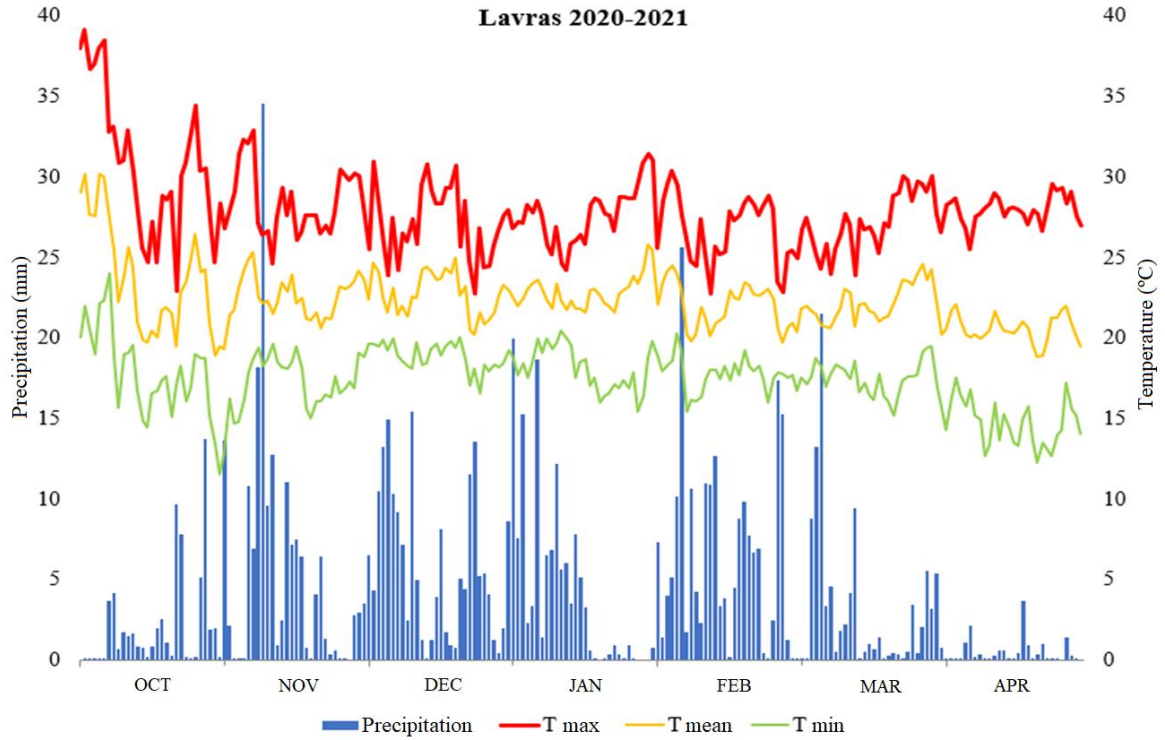
The experiments were conducted at three locations during the 2020/2021 agricultural season, in the municipalities of Lavras, Ijaci, and Nazareno (Minas Gerais-State-Brazil). The geographic coordinates and climate data (FIGURES 1, 2 and 3) of the locations are presented below.

a) Experimental area at the Center for Scientific and Technological Development in Agriculture (Muquém Farm) of the Federal University of Lavras - UFLA, located at an altitude of 954 m, latitude 21°12'11" and longitude 44°58'47", in the municipality of Lavras.

b) Center for Scientific and Technological Development in Agriculture - Palmital Farm, located in the municipality of Ijaci, at a latitude of 21°09' S, longitude 44°54' W, and altitude of 920 m.

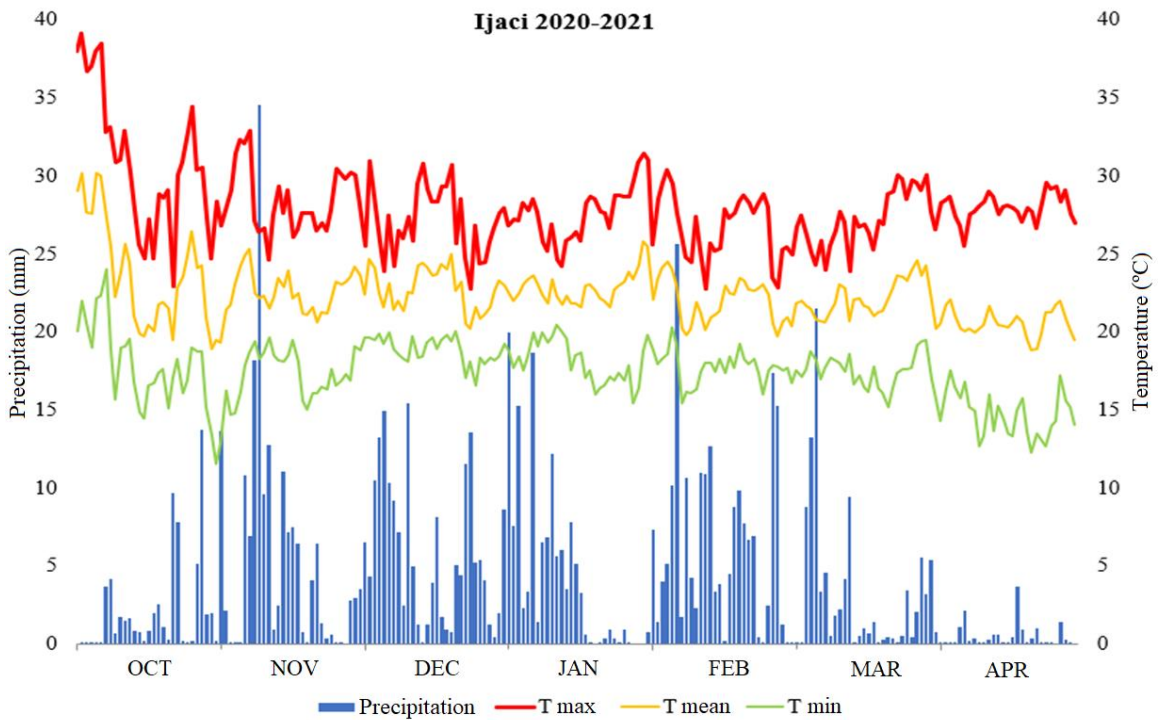
c) Experimental area of Science, Technology, and Engineering at Rehagro Pesquisa, located in the municipality of Nazareno, at a latitude of 21°15'32" S, longitude 44°30'56" W, and altitude of 1003 m.

Figure 1 – Precipitation, maximum, average, and minimum temperatures from October to April in Lavras-MG.



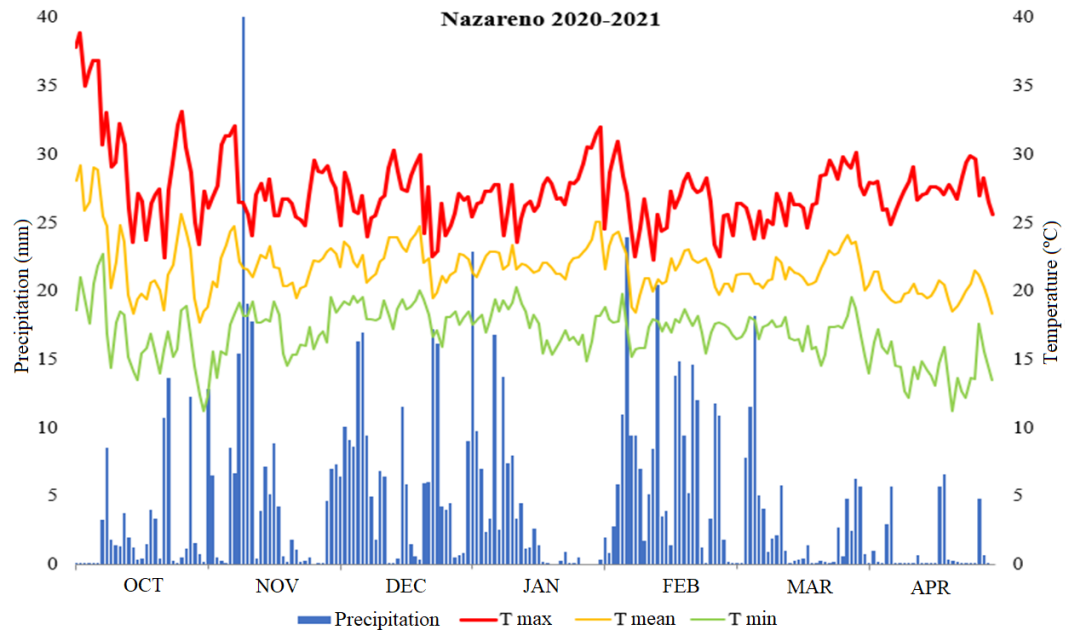
Source: Nasa Power (2023).

Figure 2 – Precipitation, maximum, average, and minimum temperatures from October to April in Ijaci-MG.



Source: Nasa Power (2023).

Figure 3 – Precipitation, maximum, average, and minimum temperatures from October to April in Nazareno-MG.



2.2 Genetic treatments and experimental process

The experiments was carried out under no tillage system, with seed furrows spaced at 0.50 m. Fertilization was performed according to the recommendations of (SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015). Six soybean cultivars with the INOX® technology, a multiline, meaning a mixture of genotypes with higher population homeostasis, and one susceptible cultivar were used (TABLE 1). To sow the multiline, three seeds of each INOX® cultivar were mixed, totaling 18 seeds per linear meter.

Table 1 – Description of the cultivars, maturity groups (MG), and tecnologia.

Origin	MG	Tecnology
TMG 7060 IPRO	6.0	INTACTA RR2 IPRO/ INOX®
TMG 7063 IPRO	6.3	INTACTA RR2 IPRO/ INOX®
TMG 7262 RR	6.2	RR/ INOX®
TMG 7062 IPRO	6.2	INTACTA RR2 IPRO/ INOX®
TMG 7363 RR	6.3	RR/ INOX® / Resistente à Cisto
TMG 7067 IPRO	6.7	INTACTA RR2 IPRO/ INOX®
MULTILINHAS	-	-
M 6410 IPRO	6.4	INTACTA RR2 IPRO®

Source: Adapted from TMG (Tropical Breeding and Genetics).

The experimental design used was a randomized complete block design, with treatments decomposed into split-plot strips, 4 x 8 (four fungicide application managements and seven cultivars + one multiline), with three replications. The number of applications in the plots (TABLE 2) and the cultivars in the subplots.

Table 2 – Number of fungicide applications used and stages of soybean plant development.

Number of applications	Phenological stage of applications
0	Control
1	R ₁ *
2	R ₁ e R ₁ + 15**
3	R ₁ , R ₁ + 15** e R ₁ + 30**

*Flowering Time, ** Days After R₁.

Source: Author (2023).

The plots consisted of four rows of five meters, with a spacing of 0.5 meters between rows and 18 seeds per meter. The two central rows were considered as the useful area of the plots. Sowing was done manually in a no-till system in the first half of December 2020, and harvesting took place in March 2021. Inoculation via furrow was performed after sowing with *Bradyrhizobium japonicum* bacteria at a rate of 18 mL a.i. kg⁻¹ of seed - strains SEMIA 5079 and 5080, containing 10.8 x 10⁶ CFU/seeds of the Nitragin Cell Tech HC® inoculant (3x10⁹ CFU/mL).

For application, a motorized backpack sprayer equipped with a bar and four XR 11002 spray nozzles was used, applying a spray volume equivalent to 150 L/ha. Pest control in the crop was performed as needed using insecticides with Neonicotinoid, Pyrethroid, and Chlorpyrifos chemical groups. Weed control in post-emergence was carried out using glyphosate at a dosage of 2 L/ha. Only the fungicide Fox Xpro® (trifloxystrobin; prothioconazole, bixafen) was used at the recommended dosage of 0.4 L a.i./ha. For application, a motorized backpack sprayer equipped with a bar and four XR 11002 spray nozzles spaced 50 cm apart was used, calibrated for a flow rate of 150 liters/ha. The recommended adjuvant for the fungicide was added at the manufacturer's recommended dosage at the time of application.

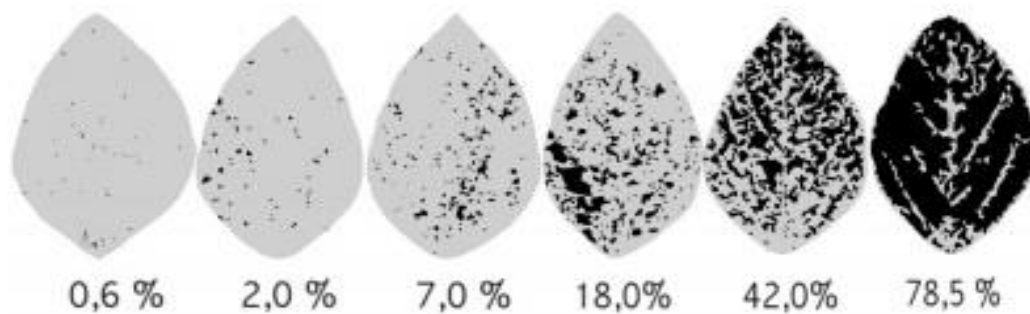
2.3 Data collection

Data collection involved the evaluation of grain yield, which was determined by harvesting the plots. After standardizing the grain moisture to 13%, the yield was estimated in kg/ha by converting the area of each plot.

The severity of Asian rust was quantified by assessing the percentage of leaf area covered with disease symptoms, using a diagrammatic scale (FIGURE 4) developed by Godoy; Koga e Canteri (2006). For powdery mildew, a diagrammatic scale developed by Mattiazzi (2003) (FIGURE 5) was used.

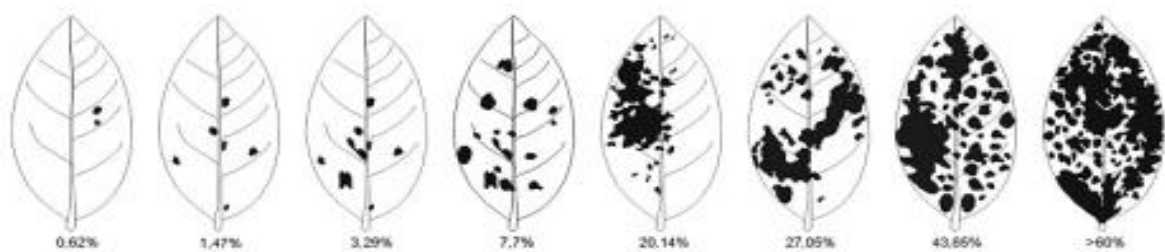
Three trifoliolate leaves per plant were evaluated, representing one from the upper third, one from the middle third, and one from the lower third of the plant. This totaled nine leaflets evaluated per plot, and the average severity represented an estimation of the mean disease severity in the plot.

Figure 4 – Diagrammatic scale for assessment of Asian soybean rust severity.



Source: Godoy; Koga e Canteri (2006).

Figure 5 – Diagrammatic scale for assessment of Powdery Mildew (*Erysiphe difusa*) in soybean crops.

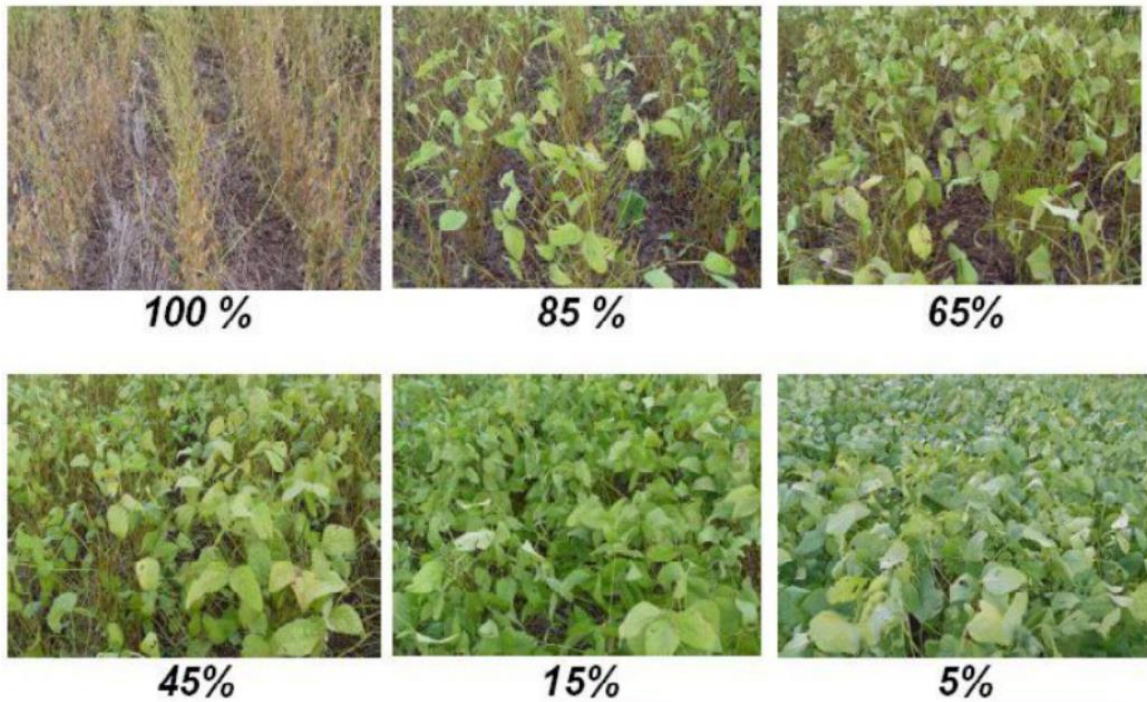


Source: Mattiazzi (2023).

The defoliation of the plots was evaluated by a single evaluator based on the diagrammatic scale developed by Hirano et al. (2010) (FIGURE 6). This scale provides visual

reference points for assessing the extent of leaf loss or defoliation in the plants. By comparing the observed defoliation with the reference images on the diagrammatic scale, an estimation of the defoliation level in each plot was determined.

Figure 6 – Diagrammatic scale for assessment of defoliation in soybean crops.



Source: Hirano et al. (2010).

The images were captured using two drones, a DJI Mavic Pro (DJI Technology Co., Ltd.) equipped with a red-green-blue (RGB) digital camera and a DJI Matrice 100 with a Parrot Sequoia multispectral sensor (Parrot Group, Paris, Europe). The Sequoia sensor is capable of acquiring images in four different spectral bands, two in the visible wavelength (Green: 530-570 nm and Red: 640-680 nm), one in the red edge region (RedEdge: 730-740 nm) and another in the near infrared (NIR: 770-810 nm). The images from these four bands have a resolution of 1.2 megapixels and have 16 bits of radiometric resolution.

The flights were conducted between 10:00 a.m. and 1:00 p.m. All flight missions were performed at an altitude of 30 m with the Mavic Pro and 40 m with the Matrice 100, at an approximate speed of 5 m/s. The images had a ground sampling distance (GSD) of approximately 0.80 to 0.85 cm and a longitudinal overlap of 80% and lateral overlap of 70%. Waypoints and flight routes were automatically generated using flight planning software such as Pix4Dcapture (v4.8.0; Pix4D, Prilly) and Drone Deploy. A smartphone was used to prepare

the flight missions in the field, which were then loaded onto the main control board of the UAS before the flight. During each flight, the UAS followed a predetermined route using autonomous flight mode of the software.

Flat PVC panels (50×50 cm) were placed as permanent ground control points (GCP's) to ensure accurate georeferencing of the images. The GCP's were placed at the vertices of the experimental area in the field. Georeferencing was performed using an Real Time Kinematic (RTK) GNSS instrument, where four predefined points were collected. The points were tracked and fixed in the field using a pair of Spectra precision GNSS antennas operating in RTK mode with base and rover setup, with an error margin of less than 0.03 m.

In this type of georeferencing using RTK, two receivers are used to continuously collect data. One receiver, known as the reference station (base), is positioned over a point with known coordinates. The other receiver (roving receiver) is used to collect data and points of interest for the user and determine the real-time position. The RTK tracking model provides high speed and accuracy in determining the geographic position and ellipsoidal altitude. Therefore, using RTK allows for obtaining the geometric elevation of an alignment with reference to the local geoid.

Agisoft Photoscan 1.4 software (Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia) was used, where the spatial references were initially corrected with specifications for SIRGAS 2000 UTM 23S. Then, the image alignment process was performed (triangulation and automatic measurement of crossing points and connections via automatic image correlation), followed by the construction of a dense point cloud, image texture construction, digital terrain modeling based on the DEM, orthorectification of the images, and creation of the final orthomosaic.

The points obtained through the topographic survey (GNSS RTK) were interpolated into ArcGIS 10.1 software to obtain the study surface referred to as the "control." From the orthomosaic, background soil information and others were removed using color thresholds, and after the removal of the background, the soybean plots were segmented from the orthomosaic, creating grids for the calculation of vegetation indices.

An index that represents the vegetation's spectral response in the visible spectrum is the Modified Photochemical Reflectance Index (MPRI), which evaluates the normalized difference of the spectral response in the green and red regions to enhance the green cover of crops (GONÇALVES et al., 2017). The MPRI was calculated using the following equation:

$$MPRI = \frac{\text{Green} - \text{Red}}{\text{Green} + \text{Red}}$$

The MPRI is a useful tool for assessing the photosynthetic activity and overall health of vegetation. By quantifying the difference between green and red reflectance, it provides insights into the greenness and vigor of crops. The interpretation and application of MPRI may vary depending on the specific vegetation and environmental conditions.

Another index Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used, which is calculated by the difference between the reflectance values detected in the visible and near-infrared bands, divided by the sum of those quantities. The NDVI was calculated using the following equation:

$$NDVI = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}$$

The NDVI is a commonly used vegetation index that quantifies the density and health of vegetation. It provides a measure of the vegetation's photosynthetic activity and can indicate the presence of green biomass. Higher NDVI values generally correspond to healthier and more vigorous vegetation, while lower values may indicate stress or sparse vegetation cover. The interpretation of NDVI values can vary depending on the specific application and environmental conditions.

2.4 Statistical analysis of phenotypic data

The experiments from each location were individually analyzed by model one, considering all response variables in order to perform the analysis of residue normality based on the Shapiro-Wilk test (SHAPIRO; WILK, 1965) and detect variance homogeneity using the maximum F test (Equation 1) (HARTLEY, 1950).

$$\bar{y} = \mu + X_r \tau_r + X_g \tau_g + \varepsilon \quad (1)$$

where:

\bar{y} : observed value for the analyzed characteristic;

μ : constant associated with all observations;

$X_r \tau_r$: vector of fixed replication effects;

$X_g\tau_g$: vector of fixed cultivar effects;

ε : vector of associated error effects (random) $\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$.

After the homogeneity of residual variances test, a joint analysis for the environments was performed to estimate the Best Linear Unbiased Estimators (BLUEs), using a mixed model approach, specifically adopting model two. Additionally, two partitioning analyses were conducted, one between the effects of two regular treatments (which feature the Inox technology) and another among the multiline and susceptible control.

Contrasts were made between the regular treatments effect and the overall mean, as well as between the regular treatments effect and the control treatment, for the evaluated variables. For variables where the assumption of variance homogeneity was not met, a

diagonal variance matrix structure $e_{ik} \sim N(0, \bigoplus_{j=1}^j I\sigma_e^2)$ was adopted (Equation 2)

(BARBOSA, 2009; HENDERSON, 1975).

$$\bar{y} = \mu + X_l u_l + X_r u_r + X_a \tau_a + X_g \tau_g + X_{ga} \tau_{ga} + X_{gl} u_{gl} + X_{la} u_{la} + \varepsilon \quad (2)$$

where:

\bar{y} : observed value for the analyzed characteristic;

μ : constant associated with all observations;

$X_l u_l$: vector of random local effects, $l \sim N(0, \sigma_l^2)$;

$X_r u_r$: vector of random within-local replication effects, $g \sim N(0, \sigma_r^2)$;

$X_a \tau_a$: vector of fixed application effects;

$X_g \tau_g$: vector of fixed cultivars effects;

$X_{ga} \tau_{ga}$: vector of fixed treatment-application interaction effects;

$X_{gl} u_{gl}$: vector of random treatment-local interaction effects, $gl \sim N(0, \sigma_{gl}^2)$;

$X_{la} u_{la}$: vector of random local-application interaction effects, $la \sim N(0, \sigma_{la}^2)$;

ε : vector of associated error effects (random), $\varepsilon \sim N(0, I\sigma_\varepsilon^2)$.

The Asian rust Area under the disease progress curve (AUDPC) data collected from the middle, upper, and lower thirds of the plants in the plot were subjected to model three, which corresponds to the nested analysis (Equation 3).

$$\bar{y} = \mu + X_l u_l + X_r u_r + X_a \tau_a + X_g \tau_g + X_{ga} \tau_{ga} + X_{gl} u_{gl} + X_p u_p + X_{la} u_{la} + \varepsilon \quad (3)$$

where:

\bar{y} : observed value for the analyzed characteristic;
 μ : constant associated with all observations;
 X_{lu} : vector of random local effects, $l \sim N(0, \sigma_l^2)$;
 X_{ru} : vector of random within-local replication effects, $g \sim N(0, \sigma_r^2)$;
 $X_a \tau_a$: vector of fixed application effects;
 $X_g \tau_g$: vector of fixed treatment effects;
 $X_{ga} \tau_{ga}$: vector of fixed treatment-application interaction effects;
 $X_{gl} u_{gl}$: vector of random treatment-local interaction effects, $gl \sim N(0, \sigma_{gl}^2)$;
 $X_p u_p$: vector of random position effects aligned with treatments, $p \sim N(0, \sigma_p^2)$;
 $X_{la} u_{la}$: vector of random local-application interaction effects, $la \sim N(0, \sigma_{la}^2)$;
 ε : vector of associated error effects (random), $\varepsilon \sim N(0, I \sigma_\varepsilon^2)$.

The vegetation indices were analyzed using model four, following a repeated measures design over time. This approach was used to account for the effect of collecting repeated measures within the same plot and to estimate an adjusted mean value for the different indices to represent the plot-level response.

For the analysis procedure, the repetitions were adjusted based on the combination of replication, location, and application effects, resulting in a total of 36 repetitions. The partitioning for the treatment effect was carried out as described in model two (Equation 4).

$$\bar{y} = \mu + X_r u_r + X_m \tau_m + X_g \tau_g + X_{gm} \tau_{gm} + X_{rm} u_{rm} + X_{gr} u_{gr} + \varepsilon \quad (4)$$

where:

\bar{y} : observed value for the analyzed characteristic;
 μ : constant associated with all observations;
 X_{ru} : vector of random replication effects, $g \sim N(0, \sigma_r^2)$;
 $X_m \tau_m$: vector of fixed measurement effects;
 $X_g \tau_g$: vector of fixed treatment effects;
 $X_{gm} \tau_{gm}$: vector of fixed treatment-measurement interaction effects;
 $X_{rm} u_{rm}$: vector of random replication-measurement interaction effects, $rm \sim N(0, \sigma_{rm}^2)$;
 $X_{gr} u_{gr}$: vector of random treatment-replication interaction effects, $gr \sim N(0, \sigma_{gr}^2)$;
 ε : vector of associated error effects (random), $\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$.

The area under the disease progress curve was obtained using the following method (Equation 5).

$$AUDPC = \sum_{i=1}^n \left[\frac{Y_{i+1} + Y_i}{2} \times (T_{i+1} - T_i) \right] \quad (5)$$

where:

AUDPC: Area Under the Disease Progress Curve;

Y_i : disease severity at evaluation time i ;

Y_{i+1} : disease severity at evaluation time $i+1$;

T_i : evaluation time for i , in terms of the number of days between each evaluation;

T_{i+1} : evaluation time for $i+1$.

The experimental precision was evaluated using the average accuracy ($r\hat{g}g$) according to Resende; Silva and Azevedo (2014), as estimated by estimator 6.

$$r\hat{g}g = \sqrt{1 - \frac{1}{F_g}} \quad (6)$$

The Pearson correlation (ρ) was calculated using the fitted values between the different variables analyzed to assess the association between the experimental variables and the results obtained from the vegetation indices. The significance of the correlations was tested using the t-test at significance levels of 0.05 and 0.2.

The R environment (TEAM, 2010) version 4.1.3 was used for data processing and fitting the models used. The sommer package (COVARRUBIAS-PAZARAN, 2016) was employed for fitting the mixed linear models. The tools available in the Tydiverse package (WICKHAM et al., 2019) were used for data manipulation and the creation of the presented graphs.

3 RESULTS and DISCUSSION

The results of the individual analysis of variance for the eight cultivars by environment for the traits AUDPC I: Rust severity in the lower third; AUDPC M: Rust severity in the middle third; AUDPC S: Rust severity in the upper third; AUDPC md: Mean rust severity in the plot; AUDPC oi: Mean powdery mildew severity; DESF: End-of-season defoliation; YIELD: Yield (kg ha^{-1}) are presented in Table 3.

The accuracy, on average, showed medium to high magnitudes, ranging from 0.43 for AUDPC I in Nazareno to 0.98 for AUDPC md in Ijaci (TABLE 3). The accuracy, when considering the value of Fc (QMT/QME), takes into account the variation between cultivars,

not just the experimental error as calculated in CV. Thus, the higher the values of Fc for the source of variation "cultivars," the higher the accuracy and experimental precision associated with the scientific observations. It is possible to observe that in all three environments, for all traits related to visual evaluation using a rating scale, significant differences were detected at a significance level of 0.05 by the F test.

There was no significant difference for YIELD. When analyzing the means for the traits such as Yield, AUDPC md, and AUDPC oi, and comparing the environments, differences can be identified. Notably, it is observed that Nazareno, regardless of the evaluated trait, showed higher disease severity and lower average yield compared to the Lavras environment, with a very similar average yield to the Ijaci environment.

These results emphasize the importance of the cultivation environment in the expression of these traits and suggest the presence of favorable conditions for disease development in Nazareno, leading to a reduction in crop yield in that location. The higher mean rust and powdery mildew severity in Nazareno highlight a higher disease pressure in that environment. In Lavras, a lower AUDPC md and higher average yield were observed, despite being the environment where higher defoliation was detected.

Table 3 – Results for individual analysis by location for the variables evaluated in eight soybean strains, assessed in Lavras, Ijaci, and Nazareno.

Area	FV	AUDPC	AUDP	AUDP	AUDP	AUDPC	DESF	YIELD	Sowing Time
		I	C M	C S	C md	oi			
Ijaci	FG	11,86*	18.23*	19.65*	21.57*	3.40*	21,41*	28,37	Dec 12, 2020
	QME	393,61	2006,02	710,74	6368,00	10,93	54,44	42572,38	
	r $\hat{g}g$	0,96	0,97	0,97	0,98	0,84	0,98	0,98	
	Average	8,29	26,28	27,75	61,22	6,81	83,69	1840,14	
Lavras	FG	1.43*	18.23*	2.14*	1.65*	2,16*	4,94*	3.80*	Dec 11, 2020
	QME	145,37	979,26	95,06	446,08	2786,67	97,72	154490,8 1	
	r $\hat{g}g$	0,55	0,97	0,73	0,63	0,73	0,89	0,86	
	Average	10,61	34,12	6,54	25,68	83,85	88,13	2618,08	
Nazareno	FG	1.22*	0.57*	5.82*	4.32*	2.05*	15,33*	4,21	Dec 01, 2020
	QME	2,65	6341,24	1492,05	2388,57	12838,3 2	94,11	73661,46	
	r $\hat{g}g$	0,43	0,80	0,91	0,88	0,72	0,97	0,87	
	Average	0,70	86,74	73,25	108,28	922,53	78,07	1844,74	

FV: Source of variation; AUDPC I: Severity in the lower third; AUDPC M: Severity in the middle third; AUDPC S: Severity in the upper third; AUDPC md: Mean severity of the plot; AUDPC oi: Mean severity for powdery mildew; DESF: End-of-season defoliation; YIELD: Yield (kg ha⁻¹); Treatment calculated F-value and significance at 0.05 (FG); Residual mean square (QME); Accuracy (r $\hat{g}g$).

Source: Author (2023).

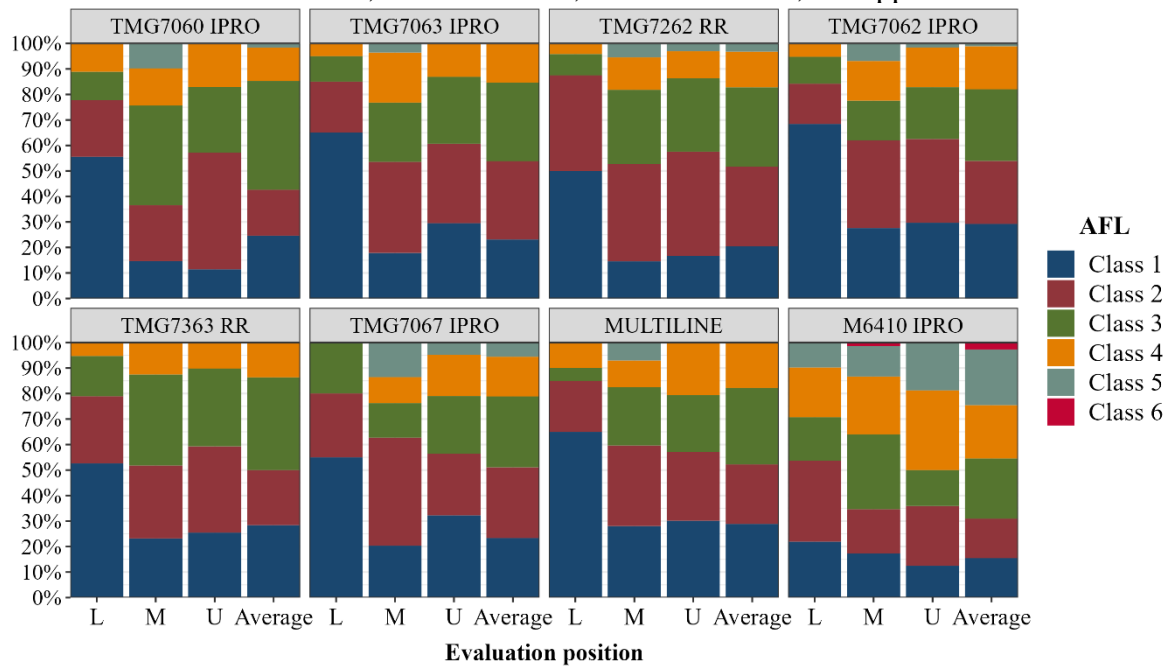
It is important to highlight that, although grain yield was not significant, the occurrence of the disease had a negative impact on grain yield. It is relevant to note that the average of the susceptible control for rust is lower than that of the INOX® cultivars (FIGURE 7). This result suggests that susceptibility to the disease negatively affects the productive performance of the genotype. This difference was also observed by Geraldo and Adami (2020), who reported that the TMG7062 IPRO cultivar had lower severity compared to other

susceptible cultivars, both in the management strategy with fungicide applications and without fungicide application during two crop seasons.

The frequency distribution for rust severity presented in figure 7 highlights the difference between treatments that have the INOX® technology and the susceptible control for Asian rust. Each class corresponds to the frequency of evaluation scores using the diagrammatic scale by Godoy; Koga and Canteri (2006). Class 6, representing 78.5% of Asian soybean rust severity, was present only in the M6410 IPRO cultivar, while class 5 (42% severity) and 4 (18% severity) had higher magnitudes compared to other genetic treatments.

This is expected due to the presence of treatments with the INOX® technology, which confers resistance genes to Asian rust to the genotypes, resulting in a decrease in symptoms, lesion size and number, and reduction in the epidemic rate in the field compared to susceptible genotypes (JULIATTI, 2018). Treatments with INOX® technology showed a higher frequency of class 1 (0.6% severity) in the lower third of the plant, demonstrating a lower disease progression over time.

Figure 7 – Frequency distribution of Asian rust severity, in percentage, based on the diagrammatic scale proposed by GODOY; KOGA e CANTERI (2006). AFL: Lesioned leaf area, L: Lower third; M: Middle third; U: Upper third



Source: Author (2023).

Genotypes with INOX® technology showed a lower progression of average rust severity throughout the crop cycle compared to the susceptible cultivar M6410 IPRO for all plant positions (FIGURE 8). Partial resistance is characterized by a reduction in the epidemic rate, a decrease in the number and size of lesions, a decrease in urediniospore production, and an extended latent period. This reduces the amount of inoculum and the intensity of the disease during the crop cycle (JULIATTI, 2018).

Asian soybean rust is known to initially manifest in the lower parts of the plants and later spread to the upper. This pattern of ascending infection occurs for several reasons. The lower parts of soybean plants generally provide a more favorable environment for fungal development. The relative humidity is usually higher in the lower part of the plant due to less air movement and higher moisture retention in the lower foliage, providing the necessary conditions for spore germination and initial infection. The cooler temperatures in the lower part of the plant are more conducive to fungal multiplication and pathogen development. The higher temperatures and sunlight exposure in the upper parts can limit fungal growth and dissemination (JULIATTI; POZZA; JULIATTI, 2021).

As the infection establishes in the lower part of the plant, the fungus continues to multiply and produce new spores. These spores are then carried by the wind to the upper parts of the plant, where they encounter less favorable conditions, such as higher temperatures and lower relative humidity. However, even under these unfavorable conditions, the fungus can still infect the plant, especially if there are prolonged periods of moisture or favorable weather conditions in the upper parts (JULIATTI; POZZA; JULIATTI, 2021).

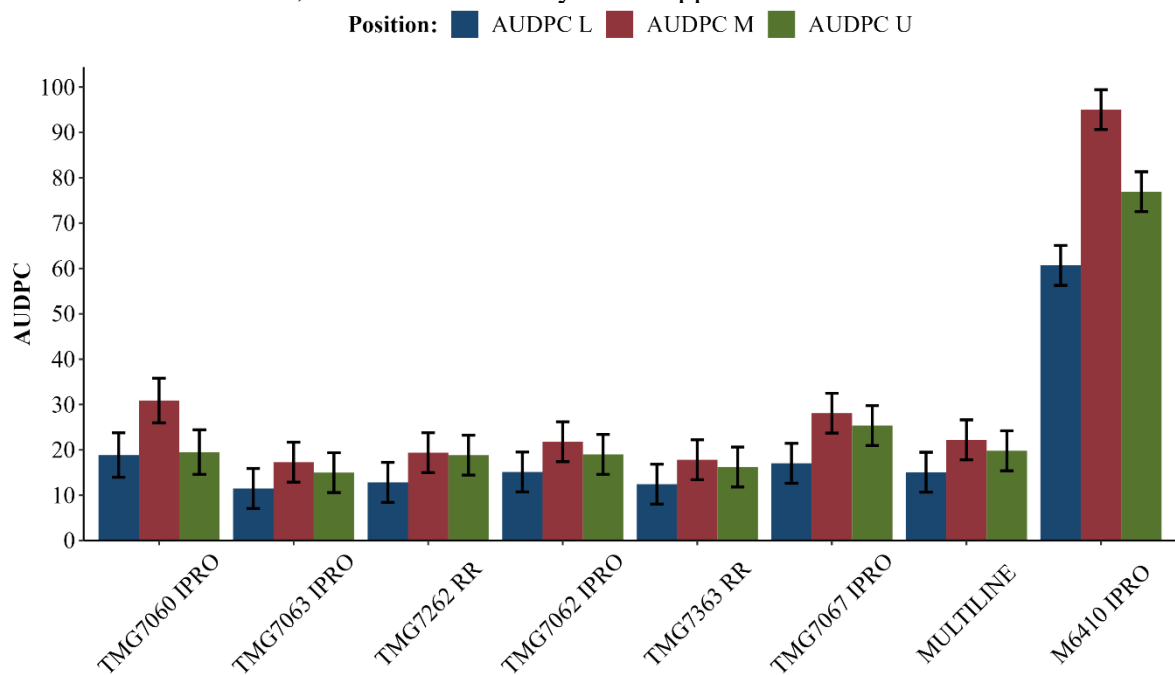
According to a study by Juliatti; Pozza and Juliatti (2021), no signs or symptoms of rust appeared at temperatures below 18°C or above 30°C, and the highest values of AUDPC occurred at 24°C with a 24-hour leaf wetness period. On the other hand, the lowest values were reached at temperatures above 27°C.

The Multiline cultivar exhibited similar behavior to the other treatments with INOX® technology. This was expected based on the results found in other crops. In common bean, Botelho; Ramalho; Abreu and Rosa (2011) concluded that the use of mixtures composed of bean lines with different resistance patterns to *Colletotrichum lindemuthianum* represents a good strategy to reduce anthracnose progression in the field and, consequently, reduce productivity losses caused by the pathogen.

According to the study by Raboin; Ramanantsoanirina; Dusserre; Razasolofonahary et al. (2012), investigating the use of mixtures with different proportions of susceptible cultivars against 100 isolates of *Magnaporthe oryzae*, they obtained results that demonstrate the effectiveness of mixtures in reducing rice blast. Castro et al. (2022) concluded that the multiline is an appropriate strategy to provide greater phenotypic stability and reduce *Magnaporthe oryzae* progression in the field.

In soybean, Vilela (2019) concluded that the mixture of lines is an efficient strategy to increase phenotypic stability in soybean, and the INOX® multiline of cultivars seems to be effective in reducing the severity of Asian rust in soybean.

Figure 8 – Results of Asian rust AUDPC aligned based on the position effect for the evaluated treatments. AUDPC L: Severity in the lower third; AUDPC M: Severity in the middle third; AUDPC U: Severity in the upper third.



Source: Author (2023).

For the joint analysis involving environments, it is important to note that, due to the higher magnitude of AUDPC md compared to the other AUDPC variables, it was chosen to present only this variable in the multi-environment analysis. This choice is due to the fact that AUDPC md is a more comprehensive indicator of average rust severity in the plot, encompassing relevant information about the disease as a whole in the plant.

Conducting experiments in multiple environments to evaluate the agronomic performance of different genotypes is one of the basic objectives of plant breeding programs

(ACQUAAH et al., 2016), and one way to evaluate such experiments is by conducting a joint analysis across environments and cropping years (WARD et al., 2019). In this regard, table 4 presents the summary of the joint analysis of variance, where the source of variation "Among Regular Cultivars (CR)" represents the treatments containing INOX® technology, while the source of variation "Among Lines (G)" represents the cultivars with INOX® technology, excluding the Multiline cultivar.

Table 4 – Results for the multi-environment analysis evaluated in eight soybean strains for Asian rust severity, powdery mildew severity, defoliation and yield.

FV	GL	N	AUDPC md	AUDPC oi	DESF	YIELD
Cultivars (C)	7	F	39854,20*	13531,29	1357,35*	61395,16
Among Regular C (CR)	6	F	6557,45*	4416,09	1321,65*	46916,69
Among Lineages (G)	5	F	6566,19*	7828,83	1507,93*	2711,70*
Mult vs G	1	F	37840,50*	11193,73	2875,33*	1829163,44*
Test vs G	1	F	264803,14*	11825,09	3529,35*	2013033,10*
Local (L)	2	A	1436,93	256309,53 *	19,38	195870,83*
Application (A)	3	F	8,05E+10	4,04E-05	6,79E+11	5,07E+07
C x A	21	F	26874,72*	1301,55	745,81*	701529,45*
C x L	14	A	2296,42*	257,47*	23,14*	41542,42*
A x L	6	A	92,61	7380,17*	8,71	486,54
Accuracy			0,98	0,49	0,97	0,86
QME			1946,16	10236,88	82,23	67447,82
Average			64,20	337,34	83,10	2098,05

FV: Source of variation; GL: Degrees of freedom; N: Nature of the effect (fixed or random); AUDPC md: Mean AUDPC; AUDPC oi: Mean AUDPC for powdery mildew; DESF: Defoliation percentage; YIELD: Yield in kg ha⁻¹.

*F-test for fixed effects (F) and Likelihood Ratio Test (LRT) for random effects (A) at a significance level of 0.05.

Source: Author (2023).

In this study, three environments were tested. Therefore, in this factor, there is a combination of environmental fluctuations inherent to the locations. The environmental

factors of the locations represent predictable variations, such as soil fertility. However, the occurrence of rainfall and even the incidence of high temperatures associated with the environments represent unpredictable variations, meaning they occur randomly and the researcher has no control over them. Therefore, the phenotypic contribution given by the environmental component was due to the combination of predictable and unpredictable factors (SILVA et al., 2017).

These environmental effects were essential for the significant interaction of C x L for all evaluated traits at a significance level of 0.05 by the LRT test (TABLE 4). Thus, these results reinforce the need to evaluate experiments in different environments (SOARES et al., 2015). The C x L interaction has been widely studied for soybean in Brazil and even in the specific region where the present study was conducted (AMARAL et al., 2019; BIANCHI et al., 2022; CARVALHO et al., 2023; GESTEIRA et al., 2018; SILVA et al., 2017; SOARES et al., 2020). The findings of the present study corroborate the literature reports and indicate that the behavior of the cultivars was not consistent across different environments.

The quadratic component of the cultivars (C) x locations (L) interaction was significant at a significance level of 0.05 by the LRT test. Due to the influence of environmental factors on phenotypic expression, it is expected that there will be genotype x environment interactions, meaning the behavior of different lines and/or cultivars will not be consistent across the evaluated environments (RAMALHO et al., 2012).

For AUDPC md and Defoliation (DESF), there was a significant effect at a significance level of 0.05 for the quadratic components of Cultivars (C), the breakdowns Among Regular Cultivars (CR), Among Lines (G), the contrasts Mult vs G, Test vs G, and for the cultivars (C) x applications (A) interaction (TABLE 4).

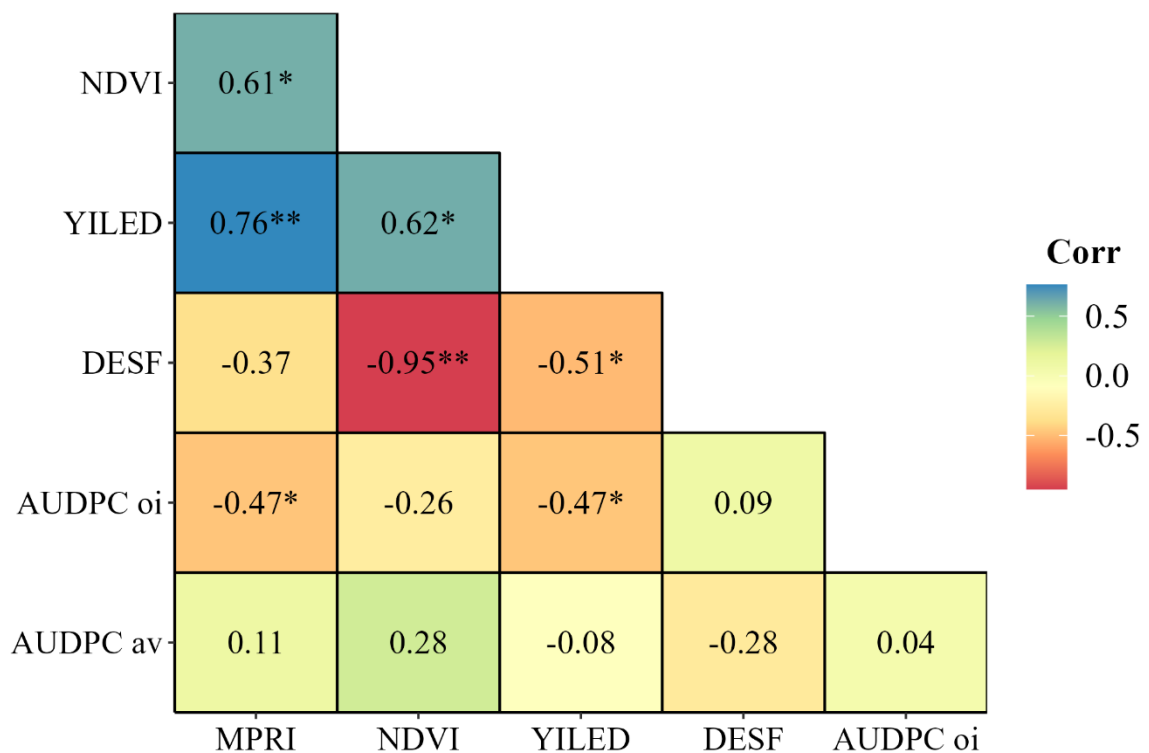
The significant effect of the cultivars (C) x applications (A) interaction indicates non-coincident behavior of the cultivars based on the number of fungicide applications for grain productivity, defoliation, and AUDPC md. The response with an increasing number of applications of the fungicide FOX XPRO® was linear and positive for grain productivity (data not shown). Similar results were observed by Barros et al. (2008); Finoto et al. (2011); Zambiazzi et al. (2018), where an increase in the number of applications led to an increase in grain productivity of 23%, 22%, and 28%, respectively.

For the defoliation and AUDPC md traits, an increase in the number of fungicide applications resulted in a decrease in the phenotypic means of both traits (data not shown).

Among the physiological effects of fungicides on crop metabolism, the inhibition of ethylene biosynthesis results in the "green effect," which delays senescence (SILVA; CANTERI; SILVA, 2013).

When analyzing soybean cultivars, significant differences were observed in the mean values of AUDPC md among the cultivars (TABLE 4, FIGURE 10). These differences indicate variations in susceptibility to the disease among the evaluated cultivars. These results are in line with previous studies that also reported the positive genetic influence on soybean's resistance to Asian rust (NEGRISOLI et al., 2022).

Figure 9 – Pearson phenotypic correlations between the adjusted means for the studied variables.



*t-test at 0.2 significance level and ** at 0.05 significance level; NDVI: Normalized Difference Vegetation Index; YIELD: Yield (kg ha^{-1}); DESF: Defoliation percentagem; AUDPC oi: Mean AUDPC for powdery mildew. AUDPC av: Average AUDPC
Source: Author (2023).

For AUDPC oi, there was a significant effect at a significance level of 0.05 by the LRT test for the components of variance for locations (L), the cultivars (C) x locations (L) interaction, and the applications (A) x locations (L) interaction. For YIELD, there was a significant effect at a significance level of 0.05 by the F test for the quadratic components among lines (G) with INOX® technology and for the contrasts Mult vs G, Test vs G. The

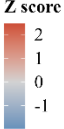
variance component of locations (L), the cultivars (C) x applications (A) interaction, and the cultivars (C) x locations (L) interaction were significant at a significance level of 0.05 by the LRT test (TABLE 4).

Thus, although the cultivars (C) factor was not significant, the significant contrasts Mult vs G and Test vs G indicate differences between the INOX® cultivars when compared to the multiline and the susceptible control, respectively (TABLE 4, FIGURE 10). In the literature, it is reported that autogamous plant cultivars, due to having most loci in homozygosity, have less individual buffering capacity, meaning they are more susceptible to biotic and abiotic stresses. Therefore, the choice of strategies for better adaptation to the effects of predictable and unpredictable environmental fluctuations requires careful selection of the genetic structure of populations (BRUZI; RAMALHO; ABREU, 2007). One strategy that has been researched is the use of multiline, which is a mixture of genotypes. In theory, the genotype mixture would have greater population homeostasis and therefore be more stable than the pure line (CARNEIRO et al., 2019).

In the final stage of Asian rust epidemic, the lesions lead to yellowing of leaves and subsequent senescence, which can even result in complete defoliation in severe infestations (ZAMBOLIM, 2019). In this study, AUDPC md and DESF showed a negative correlation (0.28), but without significant effect (FIGURE 9).

Figure 10 – Scott-Knott comparison test for the analyzed variables at a significance level of 0.05. Means followed by the same letter in the column do not differ statistically from each other. The colors represent the magnitude of the adjusted means on a normalized scale.

	AUDPC av	AUDPC oi	DESF	MPRI	NDVI	YIELD
M6410 IPRO	167.12 a	336.08 a	78.51 b	0.13 b	0.65 b	2,056.85 a
MULTILINE	47.66 b	336.22 a	84.07 a	0.13 b	0.64 b	2,061.37 a
TMG7067 IPRO	58.01 b	345.60 a	67.21 b	0.13 b	0.68 a	2,279.17 a
TMG7363 RR	43.75 b	323.49 a	88.48 a	0.10 c	0.60 d	2,008.19 a
TMG7062 IPRO	50.23 b	340.36 a	88.75 a	0.15 a	0.62 c	2,202.45 a
TMG7262 RR	52.53 b	364.55 a	92.98 a	0.09 c	0.58 e	1,827.63 a
TMG7063 IPRO	47.09 b	321.66 a	85.68 a	0.15 a	0.63 c	2,303.58 a
TMG7060 IPRO	47.20 b	330.77 a	79.14 b	0.14 a	0.65 b	2,045.15 a



Source: Author (2023).

Table 5 presents the analysis of variance for the vegetation indices at different evaluation times. The Degrees of Freedom (DF) 1/2 corresponds to 1 DF for the measurement of the NDVI index and 2 DF for the measurement of the MPRI index. Similarly, the DF 7/14 for the interaction Cultivars (C) x Measurement (M) and for the experimental error Block x M with DF 35/70 for NDVI and MPRI, respectively.

The NDVI index showed a significant effect at a significance level of 0.05 by the F test for the quadratic components of Cultivars (C), for the subdivisions Among Regular Cultivars (CR), Among Lineages (G), for the contrasts Mult vs G, Test vs G, and for the interaction Cultivars (C) x Measurement (M). The systematic error of Block x M was significant at a significance level of 0.05 by the LRT test, indicating that the magnitude of the error varies among the measurements.

The MPRI index showed a significant effect at a significance level of 0.05 by the F test for the quadratic components of Cultivars (C), for the subdivisions Among Regular Cultivars (CR), Among Lineages (G), for the contrasts Mult vs G, Test vs G, and for the interaction Cultivars (C) x Measurements (M). The systematic errors of Block x M and Block x C were significant at a significance level of 0.05 by the LRT test, indicating that the

magnitude of the errors varies among the measurements. The accuracy for both indices was equal to 1. The CVe was 5.26% for the NDVI index and 28.56% for the MPRI index.

Table 5 – Results of the analysis of variance for the vegetation indices at different evaluation times.

FV	GL	N	NDVI	MPRI
Cultivars (C)	7	F	4,0276*	0,1570*
Among Regular C (CR)	6	F	4,1794*	0,1582*
Among Lineages (G)	5	F	4,0276*	0,1570*
Mult vs G	1	F	24,1617*	0,8155*
Test vs G	1	F	24,4032*	0,7806*
Measurement (M)	1/2	F	4,58E-03	4,00E-05
C x M	7/14	F	0,2077*	0,0095*
Block x M	35/70	A	0,0051*	0,0015*
Block x C	245	A	0,0002	0,0006*
	Accuracy		1	1
	QME		0,00198	0,0004
	CVe		5,26	28,56
	Average		0,6308	0,1277

FV: Source of variation; GL: Degrees of freedom; N: Nature of the effect (fixed or random); NDVI: Normalized Difference Vegetation Index; MPRI: Modified Photochemical Reflectance Index.

*F-test for fixed effects (F) and LRT (Likelihood Ratio Test) for random effects (A) at a significance level of 0.05.

Source: Author (2023).

For the NDVI index, the magnitude of the multiline mean is very close to the mean of the INOX® cultivars. However, the same does not occurs for the MPRI index (FIGURE 10). Although, as mentioned earlier, the genotypes are similar to each other, there are genetic differences among each of the evaluated cultivars due to their different genetic backgrounds, which, combined with environmental factors, resulted in differences in phenotypic observations (GESTEIRA et al., 2018).

The NDVI is calculated through a mathematical operation between bands, defined as the normalized difference between local radiometric values of two different bands from a multispectral image, as proposed by Cordeiro et al. (2005). Yang; Willis and Mueller (2008) propose, among others, the MPRI index, which is also based on the normalized difference

between two bands, but it uses bands in the green and red regions, independent of an infrared band. If we observe the behavior of vegetation across the visible spectrum (RGB), we can see that the relationship between the green and red bands is similar to the relationship between the infrared and red bands.

The NDVI and MPRI indices show a positive Pearson correlation (0.61) and significant effect at a significance level of 0.2 by the t-test, which allows the use of both RGB and multispectral cameras for the results of this study. The most common types of remote sensing devices used for plant phenotyping include multispectral, hyperspectral, fluorescence, and thermal sensors or imagers using reflected or emitted radiation from the canopy. In addition, red-green-blue (RGB) digital cameras are widely used; in fact, most current low-cost approaches to phenotyping are based on RGB image analysis (ARAUS et al., 2018).

Both indices showed a positive Pearson correlation (MPRI = 0.76 and NDVI = 0.62) for the trait Grain Yield (YIELD) and significant effects at a significance level of 0.05 and 0.2 by the t-test for the MPRI and NDVI indices, respectively (FIGURE 9). Defining the correlation between vegetation indices and productivity is relevant because if there is a correlation, it is possible to predict productivity in a simple, fast, inexpensive, and non-destructive way (HOYOS-VILLEGAS; FRITSCHI, 2013).

Furthermore, the NDVI index showed a high negative correlation with the trait Leaf Defoliation (-0.95), with a significant effect at a significance level of 0.05 by the t-test. The MPRI index also showed a negative correlation with the trait AUDPC oi, with a significant effect at a significance level of 0.2 by the t-test. The high negative correlation between the NDVI index and leaf defoliation can be observed in figure 3. The higher the average magnitude of the NDVI, the lower the average leaf defoliation in the genetic treatments.

Indeed, in an experiment conducted at Embrapa Soja with 22 fungicides, it was possible to visualize and correlate the MPRI index at the R5.5 stage with disease severity, area under the disease progress curve (AUDPC), and grain yield. This indicates the possibility of estimating disease severity and damage levels through the MPRI index, making it an important tool in experimentation and potentially reducing the need for visual and subjective assessments of disease severity (EMBRAPA, 2018). These results suggest that soybean cultivars respond differently to fungicide applications. The variation in the response of the evaluated indices and in productivity can be attributed to differences in physiological and

genetic characteristics of the cultivars, as well as interactions between genetic and environmental factors.

The use of aerial images obtained with Unmanned Aerial Vehicles (UAV's), commonly known as drones, has become increasingly accessible with the reduction in equipment and software costs used for image processing and orthomosaic composition. In the last decade, aerial images obtained with drones have provided new perspectives on the production environment, supporting decision-making regarding practices to improve production systems, focusing on increasing productivity and/or reducing costs.

Therefore, it can be inferred that the use of vegetation indices derived from aerial images represents a quick, economical, and reliable resource for crop monitoring (CANDIAGO et al., 2015), facilitating non-destructive and real-time monitoring (VON BUEREN et al., 2015). These indices are emerging as an important tool to be used in plant breeding programs as an alternative for high-throughput phenotyping.

By leveraging UAV technology and vegetation indices, researchers and farmers can gain valuable insights into the performance and health of soybean crops. This information can inform decision-making processes, optimize resource allocation, and contribute to more efficient and sustainable soybean production.

Overall, the integration of aerial imagery, high-throughput phenotyping, and genotypic information in soybean breeding programs can enhance the efficiency and effectiveness of genetic improvement efforts. These technologies provide valuable insights into crop performance, assist in the selection of superior genotypes, and contribute to sustainable agricultural practices. Continued research and application of these tools are crucial for advancing soybean breeding and achieving higher yield and profitability in soybean production systems.

4 CONCLUSIONS

The vegetation indices Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (MPRI) exhibit a high correlation, enabling the use of both RGB and multispectral sensors for high-throughput phenotyping in assessing grain yield and powdery mildew severity in soybean crops in high-altitude tropical climates.

By employing high-throughput phenotyping techniques and analyzing the data obtained from these cameras, it becomes possible to accurately evaluate grain yield and

monitor the severity of powdery mildew in soybean crops. This information is essential for making informed decisions regarding crop management strategies, disease control measures, and yield optimization in soybean cultivation in tropical high-altitude regions.

There is no significant correlation between Asian soybean rust severity and the evaluated traits, as well as the vegetation indices MPRI and NDVI. This lack of correlation makes it challenging to employ aerial imagery for the quantification of *P. pachyrhizi* severity in tropical conditions.

The absence of a significant relationship between Asian soybean rust severity and the evaluated traits implies that other factors, such as genetic resistance or environmental conditions, may have a stronger influence on rust development and severity. Therefore, relying solely on aerial imagery and vegetation indices may not provide accurate and reliable information for quantifying Asian soybean rust severity in tropical environments.

REFERENCES

- ACQUAAH, G.; AL-KHAYRI, J. M.; JAIN, S. M.; JOHNSON, D. V. Conventional Plant Breeding Principles and Techniques. **Advances in Plant Breeding Strategies: Breeding, Biotechnology and Molecular Tools**, 2016. p. 115-158.
- ALLARD, R. W. Relationship Between Genetic Diversity and Consistency of Performance in Different Environments 1. **Crop Science**, v. 1, n. 2, p. 127-133, 1961.
- ALLARD, R. W.; BRADSHAW, A. D. Implications of genotype-environmental interactions in applied plant breeding 1. **Crop science**, v. 4, n. 5, p. 503-508, 1964.
- ALVES, V. M. **Fungicidas protetores no manejo da ferrugem da soja, processos fisiológicos e produtividade da cultura**. 2016. 99 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2016.
- AMARAL, R. G. **Competição intergenotípica em clones comerciais de Eucalyptus spp. e seleção para plantios multiclonais**. 2016. 58 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio De Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2016.
- ÁVILA, W.; PERIN, A.; GUARESCHI, R. F.; GAZOLLA, P. R. Influência do tamanho da semente na produtividade de variedades de soja. **Agrarian**, v. 1, n. 2, p. 83-89, 2008.
- BARROS, H. B.; SEDIYAMA, T.; SILVA REIS, M.; CECON, P. R. Efeito do número de aplicações de fungicidas no controle da ferrugem asiática da soja. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, n. 2, 2008.

BERTELSEN, J. R.; DE NEERGAARD, E.; SMEDEGAARD-PETERSEN, V. Fungicidal effects of azoxystrobin and epoxiconazole on phyllosphere fungi, senescence and yield of winter wheat. **Plant Pathology**, v. 50, n. 2, p. 190-205, 2001.

BOARD, J. E.; HARVILLE, B. G. A criterion for acceptance of narrow-row culture in soybean. **Agronomy Journal**, v. 86, n. 6, p. 1103-1106, 1994.

BONDE, M. R.; NESTER, S. E.; AUSTIN, C. N.; STONE, C. L.; FREDERICK, R. D.; HARTMAN, G. L.; MILES, M. R. Evaluation of virulence of *Phakopsora pachyrhizi* and *P. meibomia* isolates. **Plant Disease**, v. 90, n. 6, p. 708-716, 2006.

BOTELHO, F. B. S.; RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. D. F. B.; ROSA, H. J. A. Multiline as a Strategy to Reduce Damage Caused by *Colletotrichum lindemuthianum* in Common Bean. (Report). **Journal of Phytopathology**, v. 159, n. 3, p. 175, 2011.

CHAVES, M. M.; PEREIRA, J. S.; MAROCO, J.; RODRIGUES, M. L.; RICARDO, C. P. P.; OSÓRIO, M. L.; CARVALHO, I.; FARIA, T.; PINHEIRO, C. How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth. **Annals of botany**, v. 89, n. 7, p. 907-916, 2002.

CHILDS, S. P.; KING, Z. R.; WALKER, D. R.; HARRIS, D. K.; PEDLEY, K. F.; BUCK, J. W.; BOERMA, H. R.; LI, Z. Discovery of a seventh Rpp soybean rust resistance locus in soybean accession PI 605823. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 131, n. 1, p. 27-41, 2018/01/01 2018. ISSN 1432-2242.

COSTA, R. V.; ZAMBOLIM, L.; SILVA, D. D.; COTA, L. V.; CASELA, C. R. Utilização de multilinhas dinâmicas para o manejo da antracnose do sorgo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 2, p. 173-180, 2012.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 5. ed. Viçosa: UFV, 2012.

DIDELLOT, F.; BRUN, L.; PARISI, L. Effects of cultivar mixtures on scab control in apple orchards. **Plant Pathology**, v. 56, n. 6, p. 1014-1022, 2007.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FINOTO, E. L.; CARREGA, W. C.; SEDIYAMA, T.; DE ALBUQUERQUE, J. A. A.; CECON, P. R.; REIS, M. S. Efeito da aplicação de fungicida sobre caracteres agrônômicos e severidade das doenças de final de ciclo na cultura da soja. **Revista Agro@ mbiente On-line**, v. 5, n. 1, p. 44-49, 2011.

FRAC. Fungicide Resistance Action Committee. **Monitoring results and use recommendations available at**. 2018. Disponível em: < <http://www.frac.info/working-group/sdhi-fungicides/general-use-recommendations> >. Acesso em: 08 maiO 2019.

GESTEIRA, G. D. S.; BRUZI, A. T.; ZITO, R. K.; FRONZA, V.; ARANTES, N. E. Selection of early soybean inbred lines using multiple indices. **Crop Science**, v. 58, n. 6, p. 2494-2502, 2018.

GESTEIRA, G. D. S.; ZAMBIAZZI, E. V.; BRUZI, A. T.; SOARES, I. O.; REZENDE, P. M. D.; SILVA, K. B. Seleção fenotípica de cultivares de soja precoce para a região Sul de Minas Gerais. **Revista Agrogeoambiental**, v. 7, n. 3, 2015.

GODOY, C. V.; KOGA, L. J.; CANTERI, M. G. Diagrammatic scale for assessment of soybean rust severity. **Fitopatologia Brasileira**, v. 31, n. 1, p. 63-68, 2006.

GODOY, C. V.; SEIXAS, C. D. S.; SOARES, R. M.; MARCELINO-GUIMARÃES, F. C.; MEYER, M. C.; COSTAMILAN, L. M. Asian soybean rust in Brazil: Past, present, and future. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 5, p. 407-421, 2016.

JULIATTI, B. C. M. **Biochemical, physiological and epidemiological characterization of soybean genotypes (*Glycine max*) with partial resistance against soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi* Sydow & P. Sydow)**. 2018. 134 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitopatologia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

MILES, M. R.; BONDE, M. R.; NESTER, S. E.; BERNER, D. K.; FREDERICK, R. D.; HARTMAN, G. L. Characterizing resistance to *Phakopsora pachyrhizi* in soybean. **Plant Disease**, v. 95, n. 5, p. 577-581, 2011.

MUNDT, C. C. USE OF MULTILINE CULTIVARS AND CULTIVAR MIXTURES FOR DISEASE MANAGEMENT. **Annual Review of Phytopathology**, v. 40, n. 1, p. 381-410, 2002.

MUNDT, C. C. Durable resistance: a key to sustainable management of pathogens and pests. **Infection, Genetics and Evolution**, v. 27, p. 446-455, 2014.

National Aeronautics and Space Administration (Nasa). The Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Project. **Nasa power**, 2020. Available in: <<https://storymaps.arcgis.com/stories/52116d331ff64e468fe9351fc1c7642>>.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: ESALQ, 2009. p. 451.

RABOIN, L. M.; RAMANANTSOANIRINA, A.; DUSSERRE, J.; RAZASOLOFONANAHARY, F.; THARREAU, D.; LANNOU, C.; SESTER, M. Two-component cultivar mixtures reduce rice blast epidemics in an upland agrosystem. **Plant Pathology**, v. 61, n. 6, p. 1103-1111, 2012.

RESENDE, M. D. V. D.; DUARTE, J. B. Precision and Quality Control in Variety Trials. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 3, p. 182-194, 2007.

SCOTT, A.; KNOTT, M. Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. **Biometrics**, v. 30, p. 507-512, 1974.

SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. **Soja do Plantio à Colheita**. Viçosa: UFV, 2015. p. 333.

SILVA, A. J. D.; CANTERI, M. G.; SILVA, A. L. D. Haste verde e retenção foliar na cultura da soja. **Summa Phytopathologica**, v. 39, n. 3, p. 151-156, 2013.

SILVA, K. B.; BRUZI, A. T.; ZAMBIAZZI, E. V.; SOARES, I. O.; PEREIRA, J.; CARVALHO, M. L. M. Adaptability and stability of soybean cultivars for grain yield and seed quality. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 2, p. 1-15, 2017.

SOARES, I. O.; REZENDE, P. M. D.; BRUZI, A. T.; ZAMBIAZZI, E. V.; ZUFFO, A. M.; SILVA, K. B.; GWINNER, R. Adaptability of soybean cultivars in different crop years. **Genetics and Molecular Research**, v. 14, p. 8995-9003, 2015.

SOUZA, B. O.; CASELA, C. R.; NUNES, J. A.; CASTRO, H. A. Management of sorghum anthracnose through diversification of genetic resistance in host population. **Tropical Plant Pathology**, v. 38, n. 1, p. 20-27, 2013.

WARD, B. P.; GUEDIRA, G. B.; TYAGI, P.; KOLB, F. L.; VAN SANFORD, D. A.; SNELLER, C. H.; GRIFFEY, C. A. Multienvironment and multitrait genomic selection models in unbalanced early-generation wheat yield trials. **Crop Science**, v. 59, n. 2, p. 491-507, 2019.

YAMANAKA, N.; DA SILVA, D. C. G.; PASSIANOTTO, A. L. D. L.; NOGUEIRA, L. M.; POLIZEL, A. M.; PEREIRA, S. D. S.; DOS SANTOS, J. V. M.; BROGIN, R. L.; ARIAS, C. A. A.; HOFFMANN-CAMPO, C. B. **Identification of DNA markers and characterization of the genes for resistance against asian soybean rust**. Embrapa Soja (ALICE), 2008.

YAMANAKA, N.; LEMOS, N.; UNO, M.; AKAMATSU, H.; YAMAOKA, Y.; ABDELNOOR, R.; BRACCINI, A.; SUENAGA, K. Resistance to Asian soybean rust in soybean lines with the pyramided three Rpp genes. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 13, n. 1, 2013.

ZAMBIAZZI, E. V.; BRUZI, A. T.; ZUFFO, A. M.; SOARES, I. O.; BIANCHI, M. C.; DE CARVALHO, M. L. M.; GUILHERME, S. R.; DE CARVALHO, A. H. F.; MENDES, A. E.; MONTEIRO BORGES, I. M. Effects and management of foliar fungicide application on physiological and agronomical traits of soybean. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 2, p. 265, 2018.

ZAMBOLIM, L.; MOCHKO, A. C. R.; PARREIRA, D. F.; VALADARES, S. V. Potassium Fertilization Reduces the Severity of Asian Soybean Rust Under High Disease Pressure. **Journal Of Agricultural Science**, v. 11, n. 11, p. 116, 31 jul. 2019. Canadian Center of Science and Education.