

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
DOUTORADO EM GEOGRAFIA**

Ademir de Cássio Machado Peransoni

**SENSORIAMENTO REMOTO PARA IDENTIFICAR SOJA INFECTADA POR
FUNGOS CAUSADORES DA FERRUGEM ASIÁTICA**

Santa Maria, RS

2020

Ademir de Cássio Machado Peransoni

**SENSORIAMENTO REMOTO PARA IDENTIFICAR SOJA INFECTADA POR
FUNGOS CAUSADORES DA FERRUGEM ASIÁTICA**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Geografia do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Área de Concentração Análise Ambiental e Territorial do Cone Sul, da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Waterloo Pereira Filho

Santa Maria, RS

2020

Peransoni, Ademir de Cássio Machado
SENSORIAMENTO REMOTO PARA IDENTIFICAR SOJA INFECTADA
POR FUNGOS CAUSADORES DA FERRUGEM ASIÁTICA / Ademir de
Cássio Machado Peransoni.- 2020.
123 p.; 30 cm

Orientador: Waterloo Pereira Filho
Coorientador: Ricardo Silveiro Balardin
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Geografia e Geociências, RS, 2020

1. SENSORIAMENTO REMOTO 2. IDENTIFICAÇÃO DE
Phakopsora pachyrhizi - PERÍODO ASSINTOMÁTICO 3.
VARIÁVEIS BIOFÍSICAS (AGRONÔMICAS) 4. VARIÁVEIS
CLIMÁTICAS I. Pereira Filho, Waterloo II. Silveiro
Balardin, Ricardo III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Todos os direitos autorais reservados a Ademir de Cássio Machado Peransoni. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Email: ademirperansoni@unipampa.edu.br

Ademir de Cássio Machado Peransoni

**SENSORIAMENTO REMOTO PARA IDENTIFICAR SOJA INFECTADA POR
FUNGOS CAUSADORES DA FERRUGEM ASIÁTICA**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Geografia do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Área de Concentração Análise Ambiental e Territorial do Cone Sul, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Geografia**.

Aprovado em 20 de Março de 2020:

Waterloo Pereira Filho, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Ana Caroline Paim Benedetti, Dra. (UFSM)

Fábio Marcelo Breunig, Dr. (UFSM)

Lênio Soares Galvão, Dr. (INPE)

Tatiana Mora Kuplich, Dra. (INPE)

Santa Maria, RS, Brasil

2020

RESUMO

SENSORIAMENTO REMOTO PARA IDENTIFICAR SOJA INFECTADA POR FUNGOS CAUSADORES DA FERRUGEM ASIÁTICA

AUTOR: Ademir de Cássio Machado Peransoni

ORIENTADOR: Waterloo Pereira Filho

Desde a década de 1970 os instrumentos do sensoriamento remoto (SR) vêm sendo aplicados nas mais diversas áreas do conhecimento. Áreas como meio ambiente, monitoramento de áreas de produção agrícola, expansão territorial e ocupação/utilização do solo e das águas têm recorrentemente encontrado subsídios para seus trabalhos nos instrumentos do SR. Essa técnica se fundamenta na obtenção de informações por meio da interação da energia eletromagnética (REM) e os objetos alvos sem que haja contato físico. Atualmente tem havido um expressivo número de trabalhos científicos voltados à busca por relações entre características específicas da vegetação e as respostas espectrais ao longo do espectro eletromagnético. A vista disso a presente tese teve por objetivo geral identificar feições espectrais associadas a fase pré-sintomática de lavouras de soja infectadas por *Phakopsora pachyrhizi*. Para tanto, três objetivos específicos foram estipulados: 1) verificar as condições climáticas associadas a ocorrência da ferrugem asiática; 2) identificar as características biofísicas do sistema epidêmico nas fases pré-sintomática e sintomática; 3) caracterizar o comportamento espectral da soja por espectrorradiometria a fim de detectar de alterações de refletância decorrentes da ocorrência do fungo *Phakopsora pachyrhizi*. Os experimentos foram conduzidos nas dependências do Instituto Phytus - Itaara-RS, instituição parceira do LabGeotec-UFSM. As atividades se desenvolveram concomitantemente nas áreas de campo e em duas casas de vegetação. Inicialmente foram disponibilizadas duas áreas de soja (total de 300m²) divididos em dois talhões com dimensões de 150 m² cada. Os talhões e as duas casas de vegetação foram denominados P01 e P03, sendo P01-infectado sem nenhum tratamento químico e o P03-Livre área previamente tratada. Os dados hiperespectrais foram coletados a campo com o uso de um espectrorradiômetro *Field Spec 3* (entre 400 a 900 nm) sobre o dossel da soja e em casas de vegetação sobre as folhas das plantas de soja ali condicionadas com o auxílio do aparato *Probe Leaf*. As variáveis biofísicas (clorofila "b"-Chl"b", índice de área foliar (IAF), Biomassa e Número de esporos do fungo) foram coletadas a campo e nas casas de vegetação e processadas em laboratório por meio de métodos destrutivos consolidados pela literatura. A análise geral das variáveis climáticas nos permitiu concluir que as condições ambientais foram favoráveis durante o período de cultivo da soja nas áreas de estudo, o intervalo que precedeu a infecção durante a amostragem registrou temperaturas médias entre 17 e 28°C, com melhores faixas de crescimento entre 21 e 26 °C, UR acima de 80% associada a precipitações moderadas (em torno de 20mm) e tempo de molhamento foliar entre 5 a 10 horas. Os resultados registrados pelas variáveis biofísicas (Chl"b", Biomassa, IAF) e o incremento de esporos na atmosfera apontam para condições predisponentes que viabilizaram o processo de infecção pela ação do fungo *Phakopsora pachyrhizi* e permitiram a ocorrência da doença. O uso do sensoriamento remoto hiperespectral possibilitou caracterizar o comportamento espectral da soja por espectrorradiometria bem como detectar de alterações de refletância decorrentes da ocorrência do fungo *Phakopsora pachyrhizi* no período assintomático.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, *Phakopsora pachyrhizi*, período Assintomático.

ABSTRACT

REMOTE SENSING TO IDENTIFY SOY INFECTED BY FUNGI CAUSING ASIAN RUST

AUTHOR: Ademir de Cássio Machado Peransoni

ADVISOR: Waterloo Pereira Filho

Since the 1970s, remote sensing (SR) instruments have been applied in the most diverse areas of knowledge. Areas such as the environment, monitoring of agricultural production areas, territorial expansion and occupation / use of soil and water have repeatedly found subsidies for their work in the SR instruments. This technique is based on obtaining information through the interaction of electromagnetic energy (REM) and target objects without physical contact. Currently, there has been an expressive number of scientific studies aimed at the search for relationships between specific characteristics of vegetation and spectral responses along the electromagnetic spectrum. In view of this, the present thesis had the general objective of identifying spectral features associated with the pre-symptomatic phase of soybean crops infected by *Phakopsora pachyrhizi*. For that, three specific objectives were stipulated: 1) to verify the climatic conditions associated with the occurrence of Asian rust; 2) to identify the biophysical characteristics of the epidemic system in the pre-symptomatic and symptomatic phases; 3) to characterize the spectral behavior of soybeans by spectroradiometry in order to detect changes in reflectance resulting from the occurrence of the fungus *Phakopsora pachyrhizi*. The experiments were conducted on the premises of the Phytus Institute - Itaara-RS, a partner institution of LabGeotec-UFSM. The activities were carried out concurrently in the countryside areas and in two greenhouses. Initially, two soybean areas (total of 300m²) were made available, divided into two plots measuring 150 m² each. The plots and the two greenhouses were named P01 and P03, P01 being infected without any chemical treatment and P03-Free previously treated area. Hyperspectral data were collected in the field using a Field Spec 3 spectroradiometer (between 400 to 900 nm) on the soybean canopy and in greenhouses on the leaves of the soybean plants conditioned there with the aid of the Probe Leaf apparatus. The biophysical variables (chlorophyll "b" - Chl "b", Foliar area index (IAF), Biomass and Number of spores of the fungus) were collected in the field and in greenhouses and processed in the laboratory using destructive methods consolidated by literature. The general analysis of the climatic variables allowed us to conclude that the environmental conditions were favorable during the soybean cultivation period in the study areas, the interval that preceded the infection during the sampling registered average temperatures between 17 and 28°C, with better growth ranges between 21 and 26 °C, RH above 80% associated with moderate rainfall (around 20mm) and leaf wetting time between 5 to 10 hours. The results recorded by the biophysical variables (Chl "b", Biomass, IAF) and the increase in spores in the atmosphere point to predisposing conditions that enabled the infection process by the action of the fungus *Phakopsora pachyrhizi* and allowed the disease to occur. The use of hyperspectral remote sensing made it possible to characterize the spectral behavior of soy by spectroradiometry as well as to detect changes in reflectance resulting from the occurrence of the fungus *Phakopsora pachyrhizi* in the asymptomatic period.

Keywords: Remote Sensing, *Phakopsora pachyrhizi*, Asymptomatic period.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Plataformas do sensoriamento remoto.....	22
Figura 2 -	Região do visível do espectro eletromagnético.....	26
Figura 3 -	Curva média da vegetação fotossinteticamente ativa.....	27
Figura 4 -	Evolução das áreas plantadas com soja no Brasil nas safras 2017/2018 e 2018/2019.....	33
Figura 5 -	Produção percentual por mês de soja no Brasil nas safras 2017/2018 e 2018/2019.....	34
Figura 6 -	Folha da soja infectada por <i>Phakopsora pachyrhizi</i>	35
Figura 7 -	Área de soja infectada por <i>Phakopsora pachyrhizi</i>	36
Figura 8 -	Localização geográfica do município de Itaara-RS.....	39
Figura 9 -	Croqui da área de estudo.....	40
Figura 10-	Áreas de campo e casa de vegetação.....	41
Figura 11-	Fluxograma da Pesquisa.....	42
Figura 12-	Estação meteorológica (a), controle de pluviosidade/umidade (b, c), comando geral das funções (d).....	43
Figura 13-	Coletor de esporos (a, b) – microscópio óptico (c).....	44
Figura 14-	Espectrofotômetro (a) – Balança de Precisão (b).....	47
Figura 15-	Espectroradiômetro (a, d) - Probe Clip (b) – GPS (c).....	50
Figura 16-	Condições gerais do clima durante o ciclo de vida do <i>Phakopsora pachyrhizi</i>	56
Figura 17-	Condições de vento e número de esporos presentes na atmosfera de novembro/2018 a fevereiro de 2019.....	58
Figura 18-	Variações da temperatura, umidade relativa e precipitação em novembro/2018.....	59
Figura 19-	Variações da temperatura, umidade relativa e precipitação em dezembro/2018.....	60
Figura 20-	Variações da temperatura, umidade relativa, precipitação e tempo de molhamento foliar de janeiro/2019.....	62
Figura 21-	Variações da temperatura, umidade relativa, precipitação e tempo de molhamento foliar de fevereiro/2019.....	63
Figura 22-	Esporos vistos ao microscópio óptico.....	67
Figura 23-	Número de Esporos obtido no coletor.....	69
Figura 24-	Índice de Clorofila “b” obtidos nas áreas de estudo ao longo das campanhas.....	70
Figura 25-	Índices de Biomassa registrados nas áreas de estudo a longo das campanhas.....	72
Figura 26-	Índices de área foliar (IAF) registrados nas áreas de estudo.....	73
Figura 27-	Valores de clorofila extraídos nas casas de vegetação.....	74
Figura 28-	Refletância espectral da soja (Dossel) – 27/12/2018 a 08/01/2019.....	77
Figura 29-	Refletância espectral da soja (Dossel) –14/01/2019 a 29/01/2019.....	79
Figura 30-	NDVI registrado durante as campanhas nas áreas de estudo.....	83
Figura 31-	Índice de diferença normalizada obtido durante as campanhas.....	85

Figura 32- Valores da diferença normalizada de borda vermelha (Red Edge-NDVI)	86
Figura 33- Representação dos diagramas de dispersão para cada área de estudo.....	91
Figura 34- Acessório <i>Probe</i> e com aparato <i>Leaf Clip</i>	94
Figura 35- Refletância Espectral da soja – Casa de Vegetação – 08/01/2019 – 09/01/2019.....	96
Figura 36- Refletância Espectral da soja – Casa de Vegetação – 11/01/2019 – 14/01/2019.....	98
Figura 37- Refletância Espectral da soja – Casa de Vegetação – 18/01/2019 – 22/01/2019.....	100
Figura 38- Refletância Espectral da soja – Casa de Vegetação – 23/01/2019 – 24/01/2019.....	101
Figura 39- Refletância Espectral da soja – Casa de Vegetação – 25/01/2019 – 29/01/2019.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Matriz de correlação entre NDVI e variáveis biofísicas em P01- Infectada.....	88
Tabela 2	Matriz de correlação entre NDVI e variáveis biofísicas em P03-Livre.....	89
Tabela 3	Correlação entre NDI e reNDVI com variáveis biofísicas (P01-Infectada e P03-Livre).....	93

LISTA DE ABREVIATURAS

CCS – Cartografia Assistida por Computador
CAD – Designer Assistido por Computador
CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento
Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GNSS – Sistema Global de Navegação por Satélite
GPS – Sistema Global de Posicionamento
HPMI – Histórico da Prefeitura Municipal de Itaara
IAF – Índice de Área Foliar
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IV – Índice de Vegetação
DVI - Difference vegetation index
LABGEOTEC – Laboratório de Geotecnologias
LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite
LIF - Leaf Induced Fluorescence
LNC – Leaf Nitrogen Content
MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSI - Multispectral Instrument
MSS - Multispectral Scanner System
NASA - National Aeronautics Space Administration
NDVI – Normalized Difference Vegetation Index
NIR – Near Infra Red e/ou Infravermelho próximo
OLI - Operational Land Imager
PDI – Processamento Digital de Imagem
PMS/g – Peso de Massa Seca por Grama
PPDI - Projeto do Plano Diretor de ITAARA
ReDSI - Red Edge Disease Stress Index
ReNDVI - Red Edge Normalized Difference Vegetation Index
REM – Radiação Eletromagnética
RSR - Relative Spectral Response
SAFY - Simple Algorithm for Yield Estimates

SAVI - Índice de Vegetação Ajustado por Solo
SIG – Sistema de Informações Geográficas
SLA - variação sazonal da área foliar específica
SR – Sensoriamento Remoto
TM - Thematic Mapper
TRC – Teor Relativo de Clorofila

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1	Tema.....	19
1.2	Problema da Pesquisa.....	19
1.3	Hipótese.....	19
1.4	Objetivo Geral.....	19
1.5	Objetivo Específico.....	20
1.6	Justificativa.....	20
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	Sensoriamento Remoto e Análise da Vegetação Agrícola.....	22
2.2	Soja e a Ferrugem Asiática: importância, sintomas e controle.....	33
3.	METODOLOGIA	38
3.1	Caracterização da Área de Estudo.....	38
3.2	Material e Procedimentos Metodológicos.....	39
3.2.1	Coleta de Dados Meteorológicos.....	42
3.2.2	Coleta de Dados das Variáveis Biofísicas.....	44
3.2.3	Coleta de Dados Espectrais.....	49
3.2.4	Método de Análise dos Dados Espectrais.....	51
4.	RESULTADOS	55
4.1	Influência dos Elementos do Clima no Sistema Epidêmico da Ferrugem Asiática.....	55
4.2	Registro das Variáveis Biofísicas.....	66
4.3	Espectros de Refletância do Dossel Obtidos a Campo.....	75
4.4	Avaliação da Soja com Aplicação de Índices de Vegetação Espectral.....	82
4.5	Testes de Correlação Linear entre os Índices de Vegetação Espectral (dossel) e as Variáveis Biofísicas.....	87
4.6	Espectros de Refletância Obtidos à Folha nas Casas de Vegetação – <i>Probe Leaf Clip</i>	93
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
6.	REFERÊNCIAS	107

1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 1970 os instrumentos do sensoriamento remoto (SR) vem sendo aplicados nas mais diversas áreas do conhecimento. A ciência encontrou nessa ferramenta a possibilidade de desenvolver atividades de pesquisa de forma rápida e eficaz com um custo relativamente baixo. Áreas como meio ambiente, monitoramento de áreas de produção agrícola, expansão territorial e ocupação/utilização do solo e das águas têm recorrentemente encontrado subsídios para seus trabalhos nos instrumentos do SR, Formaggio e Sanches (2017).

O sensoriamento remoto se fundamenta na obtenção de informações por meio da interação da energia eletromagnética (REM) e os objetos alvos sem que haja contato físico. O processo que envolve a aquisição de dados espectrais é realizado por sensores e equipamentos a bordo de aeronaves e satélites ou por espectrorradiômetros de campo, responsáveis por registrar, processar e transmitir dados oriundos da interação da REM com os objetos da superfície terrestre, Novo (2010). Desse modo, o produto do sensoriamento remoto exhibe feições espectrais intrínsecas de uma espécie de matéria (como por exemplo: solo, água, vegetação) dadas pelas porções das curvas de refletância em determinado comprimento de onda, cujas características são próprias do objeto de estudo. Esta relação objeto/sensor leva em consideração a incidência da REM sobre determinada matéria e, por meio do registro de espalhamento e/ou absorção da radiação eletromagnética, indica a presença de características específicas do alvo tal como uma assinatura, Novo (2010); Boechat (2012); Kuplich et al. (2016).

Nesse contexto, a obtenção de dados por meio da relação da REM/alvo aponta para possibilidades promissoras em diversas frentes de pesquisas vinculadas ao SR. Dentre estas, podemos citar o uso sustentável dos recursos naturais, monitoramento e previsão de mudanças climáticas, de safras e produção, planejamento urbano e degradação do meio ambiente. Estas são áreas que frequentemente estão entre as principais preocupações de vários cientistas no mundo inteiro. Diante disso, o SR passou a ser largamente empregado nas últimas décadas pela possibilidade de um rápido monitoramento voltado a avaliação de variáveis ambientais e de múltiplos fatores relacionados com as atividades humanas. Os temas acima, de grande complexidade e relevância, necessitam cada vez mais de métodos de monitoramento sistemático e sinóptico. Nesse sentido, o SR ganha destaque pois trata-se de uma

importante ferramenta para a análise e controle dessas questões, Shimabukuro et al. (2009); Boechat (2012); Choa et al. (2012).

No Brasil, as atividades iniciais voltadas ao emprego de técnicas do sensoriamento remoto nos estudos da vegetação têm seus primeiros registros na década de 1970 com os mapeamentos temáticos efetivados nesse período. Tais atividades tiveram início com as fotografias aéreas e um ícone desses trabalhos foi o projeto RandamBrasil, que visava representar espacialmente estudos sobre meio ambiente, recursos naturais e explicitar as classes fisionômicas da cobertura vegetal de todo o território brasileiro. A consolidação desse instrumento como uma tecnologia de uso nacional passa pelas ações do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE - que projetou o Brasil como a nação pioneira no hemisfério sul a dominar essa tecnologia, Meneses e Almeida, (2012); Ponzoni et al. (2012).

Paralelamente a esse período, os norte-americanos desenvolviam um projeto gerenciado pela National Aeronautics and Space Administration - NASA que deu início a série de satélites LANDSAT a qual entrou em atividade em 1972. O sistema LANDSAT foi o primeiro a obter imagens terrestres sinópticas de média resolução. Inicialmente os satélites eram equipados com os sensores Multiespectral Scanner System (MSS). Esses sensores tinham a capacidade de obter imagens separadas em bandas espectrais em formato digital, com período de revista de 18 dias em uma faixa de cobertura de aproximadamente 185km, Figueredo, (2005); Salles; Valério e Florenzano, (2016).

Em meados da década de 1980, no Brasil, iniciaram algumas atividades de mapeamento de classes específicas da cobertura vegetal incluindo culturas agrícolas com grande importância econômica, como feijão, milho e cana-de-açúcar. A partir dos anos de 1990 intensificam-se as atividades de pesquisas com sensoriamento remoto da vegetação agrícola que até então desenvolviam abordagens de cunho fundamentalmente qualitativo, passou-se executar múltiplos trabalhos com ênfase quantitativa. As primeiras atividades passaram a buscar novas perspectivas e visavam explorar, por exemplo, correlações entre parâmetros biofísicos da vegetação, como índice de área foliar (IAF) e biomassa, relacionando-os aos dados extraídos de imagens orbitais, Epiphanyo et al. (1996); Moreira, Adami e Rudorff, (2004); Ponzoni et al. (2012); Silva et al. (2014).

Nesse cenário, a delimitação de um único alvo na elaboração de um estudo possibilita uma observação mais detalhada de sua dinâmica espectral quando

observado por diferentes sensores. Essa característica de pesquisa é oportuna, tendo em vista que atualmente várias investigações estão vinculadas ao processamento de dados envolvem a análise de um único alvo presente na imagem, Boyd e Danson (2005); Anderson et al. (2011); Berra et al. (2014). Assim, a integração de diferentes tipos de dados de sensoriamento remoto obtidos em multiescala, com vistas ao monitoramento de culturas agrícolas é crescente, recentemente áreas infectadas por fitopatógenos passaram a ser alvos das mais variadas pesquisas. Isso ocorre devido à grande quantidade de informações obtidas por intermédio de plataformas terrestres e orbitais as quais disponibilizam produtos radiométricos oriundos de fontes vinculadas a agricultura, Usha et al. (2013).

Nesse contexto, a crescente expansão de áreas cultivadas de soja no mundo produziu um aumento significativo no número de pesquisa com o efetivo emprego do sensoriamento remoto a fim de avaliar a gravidade de doenças que atingem este cultivo. Nessa cultura, mais de 100 espécies de patógenos já foram descritos, destes 35 tem grande importância econômica. Diversas doenças fúngicas têm afetado consistentemente o desenvolvimento da soja e uma doença de grande relevância e complexidade tem se destacado, é a ferrugem asiática causada por *Phakopsora pachyrhizi*, Andrade et al. (2002); Godoy et al. (2006); Alves, (2012).

Esta doença foi identificada em 1903 no Japão, é o primeiro registro de que se tem notícia, nos demais países da Ásia foram registrados focos em 1934 e na Índia em 1951. Nos países norte-americanos surgiu primeiramente no Havaí em 1994 nos Estados Unidos, e nas regiões africanas, apenas a partir de 1996 atingindo a Zâmbia e o Zimbábue em 1998, Nigéria em 1999, Moçambique em 2000 e a África do Sul em 2001. Nos países da América latina foi identificada primeiramente no Paraguai, onde emergiu em meados de 2000/01 e na Argentina em 2002, Nunes Junior et al. (2003). Na mesma fração de tempo (2001/2002), a doença é identificada em lavouras Rio Grande do Sul e Mato Grosso e se espalha em praticamente todas as regiões brasileiras produtoras da de soja. Assim, a ferrugem da soja passou a representar uma ameaça com potencial de produzir um aumento significativo de custos de produção com prejuízos causados pela necessidade do seu controle, Hartman et al. (2015); Embrapa, (2018).

Nesse sentido, Trabaquini et al. (2015) relatam que é explícito a necessidade de ter aportes tecnológicos específicos com relativa eficiência e finalidade de monitorar os diversos aspectos da agricultura. Essa posição visa tornar mais eficientes

e racionais os modos de produção a fim de atender as várias demandas, principalmente em termos de estratégias de suprimento e sustentabilidade ambiental. Assim, a agricultura se depara com questões específicas que a leva a necessidade de um monitoramento frequente com temporalidade relativamente alta.

Atzberger et al. (2011) aponta que as minúcias do processo de produção agrícola favorecem o uso do sensoriamento remoto em relação a outros meios de obtenção e fornecimento de informações, tendo em vista que essas atividades estão estritamente relacionadas às características vinculadas à paisagem física. Tais minúcias dos processos de produção agrícola estão ligadas a fortes padrões sazonais relacionados aos ciclos biológicos, condições de solo, de águas, de crescimento, pragas e fitopatologias. Essas características, intrínsecas as dinâmicas de plantio/produção, afetam os tomadores de decisão desde fazendeiros, comerciantes até governantes. Usha et al. (2013) relatam que embora muitos desses fatores prejudiquem consistentemente o desenvolvimento de cultivares agrícolas, principalmente os comerciais como soja, milho, trigo e aveia, ainda são incipientes trabalhos voltados a correlacionar fatores biofísicos e suas respostas espectrais.

Deste modo, os aparatos do SR são provavelmente os melhores e mais efetivos meios em termos de custo – benefício, para coleta de informações de maneira confiável e eficiente, a fim de se detalhar características específicas de áreas que possuem a necessidade de elevada frequência de revista. Nessa visão, o SR tem a forte e emergente possibilidade de contribuir de modo relevante no provimento de dados adequados e precisos sobre a agricultura. Expor informações exatas e em tempo hábil sobre os processos de plantio/produção agrícola é de primordial importância para que os gestores possam desenvolver estratégias referentes à forma de plantio, produção, colheita, armazenamento, transporte e comercialização, Brandão, (2008); Shimabukuro et al. (2009); Shiratsuchi, (2014); Atzberger et al. (2015).

Diante o exposto a presente tese está estruturada em seis capítulos, o primeiro capítulo apresenta introdução, nela estão contidas as ideias iniciais que expõe o tema, o problema, os objetivos e a justificativa. Neste capítulo estão acentuados os motivos e a importância do estudo. O segundo capítulo apresenta o referencial teórico que traz um delineamento entre atividades de pesquisas já efetivadas com ferramentas do sensoriamento remoto, bem como as possibilidades e perspectivas identificadas em estudos prévios nessa área de atuação científica.

No terceiro capítulo explicita a metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa, a qual teve uma abordagem quantitativa. O quarto capítulo demonstra os resultados das atividades desenvolvidas a campo e nas casas de vegetação, o quinto capítulo consta as considerações finais e o sexto os referenciais.

1.1 Tema

Nos últimos anos tem havido um aumento no número de trabalhos científicos voltados a identificação das relações entre dados biofísicos e as respostas espectrais apresentadas pela vegetação ao longo do espectro eletromagnético. Essas atividades visam frequentemente auxiliar nos processos de produção por meio do emprego efetivo de técnicas de precisão. A vista disso, a presente tese tem por tema a verificação de feições espectrais como auxílio na identificação de áreas infectadas por fungos causadores da ferrugem asiática em lavouras de soja.

1.2 Problema de Pesquisa

O problema da pesquisa emerge da seguinte questão: quais as regiões do espectro eletromagnético permitem detectar as alterações de refletância decorrentes da ocorrência do fungo *Phakopsora pachyrhizi* no período assintomático.

1.3 Hipóteses

O presente trabalho tem por hipótese que o uso do sensoriamento remoto hiperespectral permite a identificação do fungo *Phakopsora pachyrhizi* em lavouras de soja, durante o período assintomático.

1.4 Objetivos Geral

A tese teve por objetivo geral identificar feições espectrais associadas a fase pré-sintomática de lavouras de soja infectadas por fungos causadores da ferrugem asiática.

1.5 Objetivos Específicos

- a) Verificar as condições climáticas associadas a ocorrência da ferrugem asiática;
- b) Identificar as características biofísicas do sistema epidêmico nas fases pré-sintomática e sintomática;
- c) Caracterizar o comportamento espectral da soja por espectrorradiometria a fim de detectar de alterações de refletância decorrentes da ocorrência do fungo *Phakopsora pachyrhizi* no período assintomático.

1.6 Justificativa

Atualmente grande parte dos países do mundo enfrentam consideráveis desafios na agricultura, geralmente vinculados às pressões por aumento de produção e para a expansão das áreas de terras agrícolas disponíveis para o plantio de insumos alimentícios. Os referidos desafios sofrem influências das mudanças climáticas, eventos naturais catastróficos, pragas, fitopatologias, restrições na disponibilidade de água para produção de alimentos (aumento da demanda hídrica) e de bioenergia, Guimarães e Landau, (2015); Peter et al. (2017); Formaggio e Sanches, (2017). Todos esses entraves colaboram entre si para efetivação da necessidade de se gerar dados confiáveis e seguros para o monitoramento e previsão de diversos eventos nos processos de plantio/colheita. Os dados de SR permitem avaliar com adequada antecipação as variações nos procedimentos de plantio, manejo e colheita nos diferentes seguimentos da agricultura Marchiorato, (2008); Oliveira, (2015).

Consoante Kunal et al. (2015), as ferramentas dos sistemas de informações têm a possibilidade de serem utilizáveis tanto em campo quanto no escritório da fazenda para análises das condições gerais das atividades agrícolas. Segundo o autor, esses sistemas estão desempenhando crescente e significativo papel na agricultura mundial, isso ocorre porque os fazendeiros obtêm informações que auxiliam no gerenciamento dos recursos relativos ao manejo, plantio, colheita, visando aumentar a produtividade, a economia de água, proteger o meio ambiente, reduzir os custos e trabalhar as terras agrícolas de maneira cada vez mais eficaz.

Nesse contexto, justificou-se a implementação desta investigação a fim de avaliar quais as regiões do espectro eletromagnético permitem detectar as alterações de refletância decorrentes da ocorrência do fungo *Phakopsora pachyrhizi* causador da

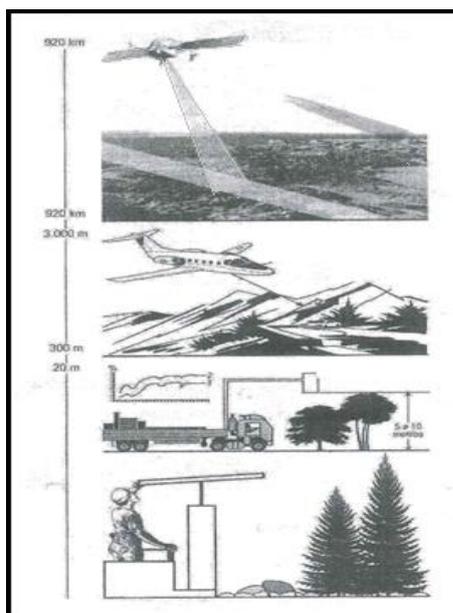
ferrugem asiática em lavouras de soja (intervalo assintomático). Tal avaliação almejou auxiliar gestão adequada de recursos (economia de tempo, insumos agrícolas e aplicações de fungicidas) com relação aos processos envolvidos na produção.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sensoriamento Remoto e Análise da Vegetação Agrícola.

Segundo Novo (2010); Florenzano (2011) o sensoriamento remoto (SR) é uma ferramenta que permite a identificação de eventos, processos e fenômenos que ocorrem na superfície terrestre a partir da análise e registro das interações entre a energia eletromagnética (REM) e as substâncias que integram os objetos em suas manifestações. Nesse sentido Pereira Filho (2014) declara que o termo “Sensoriamento Remoto” pode ser considerado como o uso de imagem de satélite para visualização da superfície da terra, representando nos dias atuais consistente avanço tecnológico nas áreas de abrangência da Geografia. O autor destaca ainda, que em função das características radiométricas, de resolução espacial, espectral e temporal, o SR amplia as possibilidades de abordagens voltadas aos estudos dos fenômenos naturais. Vale salientar que a interpretação, a análise e o processamento desses dados também integram o sensoriamento remoto, Rosa (2009). A Figura 1 possibilita a visualização de algumas plataformas usadas pelos instrumentos de sensoriamento remoto.

Figura 1 – Plataformas de sensoriamento remoto



Nesse cenário, o SR determina contribuições notáveis para áreas como a física atômica, química e biologia molecular. Essa técnica em muito tem contribuído para o desenvolvimento do conhecimento acerca da estrutura da matéria. Tais atividades se fundamentam no fato que as variações na composição da matéria podem causar modificações nas curvas espectrais causando-lhes alterações posição e na forma. Deste modo, mudanças na estrutura de objetos podem resultar em diferentes modos de interação alvo/REM, expondo assim, em grande parte dos elementos encontrados na natureza, assinaturas espectrais específicas portadoras de informações de interesse, Onório e Seixas, (2010); Nascimento, (2015).

A vista disso, o sensoriamento remoto tornou-se uma ferramenta advinda do desenvolvimento. Com o surgimento dos sensores remotos e por estes permitirem medições em laboratório ou campo, a partir da década de 1970 emergiu uma importante linha de pesquisa para tipificação, definição e/ou qualificação de estruturas pela sua energia refletida, Demattê (2014). Segundo o autor os instrumentos do sensoriamento remoto com melhor resolução espectral abriram um leque de perspectivas para diversas aplicações, inclui-se nestas, o estudo de cultivares, da vegetação, do solo e das águas.

Nesse contexto, o SR é atualmente um importante instrumento utilizado pela Geotecnologia para prover informações sobre a composição química, física e biológica de vegetais, rochas e minerais, Jensen (2009). Por esse motivo, pesquisadores como Breunig et. al., (2009); Jensen (2009); Rosa (2009); Shimabukuro et al. (2009); Galvão et al. (2011); Ponzoni et al. (2012); Pereira Filho (2014); Oliveira (2015); Kuplich et al. (2016); Salles, Valério e Florenzano (2016); Peter et al. (2017); Formaggio e Sanches (2017); Lima et al. (2017); dentre outros, frequentemente recorrem às ferramentas do sensoriamento remoto a fim de criarem novos recursos para bibliotecas espectrais que fornecessem subsídios para a manutenção e aplicação dos usos de Sistemas de Informação Geográficos (SIG).

Em face disso, as investigações têm sido implementadas pelo efetivo emprego do sensoriamento remoto, Fiorio (2010) buscou identificar técnicas que pudessem auxiliar em levantamentos pedológicos, esse trabalho utilizou as refletâncias orbitais adquiridas por meio de imagens de TM-Landsat-5 para os pontos que foram determinados para amostragem. Esse procedimento possibilitou avaliar e diferenciar solos por meio de dados espectrais obtidos em laboratório e orbitais. Zhang et al. (2003) fez uso de dados hiperespectrais para detecção de agentes causadores de

doenças na cultura de tomate, a região em estudo no espectro eletromagnético foi a região do visível e infravermelho próximo. Segundo o autor essa é uma região espectral favorável para discriminar plantas saudáveis e infectadas, visto que plantas em condições debilitadas de crescimento e/ou estresse, sofrem alterações na estrutura interna de suas folhas determinando assim feições espectrais específicas. Tal afirmação acorda com Jensen (2009) quando o autor declara que as variações nos mecanismos de absorção e dispersão da radiação electromagnética incidente no visível (vermelho) e infravermelho próximo são resultados da diminuição na clorofila e alterações na estrutura interna das folhas.

Nesse sentido, há tempos cientistas vêm empenhando esforços a fim de desenvolver tecnologias que auxiliem nos processos de produção e controle dos diversos aspectos que podem interferir nas atividades de produção agrícola. Alguns trabalhos precederam o atual cenário do (SR), dentre vários, podemos citar Heald et al. (1972) no momento em que fizeram uso da fotografia Color Infrared (CIR) a fim de estimar áreas infectadas pela podridão radicular do algodão (*Phymatotrichum omnivorum*). Lorenzen e Jensen (1989) buscaram identificar oídio em folhas de cevada utilizando o espectro de refletância. Eles descobriram que a refletância espectral entre 400 e 1100 nm de folhas resistentes inoculadas (10 dias após a inoculação) foi significativamente maior do que em plantas controle. Sasaki et al. (1998) adotou esse mesmo procedimento, por meio da inspeção da refletância foliar do pepino, para distinguir folhas de pepino saudáveis de folhas doentes. Em laboratório, Peterson e Aylor (1995) descobriram que pontos de emissão de alta refletância correspondiam às áreas onde a infecção da ferrugem ocorria nas folhas do feijão. Os autores também observaram mudanças significativas na fluorescência da clorofila, as quais precedem (3 a 5 dias) os primeiros sintomas visuais.

Nesse contexto, a análise das curvas espectrais permite identificar diferentes características entre objetos e possibilita discriminar materiais de distinta composição. Desse modo, as feições espectrais de um alvo correspondem às porções das curvas de reflectância em determinado comprimento de onda, com formas e intensidade muito bem definidas e próprias do objeto em estudo. Assim, a interação da radiação eletromagnética com materiais como, por exemplo, as folhas de vegetais verdes, dependem de fatores como suas características físicas, químicas e fitossanitárias. Com isso, reflexão, transmissão e absorção, características espectrais da matéria,

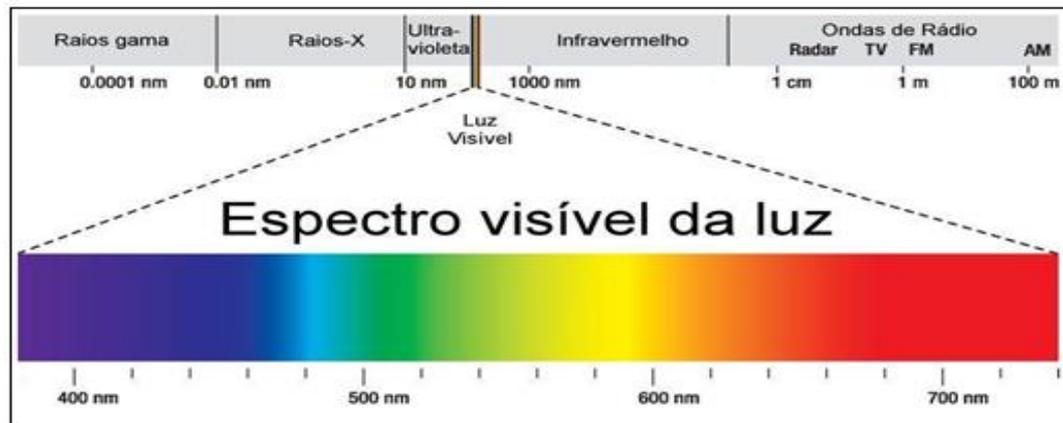
podem variar conforme a espécie em estudo, Meneses e Neto (2001); Carriello et al. (2003); Moreira et al. (2004).

Nesse sentido, as propriedades espectrais de refletância, transmitância e absorvância em vegetais estão fortemente vinculadas à presença de pigmentos fotossintetizantes existentes na folha. De modo geral, quanto maior a presença de pigmentos, maior será a absorvância e, por conseguinte, a refletância e a transmitância apresentarão valores mais baixos (vegetação saudável), Marchiorato (2008); Guendouz, Badri e Hafsi (2012). A vista disso algumas propriedades espectrais notáveis são expressas na região do visível, Figura 2, (400 a 700 nm). Segundo os autores, nessa região do espectro podem ser percebidas feições que apresentam características intrínsecas da interação da REM com os pigmentos foliares.

Dessa forma, tal relação é possível devido ao fato de que a REM é uma forma de energia dinâmica que possui como um dos seus modos de manifestação a inter-relação com objetos em que incide. A energia é o meio pelo qual toda informação é carregada do alvo ao sensor. Assim, para avaliar as propriedades espectrais da vegetação, a refletância assume um papel de destaque em estudos que visam analisar essa dinâmica (REM/vegetação/sensor). Essa propriedade é uma característica intrínseca de cada alvo e graças às diferenças de refletância entre eles é que podemos separá-los, é uma relação entre fluxo de radiação refletido e fluxo incidente, é portanto, uma medida que varia de 0 a 100% ou de 0 a 1 em medidas relativas, Jansen (2009); Rosa, (2009); Fiorio (2010).

Neste cenário, um dos resultados possíveis da interação REM/alvo/ sensor é a denominada refletância de superfície, ou seja, assume-se que a refletância resultante, refere-se a estimadores da refletância bidirecional dos objetos presentes na superfície terrestre, sendo possível por esse meio sua caracterização espectral, Novo (2010); Peltoniemi, Gritsevich, e Puttonen, (2015). Em acordo, Formaggio e Sanches (2017) relatam que, pelas características mencionadas anteriormente, o sensoriamento remoto tem se mostrado um instrumento tecnológico que apresenta vários recursos para o monitoramento da agricultura, principalmente no que se refere às estimativas de parâmetros biofísicos de interesse, usados dentre outras possibilidades para modelos agrometeorológicos. A Figura 2 apresenta a região do visível do espectro eletromagnético, área do espectro mais sensível às interações com a vegetação.

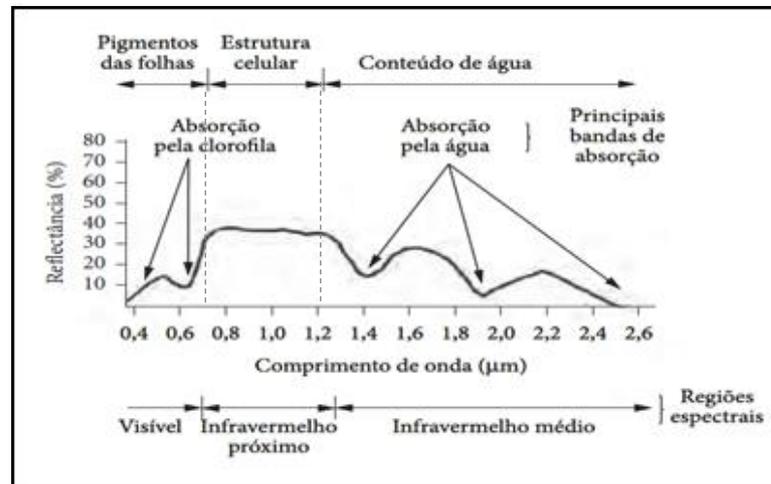
Figura 2 - Região do visível do espectro eletromagnético



Fonte: Adaptado de Figueredo (2005).

Segundo os autores supracitados, na região do azul há absorção, essa mesma característica é explícita na região do vermelho, loco em que a energia eletromagnética também sofre considerável absorção devido a maior presença de pigmentos fotossintéticos que aportam essas duas regiões. Entretanto, na região do verde a presença da clorofila existentes nas folhas determina maior refletância o que faz com que maior parte da (REM) seja refletida para o meio. Nesse cenário, a Figura 3 que segue permite visualizar uma curva média da vegetação saudável fotossinteticamente ativa, explicitando as principais características da interação vegetação/REM.

Figura 3 - Curva média da vegetação fotossinteticamente ativa.



Fonte: Adaptado de Novo (2010).

Segundo as ideias de Boyd e Danson (2005); Liu et al. (2016); Kuplich et al. (2016); Wójtowicz; Wójtowicz e Piekarczyk (2016); Lima et al. (2017) mensurar as propriedades biofísicas e bioquímicas fornece uma indicação da qualidade dos recursos naturais tais como os da vegetação agrícola, bem como importantes informações que podem servir de suporte para o desenvolvimento de estratégias para o gerenciamento desses recursos. Nesse cenário, algumas investigações têm se desenvolvido com o objetivo de correlacionar a reflectância com os componentes bioquímicos das folhas de vegetais. Tais atividades visam, frequentemente, identificar as relações que permitam estimar a presença de estruturas químicas, físicas e biológicas presentes nas folhas dos vegetais. As diferenças espectrais entre a reflectância no vermelho e no infra-vermelho próximo (NIR) têm sido utilizados para desenvolver índices de vegetação (IVs), que são combinações lineares ou não-lineares da reflectância em duas ou mais bandas. Nessa perspectiva o uso de (IVs) possibilita o monitoramento e quantificação das variáveis biofísicas da vegetação bem como sua distribuição espacial. Essa técnica tem sido empreendida em múltiplas escalas de análise (produção agrícola, identificação de campos nativos, de vegetação aquática, de stress vegetal, ocorrências de estiagens, etc...).

Conforme Mascarenhas (2009); Morais et al. (2011); Liebisch, Rohrer e Walter (2015) a atividade fotossintética da vegetação realça o contraste da radiação eletromagnética nos intervalos espectrais do vermelho e infravermelho. Essa

característica, resultante da interação R.E.M/vegetação, favorece a identificação de fitofisionomias distintas em espécies vegetais. Segundo os autores, esse é o fator determinante que faz com que o índice de vegetação mais empregado para estudos com vegetação seja o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Os pesquisadores ressaltam que as viabilidades dos IVs são muitas e apontam para efetivação das técnicas do SR na agricultura de precisão. Com isso, acreditam que a aplicação do SR voltado para a vegetação agrícola permite gerenciar, mapear, monitorar e prever variáveis importantes das culturas agrícolas. Dentre as variáveis podemos citar a produção anual, sequestro de carbono, maturação de culturas, e ainda, stresses causados por poluição, água, insetos e fitoparasitas .

Nesse cenário, Santos Junior et al. (2002) obteve medidas nas regiões do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, a campanha foi efetivada 112 dias após o plantio de uma área de soja. Tal procedimento visou conhecer o padrão das respostas espectrais de plantas atacadas pelo fitonematóides. As medidas registradas foram transformadas em índice vegetativo (NDVI) e posteriormente relacionadas com a densidade populacional do fitoparasita, com o peso da matéria fresca e número de vagens por planta. O autor relata que foram observadas que diferentes densidades de população estão diretamente relacionadas com a resposta espectral das plantas expressa por meio dos valores do NDVI.

Anos mais tarde, foi desenvolvida por Martins (2016) atividade de pesquisa que avaliou a capacidade dos dados do SR para discriminar e mapear plantas de café em três estágios de infecção por nematoides (inicial, médio e severo). A pesquisa realizou as medições de variáveis biofísicas e de índices hiperespectrais na folha e sobre o dossel de cafeeiros. Os dados hiperespectrais foram usados para simulação de bandas dos sensores do RapidEye e OLI/Landsat 8 com o objetivo de identificar as faixas espectrais mais sensíveis para a identificação de patógenos nas plantas. A simulação de bandas determinou que os intervalos espectrais do vermelho, vermelho limítrofe e infravermelho próximos do RapidEye foram complementares para a discriminação de plantas de café sadio e nos outros dois níveis de infecção. As bandas e uma imagem NDVI, foram usadas para a classificação das áreas infectadas por nematoides, a qual definiu a distribuição espacial de café sadio e de dois níveis de infecção com uma acurácia global de 78%.

Nesse contexto, Liu (2016) aponta que os (IVs) são notadamente uma das técnicas mais usadas no (SR) por permitir indicar as condições da vegetação

monitorada. O autor declara que o sucesso de sua aplicação tem como base fundamental o fato de que a produção primária da vegetação possui estreita relação com a absorção da energia solar, o que permite definir o desenvolvimento das comunidades vegetais. Nessa perspectiva, o índice de área foliar (IAF – variável biofísica da vegetação definida por Watson em 1947, como a razão entre total de área foliar por área de superfície do terreno) emerge como um importante parâmetro de vegetação que nas duas últimas décadas tem sido empregado para a estimativa do potencial vegetativo de culturas. O autor enfatiza que o IAF é amplamente utilizado em atividades de pesquisa associado ao emprego do sensoriamento remoto hiperespectral sendo conhecido por sua eficácia e baixo custo econômico.

Nesse sentido, Picoli (2009) utilizou o IVs para estimar a produtividade agrícola de talhões de cana-de-açúcar nas safras 2005/2006. Para tanto, usou um modelo agrônomo ajustado com dados orbitais. Este modelo utilizou o índice de área foliar (IAF) estimado a partir do (NDVI) do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo do satélite Terra da NASA (National Aeronautics Space Administration). Consoante o autor, os resultados apontam que o modelo agrônomo explicou 31% e da variação da produtividade observada nas safras 2005/2006, o que se deve fundamentalmente ao uso das imagens NDVI do MODIS. O resultado do modelo foi usado para auxiliar e aprimorar a previsão da estimativa da produtividade feita in loco.

Silva et al. (2009) desenvolveu atividades de pesquisa visando observar a evolução espaço temporal com o uso de imagens de satélites dos anos de 1988 a 2006 (imagens do Landsat 5 TM - Thematic Mapper, com download do catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE) a fim de estimar a presença do solo exposto e da vegetação na Microrregião de Itamaracá-PE, para tanto, utilizou os recursos do SR agregado a emprego dos índices de vegetação, NDVI e SAVI (Índice de Vegetação Ajustado por Solo). A partir dos IVs utilizados, o autor pode avaliar o impacto ambiental na área de estudo e identificar as principais feições, como solo exposto, manguezais, carcinicultura e vegetação nativa. Nesse sentido, Liu et al. (2016) ressalta, dentre os IVs, a importância do IAF que nas últimas duas décadas tem sido amplamente utilizado em muitas investigações como um importante parâmetro para avaliação da vegetação.

Em outra perspectiva Battude et al. (2016) elaboraram atividade de pesquisa visando desenvolver uma metodologia baseada no uso de sistemas remotos de alta

resolução a fim de estimar a biomassa de milho em escala regional. Metodologicamente os autores propuseram estratégias de calibração e espacialização sob várias condições climáticas. Para esse procedimento, combinaram o simples algoritmo para estimativas de rendimento (SAFY - Simple Algorithm for Yield Estimates) com dados de SR de alta resolução espacial e temporal de diversos sensores (Formosat-2, SPOT4 - Take 5, Landsat-8 e Deimos-1). Este trabalho levou a nova versão do modelo SAFY que considera a variação sazonal da área foliar específica (SLA). Os resultados do SAFY foram validados com medições locais de biomassa e estimativas de rendimento a nível local e regional. Bons resultados foram obtidos para a biomassa local ($r = 0,98$) e para estimativas de produtividade na escala regional ($r = 0,96$).

Du Lin et al. (2017) elaborou sua atividade de pesquisa visando estimar o conteúdo de nitrogênio foliar (LNC - leaf nitrogen content), para tanto comparou o potencial dos dados hiperespectrais de LiDAR (HSL) e de fluorescência de clorofila induzida por laser (LIF - leaf induced fluorescence) na previsão de LNC de arroz. Os pesquisadores utilizaram três procedimentos em momentos distintos (2014, 2014 e 2015). Primeiramente selecionaram como as variáveis os valores de intensidade de (HSL) em 694nm e 742 nm e (LIF) em 685nm e 740 nm para analisar a conteúdo de nitrogênio foliar de arroz com uma base de dados obtida entre os anos de 2014 e 2015. Em um segundo momento usaram os índices espectrais (isoladamente) derivados de (HSL) e (LIF), e em uma última oportunidade, foram considerados os índices de razão de refletância para fluorescência e índices baseados em NDVI nos comprimentos de onda acima mencionados. Os resultados obtidos com esse experimento demonstraram que os índices de razão combinada, especificamente a razão de refletância fluorescência a 740 nm, determina uma relação moderada com LNC de arroz ($r^2 = 0,736, 0,704$ e $0,713$, respectivamente para os experimentos de 2014, segundo de 2014 e 2015).

Em pesquisa similar Quemada et al. (2014) fez uso de imagens hiperespectrais aéreas para detecção de estresse nutricional de plantas, para tanto comparou a os métodos de sensoriamento para diferenciar parcelas de milho com deficiência e/ou suficiência de nitrogênio. As leituras dos dados foram obtidos pelos sensores hiperespectrais Micro-Hyperspec VNIR (Headwall Photonics, Fitchburg, MA, EUA), esta câmera adquiriu imagens de radiância em 260 bandas na região de 400-885 nm, 300 m acima do local em análise. As captações de índices em nível do solo foram

feitas com os sensores SPAD (Minolta Camera Co., Osaka, Japão), Dualex e Multiplex (FORCE-A, Orsay, França). Esta pesquisa explicitou que os índices de vegetação baseados em medições remotas eram tão confiáveis quanto às medidas tomadas com o equipamento no solo usado para avaliar o status do nitrogênio da cultura.

Koga et al. (2007) acrescenta que as técnicas de SR têm demonstrado eficazes para obtenção de estimativas precisas principalmente em condições de campo. Com essa ideia o autor elaborou atividade de pesquisa com a finalidade de verificar se as medidas de refletância permitiam estimar danos na produção de soja decorrentes da ferrugem asiática. O experimento foi conduzido na Embrapa Soja, Londrina (PR), e utilizou blocos ao acaso, com diferentes estádios de aplicação do fungicida. Os tratamentos foram definidos buscando obter diferentes níveis de severidade da ferrugem asiática e, conseqüentemente, variações na área foliar e na produção. As leituras de refletância foram feitas em intervalos de 50 nm com comprimentos de onda entre 460nm a 810 nm. O (NDVI) considerou as bandas $(810-660)/(810+660)$ visando determinar a influência da doença na eficiência fotossintética. Conforme o autor os resultados apontam que a sensibilidade das medidas de NDVI apresentaram potencial para captar variações entre os tratamentos considerados.

Cui et al. (2009) exploraram métodos para quantificar a severidade da ferrugem asiática da soja. Nesta pesquisa foram coletadas imagens de folhas de soja com diferentes graus de ferrugem em laboratório, com o auxílio de um espectrorradiômetro portátil. Os resultados indicam que a severidade da infecção modifica a refletância da superfície dentro de uma ampla faixa de espectro. Um índice de vegetação de diferença (DVI) mostrou uma correlação positiva com as diferenças de refletância. Os resultados preliminares obtidos em laboratório demonstraram que este método de imagem multiespectral pode detectar quantitativamente a ferrugem na soja. Os autores enfatizam que testes em escala de campo são necessários para ampliar a eficácia e confiabilidade da quantificação da infecção em tempo real.

Atividade de pesquisa semelhante foi elaborada por Zheng et al. (2018). O estudo teve como finalidade explorar os recursos do Sentinel-2 Multispectral Instrument (MSI) para discriminar áreas atingidas por ferrugem amarela no trigo de inverno. As bandas multiespectrais simuladas para o sensor Sentinel-2 foram calculadas pela função de resposta espectral relativa (RSR) do sensor com base nos dados hiperespectrais in situ adquiridos ao nível do dossel (radiômetro). Três bandas espectrais do Sentinel-2, incluindo B4 (Vermelho), B5 (Re1) e B7 (Re3), foram

encontradas como bandas sensíveis. Um novo índice multiespectral, o ReDSI (Red Edge Disease Stress Index), que consiste nessas bandas sensíveis, foi proposto para detectar a infecção por ferrugem amarela em diferentes níveis de severidade. A acurácia da identificação global do ReDSI foi de 84,1% e o coeficiente kappa de 0,76. Os autores apontam que o Sentinel-2 tem o potencial para a discriminação de ferrugem amarela em áreas de trigo, e o ReDSI proposto tem capacidade para a detecção de ferrugem amarela em escalas regionais.

Nesse contexto, Sugawara et al. (2011) relata que nos últimos anos, a utilização do SR tornou-se fundamental no monitoramento agrícola, tendo em vista que permite acompanhar o desenvolvimento da cultura ao longo do período, prever safras, localizar áreas cultivadas, auxiliar na determinação de novas áreas para produção, além de atuar na identificação de áreas agrícolas afetadas por patógenos. Em acordo, Meneses et al. (2001); Ramirez e Zullo Júnior (2010) Silva et al. (2014), apontam que a utilização dos instrumentos do SR em agricultura de precisão é incipiente no Brasil. Para os autores, o grande impulso do uso das ferramentas do SR na agricultura ocorreu no momento em que as imagens se tornaram acessíveis, pois elas trouxeram consigo um importante elemento, a visão sinótica e multiespectral para estudos da vegetação. Por esse motivo, a aplicação do SR no monitoramento de culturas tornou-se cada vez mais importante no desenvolvimento da agricultura de precisão, principalmente pela emergente possibilidade de uso de sensores com melhor resolução espacial, espectral, temporal e radiométrica.

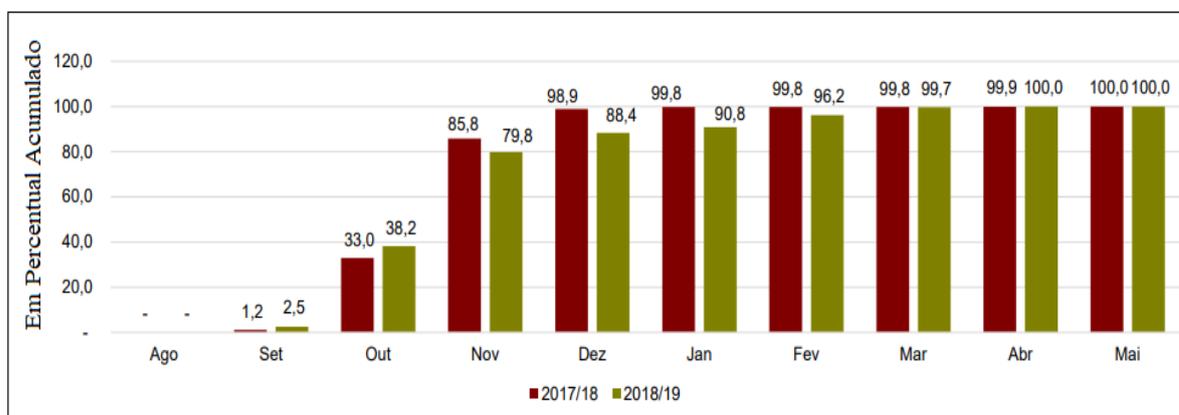
2.2 Soja e a Ferrugem Asiática: importância, sintomas e controle.

Conforme dados da Embrapa (2010) os primeiros registros do plantio da soja no Brasil são datados de 1914 no noroeste do estado do Rio Grande do Sul, município de Santa Rosa. Entretanto, foi a partir dos anos quarenta (1940) que a soja passou a ter importância econômica, culminando assim no primeiro registro estatístico no Anuário Agrícola Nacional em 1941. Posteriormente, nos anos sessenta (1960), esse cultivo firmou-se definitivamente como uma das culturas de relevante importância econômica para o país. Nesse período, a sua produção multiplicou-se por cinco e passou de 206 mil ton em 1960 para 1.056 milhões de ton em 1969, do volume total produzido nesse momento (98%) eram oriundos dos três estados da região Sul.

Segundo Silva; Lima e Batista (2011) as décadas seguintes, principalmente os anos de 1990, trouxeram a agricultura brasileira um processo de modernização dos meios e dos mecanismos de produção da soja fazendo com que a cultura sofresse uma reestruturação ao longo da sua cadeia. Em acordo Roessing; Sanches e Michellon (2015) relatam que a criação de novas tecnologias consistiu o fator principal que permitiu ao Brasil um aumento significativo na sua produção de soja, por este meio, o país passou a figurar entre os maiores produtores de soja do mundo. Nesse contexto Cardoso, et al. (2017) argumenta que o potencial para expansão de áreas de plantio, o crescente uso de tecnologias e o aumento da produtividade foram alguns dos fatores que levaram este grão tornar-se o mais relevante produto agrícola na pauta das exportações brasileiras, proporcionando ao país receitas anuais na casa de bilhões de dólares.

Conforme a Companhia Nacional de Abastecimento – Conab (2019) o cultivo de soja tem protagonizado o incremento substancial nas áreas de produção de grãos no país. As perspectivas de maior rentabilidade com relação a outras culturas e sua maior liquidez estimulam os produtores a continuar empreendendo seus esforços nesta cultura. Em 2019 o crescimento da área atingiu cerca de 2,1% com valor de 35,9 milhões de hectares plantados. A Figura 4 apresenta a evolução das áreas cultivadas com soja no Brasil nas safras 2017/2018 e 2018/2019.

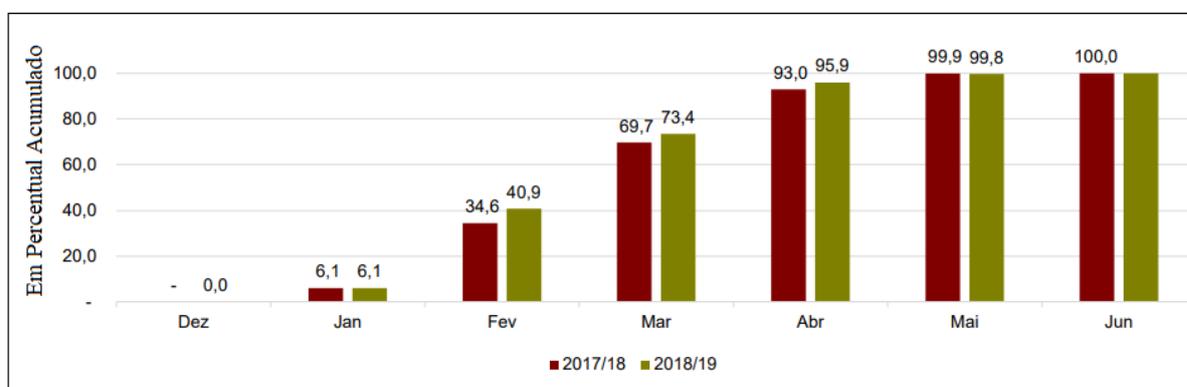
Figura 4 - Evolução das áreas plantadas com soja no Brasil nas safras 2017/2018 e 2018/2019.



Fonte: Adaptado de Conab (2019).

De modo geral as condições climáticas ao longo do ciclo da cultura oscilaram significativamente nas duas últimas safras, algumas intempéries, especialmente no fim de 2018 e o início de 2019, prejudicaram o rendimento médio de algumas regiões produtoras. No entanto, a produção brasileira alcançou 115 milhões de toneladas, a segunda maior safra de soja registrada pela Conab. A Figura 5 demonstra a porcentagem de produção de soja por mês nas safras 2017/2018 e 2018/2019.

Figura 5 – Produção percentual por mês de soja no Brasil nas safras 2017/2018 e 2018/2019.



Fonte: Adaptado de Conab (2019).

Embora as perspectivas com relação à cultura da soja sejam animadoras, esse cultivo enfrenta grandes desafios ao longo de todo o processo de plantio e produção. Talvez um dos mais relevantes obstáculos em todo o processo produtivo sejam as doenças que acometem a cultura ao longo de seu ciclo vegetativo. Atualmente, a principal doença que dificulta o desenvolvimento da cultura no Brasil é a ferrugem asiática, essa doença é causada por um fungo biotrófico *Phakopsora pachyrhizi*, o qual possui a capacidade de hospedar-se na soja e em outros hospedeiros verdes, Meneghetti et al. (2010); Garcéz Fiallos (2011); Trentini et al. (2017).

Conforme Camargos (2017) esse fungo foi identificado inicialmente no Japão em 1903, chegando ao Brasil pelo estado do Paraná na safra 2000/2001. Segundo o autor, desde seu aparecimento em 2001 conseguiu atingir uma área de 22 milhões de hectares do território nacional, sua disseminação ocorreu de maneira intensa devido à alta capacidade de dispersão (vento) que o levou a todas as regiões produtoras do país, causando rápida expansão, virulência e perdas. Nos anos seguintes, mais

especificamente a safra 2005/2006, essa doença determinou prejuízos na ordem US\$ 8 bilhões aproximadamente consolidando-se como principal obstáculo ao desenvolvimento de lavouras de soja. Conforme a Embrapa (2008), na safra seguinte 2006/2007, entorno de 2,6 milhões de toneladas de soja foram perdidas resultante da ação da ferrugem asiática nas lavouras do país, cerca de 4,5% do total produzido no Brasil.

A doença desenvolve sintomas iniciais bastante característicos, pequeníssimos pontos surgem (em média 1mm de diâmetro) geralmente mais escuros do que o tecido sadio da folha, cuja coloração pode variar de cinza-esverdeada a esverdeada. Nesse ponto escuro pode-se observar uma pequena pústula, que evolui e desenvolve diversas urédias. As pústulas são estruturas de coloração castanho-clara a castanho-escura, abrindo-se em um minúsculo poro, liberando os uredosporos. Estas estruturas adquirem a cor bege e acumulam-se ao redor dos poros ou são carregados pelo vento. Estes sintomas são característicos do processo e podem causar lesões em folhas, pecíolos, haste e promover a desfolha precoce, Yorinori; Junior e Lazzarotto, (2004); Trentini et al. (2017); Godoy, et al. (2018). A Figura 6 demonstra o aspecto da infecção em uma folha de soja.

Figura 6 - Folha da Soja infectada por *Phakopsora pachyrhizi*



Fonte: O autor (2019).

Conforme Souza (2015); Seibt (2017) as lesões podem surgir em diversas estruturas do vegetal, tais como pecíolos, ramos e vagens, contudo, são mais

frequentes nas folhas geralmente na superfície inferior. Com o aumento da idade da lesão o número de pústulas por lesões aumenta consistentemente, cada pústula (urédia) passa a expelir grupos de esporos do fungo (uredosporos) por meio de um poro central, acumulando-se em volta deste. As lesões geralmente estão associadas ao amarelecimento foliar pela perda acentuada de pigmentos fotossintetizantes e a destruição do tecido vegetal. Este fungo tem elevado potencial para ocupar extensas áreas foliares podendo causar queda da folha, resultando em um encurtamento severo do ciclo, senescência precoce e morte vegetal.

Em acordo Yorinori et al. (2004); Embrapa (2010) afirmam que a infecção causada pelo *P. pachyrhizi* ocasiona a queda prematura das folhas o que impede o pleno enchimento dos grãos causando perdas de produtividade. Segundo os autores, alguns dos casos mais severos ocorrem quando a doença atinge a soja na fase de formação das vagens ou início da granação (estágios vegetativos R4 para R5), nesse momento do desenvolvimento vegetal a doença pode causar o aborto e queda das vagens. Embrapa (2008); Hartman et al. (2015) apontam que na Austrália e na Índia foram registrados casos extremamente severos de infecção pelo fungo na fase vegetativa, fase de floração, causando aborto das flores seguido de uma queda total, as perdas registradas nesses países atingiram os índices de noventa por cento (90%) da produção. A Figura 7 demonstra a fitofisionomia de uma área infectada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi*

Figura 7 – Área de Soja infectada por *Phakopsora pachyrhizi*



Nesse sentido, vários esforços têm sido empreendidos visando encontrar diferentes fontes de controle e resistência ao fungo. Embrapa (2010) recomenda para o manejo e controle da doença, semeadura em época recomendada preferencialmente com a utilização de cultivares precoces, monitoramento das plantas e aplicações preventivas de fungicidas ou no aparecimento dos primeiros sintomas. No entanto, Embrapa (2014) observa que a grande variabilidade quanto à adaptabilidade e virulência apresentada pelo patógeno tem dificultado a obtenção de cultivares resistentes. Deste modo, o controle da doença tem sido efetivado quase que exclusivamente por meio de fungicidas. Esse aspecto do processo de contenção da doença aponta para a necessidade do desenvolvimento de estratégias inovadoras e diferenciadas para confrontar a doença, as quais venham se somar àquelas utilizadas atualmente para esta finalidade Meneghetti, et al. (2010).

Nesse contexto Stefanello, et al. (2016) argumenta que embora a utilização de agentes químico como fungicidas seja o principal meio de controle desse tipo de patógeno, outras práticas podem contribuir efetivamente para a contenção da doença, como o planejamento e manejo adequado, época de semeadura, espaçamento, nutrição e vazio sanitário. Debona et al. (2008) acredita que o fornecimento equilibrado de nutrientes possibilita ao hospedeiro uma maior expressão de seus mecanismos de defesa, promovendo com isso uma consistente contribuição no sentido de reduzir a severidade da doença e aumentar a resistência vegetal em relação a ação do fungo no indivíduo hospedeiro.

Em acordo, a Embrapa (2018) recomenda que na falta de cultivares com potencial para resistir à ferrugem asiática, deve-se utilizar o controle químico. No entanto, cabe enfatizar, para que seja eficaz a utilização desse método, é de fundamental importância a escolha correta dos fungicidas, bem como sua aplicação em momentos específicos dos estádios de desenvolvimento da soja. Tal procedimento tem por finalidade permitir adequada aplicação do fungicida, pois a utilização desse recurso em momento inoportuno pode ocasionar controle ineficiente da doença, podendo gerar impactos ambientais, econômicos e sociais.

3 METODOLOGIA

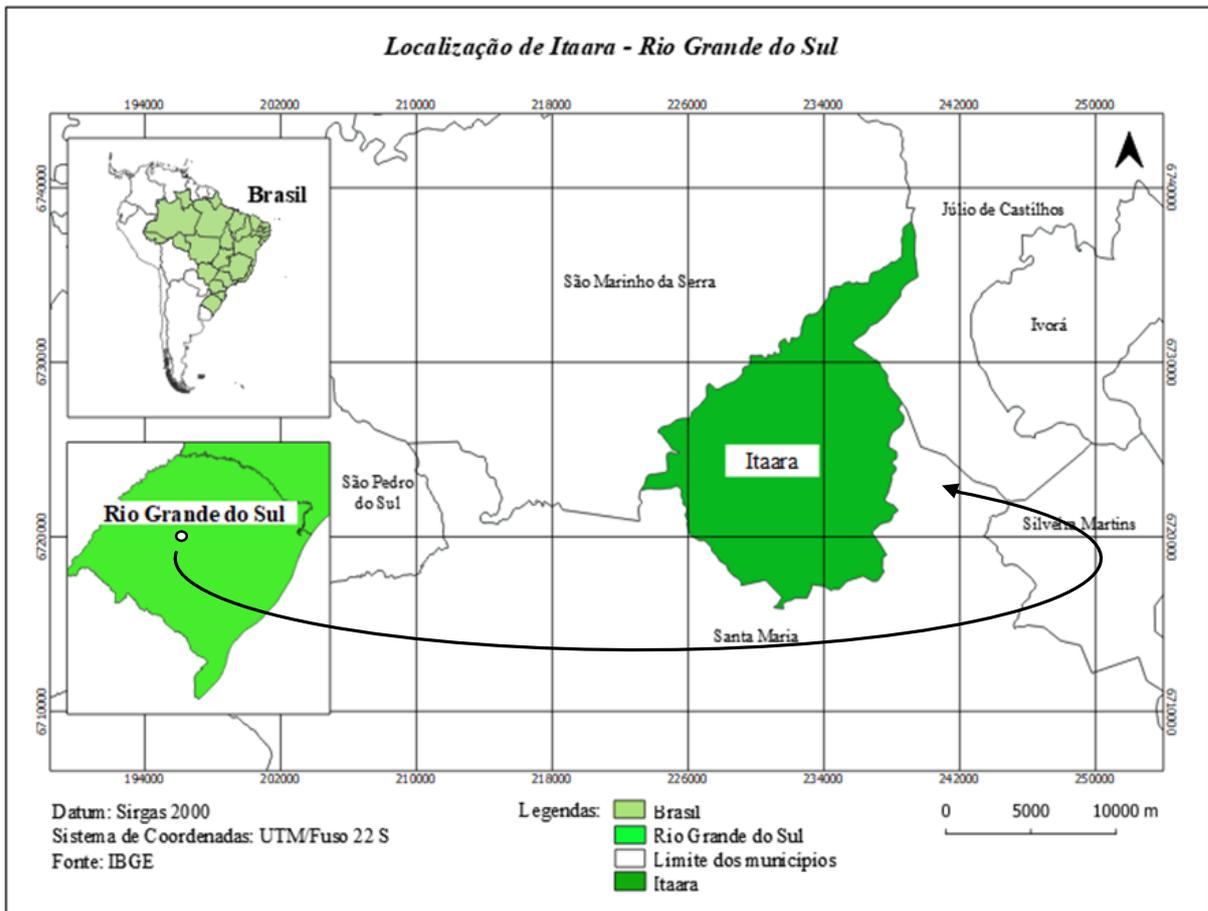
3.1 Caracterização da Área de Estudo.

A pesquisa foi conduzida no município de Itaara Latitude: 29° 36' 31" Sul, Longitude: 53° 45' 55" Oeste, região central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O município tem por limites, ao norte, Júlio de Castilhos, ao Sul Santa Maria, ao Leste Distrito de Arroio Grande/ Santa Maria, a Oeste São Martinho da Serra. Sua população é estimada, segundo censo de 2010, em 5.010 pessoas com densidade demográfica 28,96 hab/km². A área municipal possui em seu território os biomas mata atlântica e pampa com hidrografia formada pelas bacias hidrográficas Vacacaí Mirim e Ibicuí mirim IBGE, (2010).

Itaara está situada no rebordo da serra geral (região central do estado) com características climáticas parecidas com as da região serrana do Rio Grande do Sul, possui clima subtropical úmido de acordo com a classificação Koppen, apresenta verão quente e úmido. As precipitações mais intensas ocorrem nos meses de outubro a fevereiro com decréscimo em março. O índice pluviométrico anual é em torno de 1723 mm com temperaturas entre -3 a 10 C^o nos meses frios e 22 a 28C^o nos períodos mais quentes. Itaara possui relevo ondulado com vales íngremes devido ao entalhamento fluvial típico da escarpa, morros do rebordo e áreas planas do planalto, Dietrich, (2011).

A altitude média do município é de 500 m, essa região integra a unidade de relevo chamada rebordo da serra geral, zona de transição entre o planalto meridional brasileiro (planalto central ou serra geral) e a área de depressão central do Rio Grande do Sul. Itaara possui terrenos de planícies aluviais e várzeas levemente onduladas (coxilhas) e porções das escarpas da serra geral, Rechia, (2006) e PPD1, (2006). A Figura 8 que segue demonstra a localização de Itaara no Estado do Rio Grande do Sul.

Figura 8 - Localização Geográfica de Itaara no Estado do Rio Grande do Sul.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

3.2 Material e Procedimentos metodológicos

Os experimentos da pesquisa foram conduzidos nas dependências do Instituto Phytus (Itaara-RS), essa instituição é parceira da investigação por meio de vínculo estabelecido com o Laboratório de Geotecnologias/UFSM. As atividades de investigação se desenvolveram concomitantemente nas áreas de campo e em duas casas de vegetação, também chamadas de casas de cultivo ou estufas. Inicialmente foram disponibilizadas duas áreas de soja (total de 300m²) divididos em dois talhões com dimensões de 150 m² cada. Os talhões foram denominados **P01** e **P03**, sendo o talhão **P01 - (infectado)** o testemunho absoluto sem nenhum tratamento químico e o **P03 - (livre)** área previamente tratada, entre as áreas havia um talhão que as

separava. O croqui abaixo representado na Figura 9 demonstra a divisão das áreas de campo.

Figura 9 - Croqui da Área de Estudo



Fonte: Google (05/01/2019).

Paralelo as atividades de campo, foram desenvolvidos em duas casas de vegetação o plantio e monitoramento da soja, para tanto, foram utilizados 8 vasos plásticos contendo 8 kg da mistura de terra, areia e adubo onde foram plantadas sementes de soja da variedade "*Brasmax tornado RR*". Cabe ressaltar que as áreas de campo também foram plantadas com a mesma variedade. Após a emergência, as plantas foram separadas em dois lotes contendo 4 vasos cada. Um dos lotes foi levado à casa de cultivo com tratamento preventivo para o fungo *Phakopsora pachyrhizi* e o outro foi conduzido à casa de vegetação que serviu de testemunho absoluto (sem nenhum tratamento químico). Os indivíduos foram colocados sobre bancadas no interior das casas para o monitoramento e posterior leitura das variáveis biofísicas e espectrais.

A fim de facilitar o entendimento das atividades que se desenvolveram nas casas de vegetação, adotou-se a nomenclatura semelhante as áreas externas, o testemunho absoluto foi denominado **P01 - (infectado)** e as plantas preventivamente tratadas foram denominadas **P03 - (Livre)**. As leituras nas estufas iniciaram no momento em que as plantas atingiram o estágio vegetativo "**V5**" (estágio vegetativo

em que a planta apresenta cinco trifólios) e prosseguiram até surgirem as primeiras pústulas da ferrugem asiática. As coletas de campo dos dados espectrais e biofísicos (clorofila “b”, índice de área foliar, biomassa) iniciaram assim que as plantas atingiram “V6” em torno de 40 dias após a emergência e prosseguiram, em média, de três em três dias, respeitados as limitações do clima nas áreas de campo. A Figura 10 ilustra os procedimentos iniciais.

Figura 10 - Áreas de campo e casa de vegetação – (a) planta em V6, (b) casa de vegetação, (c) vasos de soja, (d) áreas de campo.

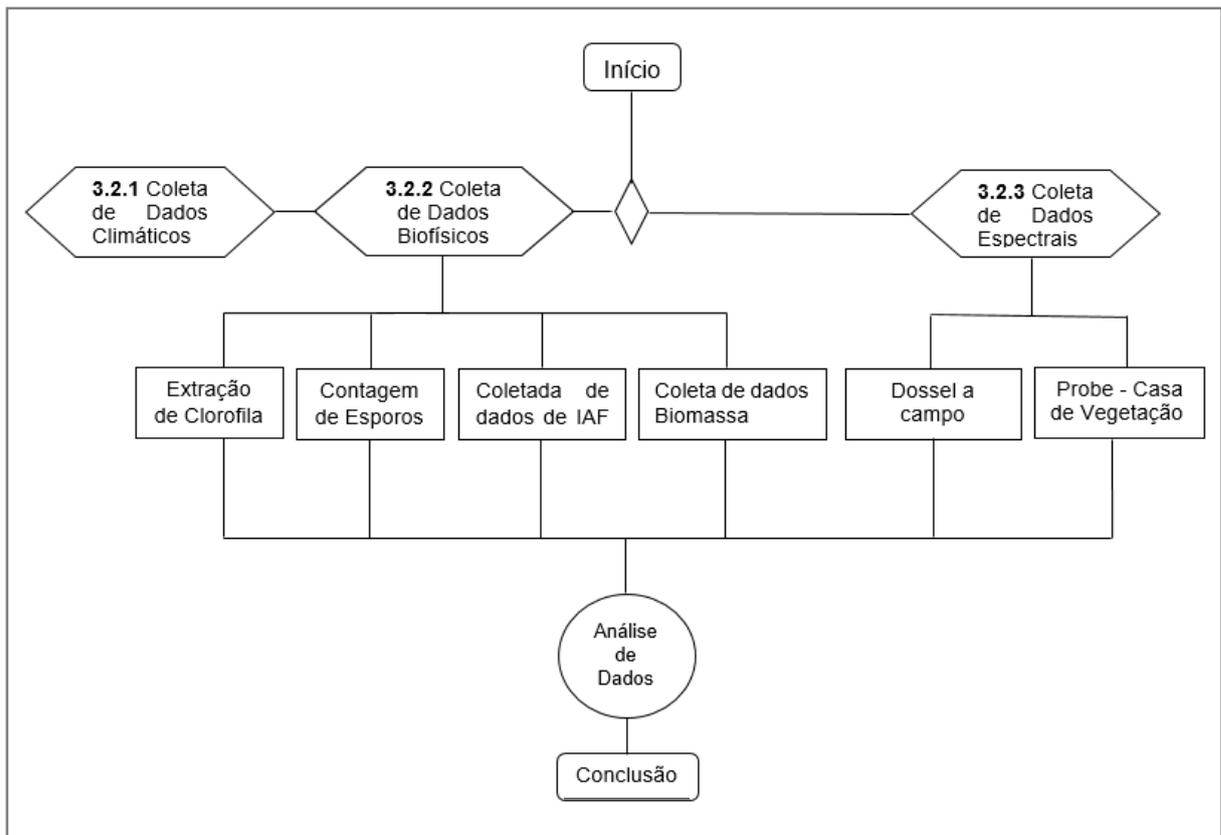


Fonte: O autor (2019).

O acompanhamento das variáveis biofísicas, climáticas e espectrais prosseguiram até que fossem identificados os primeiros corpos de frutificação do fungo visíveis à folha do cultivar (olho nu). Ao longo do experimento foram realizados os controles fitossanitários, as amostras em **P03 receberam tratamento prévio** com fungicidas **Fox+Unizeb Gold+Aureo** em aplicações com intervalos de 15 dias. Os talhões de campo e casa de cultivo em **P01 (área infectada) não receberam**

tratamento químico para servir de testemunho da expressão do fungo na soja nas áreas de estudo. Desse modo, com a finalidade de organizar os procedimentos metodológicos adotados nas atividades de pesquisa estruturou-se um fluxograma conforme exposto na figura que segue.

Figura 11 - Fluxograma da pesquisa



Fonte: O autor (2019).

3.2.1 Coleta de Dados Meteorológicos

As variações do clima foram acompanhadas e registradas durante todo o período de coleta de dados. Estas foram obtidas por meio de dispositivos eletrônicos inseridos em uma estação meteorológica (Modelo iMETOS®ag) localizada nas proximidades das áreas de campo. A referida estação possuía uma unidade de memória central ligada a sensores que registravam as condições do tempo local a cada hora (temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, precipitação, direção/velocidade do vento e tempo de molhamento foliar). Dentre os equipamentos

constavam: termômetros de máxima e mínima que indicavam as oscilações de temperatura do ar (°C) ocorridas durante o dia; um pluviômetro que registrava a quantidade de precipitação em milímetros (mm); um higrômetro que indicava a umidade relativa do ar em valores absolutos expressos em porcentagem (%) e um sensor que identificava o tempo de molhamento foliar (min). Este sensor é capaz de calcular a duração de umidade nas folhas por meio da detecção instantânea de orvalho em sua superfície. Esses recursos estavam reunidos em um mesmo local de onde se extraíram os dados da pesquisa.

Os dados climáticos das casas de cultura eram controlados por dispositivos que regulam temperatura, umidade e pluviosidade no interior das mesmas promovendo dessa forma as condições climáticas conhecidas, controladas e adequadas ao desenvolvimento vegetal. Os dados climáticos foram obtidos com o auxílio dos equipamentos apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Estação meteorológica a campo (a), controle de pluviosidade/umidade-casa de vegetação (b, c), comando geral das funções (d).

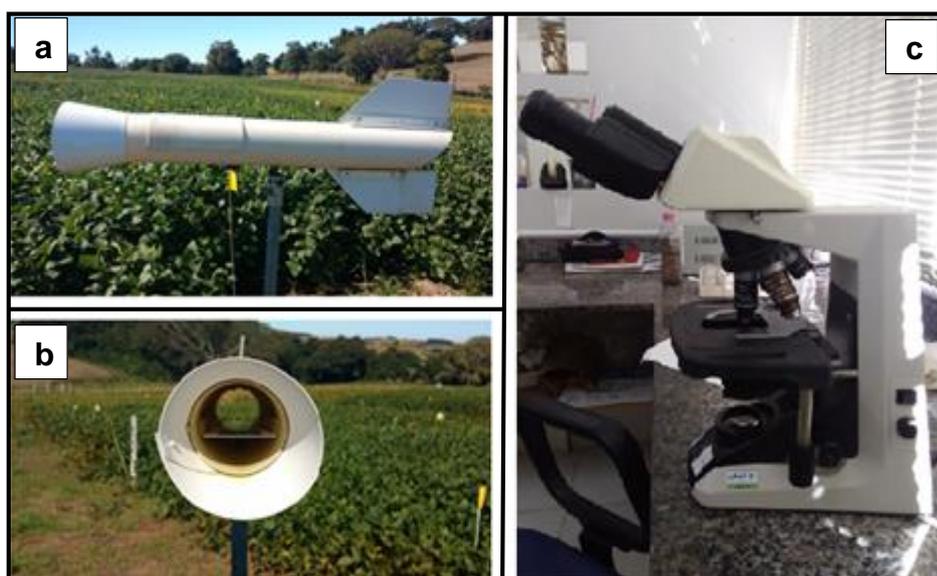


Fonte: O autor (2019).

3.2.2 Coleta de Dados das Variáveis Biofísicas

No centro da área experimental foi instalado um coletor de esporos modelo (siga-2000) desenvolvido por Seiji Igarashi pesquisador da Universidade Estadual de Londrina (UEL), para o monitoramento de uredósporos de *Phakopsora pachyrhizi* com a finalidade de constatar a presença dos esporos do fungo causador da Ferrugem Asiática. Esse procedimento consistiu em expor o equipamento nas áreas de plantio, o instrumento é composto basicamente por um cano com um leme de direção fixo (mobilidade pela ação do vento) seu diâmetro é em torno de 100 milímetros. Essa estrutura foi colocada em um tripé com sua abertura voltada para o vento. O aparelho possui em seu interior uma fita adesiva de dupla face para a captação dos esporos. As fitas foram retiradas do coletor a cada (7 -10) dias (devido às chuvas excessivas) e levadas ao laboratório para leituras quantitativas dos uredósporos do fungo. A contagem dos esporos foi efetivada por meio de análise microscópica com a utilização da fita adesiva sobre lamínulas com áreas delimitadas de 1 cm² cada. A leitura é feita ao microscópio com objetivas de “40” e oculares de “16” totalizando um aumento de 640 vezes, Gardiano et al. (2010); Igarashi et al. (2016). A Figura 13 demonstra os equipamentos utilizados.

Figura 13 – Coletor de esporos (a, b) – microscópio óptico (c)



Fonte: O autor (2019).

Nas áreas de campo e casas de cultivo foram realizadas as coletas de folhas a cada campanha para extração de medidas biofísicas (estruturais). As variáveis avaliadas estão vinculadas aos parâmetros agronômicos, teor relativo de clorofila (TRC), índice de área foliar (IAF) e biomassa, essas duas últimas variáveis não foram avaliadas nas plantas contidas nas casas de vegetação tendo em vista que o método de avaliação era destrutivo e havia um número limitado de indivíduos para amostragem nas estufas.

A biomassa foi estimada a partir da coleta de duas (2) plantas em cada área amostral de campo totalizando (4) quatro plantas a cada campanha. As amostras foram extraídas, identificadas e colocadas em sacos de papel. Em seguida levadas ao laboratório e condicionadas em estufa a 75°C por um período de 48 horas com a finalidade de obter o peso de matéria seca (PMS/g). Posteriormente foram pesadas em balança de alta precisão modelo Bel MW-0,001g, Moterle et al. (2006); Pacheco et al. (2011); Zilio (2014). Os autores argumentam que essa metodologia permite acompanhar os ganhos de matéria seca (biomassa/parte aérea/raiz) e identificar por esse meio a diferenças entre plantas submetidas a stress (hídrico, insetos e agentes patológicos).

A outra variável considerada pela investigação está vinculada aos valores de clorofila “b”, essa têm fornecido informações importantes para o estudo da vegetação, frequentemente é tomada como objeto de estudo em várias pesquisas voltadas ao emprego do sensoriamento remoto. As concentrações de clorofila “b” foram determinadas visto que a vegetação verde saudável tem sua expressão vinculada fundamentalmente a presença desse pigmento, refletindo deste modo em todo o espectro visível, Blackburn (2006); Ponzoni e Shimabukuro, (2007); Jacquemoud et al. (2009).

Em acordo Canteri (2010); Boechat (2012) apontam que o visível é a parte do espectro eletromagnético mais sensível as alterações dos pigmentos vegetais onde as oscilações na concentração, principalmente de clorofila nas estruturas vegetais, têm promovido variações consistentes na refletância espectral. Tais alterações podem ser observadas por sensores remotos e são indicativos de estresses causados ao estado fisiológico da planta, basicamente, tem seu ápice à faixa do verde (500-600 nm), e com máximas de absorções na faixa azul (400-500 nm) e vermelha (600-700

nm), Haboudane et al. (2002); Ponzoni e Shimabukuro, (2007); Brandão et al. (2008); Jacquemoud et al. (2009).

Nessa perspectiva, foram estimadas as concentrações de clorofila das folhas de soja nas áreas de campo e casas de vegetação, este processo esteve em acordo com a metodologia descrita por Whitham et al. (1971) e Lichtenthaler (1987). A quantificação das concentrações de Chl "b" das folhas foram determinados a partir do uso de acetona (80%) e calculados usando equações e coeficientes específicos. Para a amostragem nas casas de cultivo foram extraídas (1) uma folha a cada dois indivíduos, (4) no total, nas áreas de campo foram obtidas (3) três folhas em dois diferentes pontos em cada área de estudo, (12) no total, igualmente extraídas no mesmo intervalo de tempo. As amostras coletadas foram identificadas e envoltas em papel alumínio, sequencialmente armazenadas em sacos plásticos pretos a fim de evitar a depreciação dos pigmentos foliares. Posteriormente foram condicionadas em caixa térmica previamente preparada contendo gelo para evitar a degradação dos referidos pigmentos. Deste modo, foram transportadas imediatamente após a coleta ao laboratório onde se desenvolveram os processos de remoção dos pigmentos.

A extração dos pigmentos foliares em laboratório (clorofila b) estiveram vinculados aos procedimentos sugeridos pelos autores supracitados, esses determinam que sejam recortados retângulos com dimensões de 2,0 cm por 2,5 cm do limbo das folhas, os mesmos foram pesados em balança de precisão e posteriormente mergulhados em 10 ml de acetona 80%. Em seguida, as amostras foram condicionadas em tubos de ensaio escuros com tampa e levadas a refrigeração em local protegido da luz sob temperatura de 4 a 6°C permanecendo nessa condição em um período de 24 horas. As concentrações de clorofilas foram determinadas com auxílio de espectrofotômetro Bell 1105 modelo SF325NM com faixa de operação entre 325 a 1000 nm.

Para a leitura no equipamento foram extraídos, do material anteriormente refrigerado, o sobrenadante com uma pipeta e inseridos em cubetas do espectrofotômetro (4ml). As leituras foram feitas nos comprimentos de onda de 645nm, 663 nm (região do vermelho), obtendo assim a absorvância das amostras. Para o cálculo das concentrações dos pigmentos fotossintéticos foram considerados o volume de acetona usado no experimento, as medições do espectrofotômetro e o peso das amostras. A Figura 14 explicita os equipamentos utilizados nessa etapa.

Figura 14 – Espectrofotômetro (a), balança de precisão (b)



Fonte: O autor (2019).

Em posse dos índices das variáveis, calculou-se a concentração dos pigmentos fotossintéticos conforme a equação que segue:

Equação 1:

$$Chlb = \frac{22,9 \cdot A645 - 4,68 \cdot A663 \cdot V}{1000MMF}$$

Onde:

Chlb = Clorofila b (mg/g)

MMF = Massa de Matéria Fresca do material vegetal (g)

V= volume do estrato (clorofila + cetona)

A última variável biofísica considerada foi o Índice de Área Foliar (IAF) definido por Watson (1947) como a área foliar do dossel por unidade de superfície do solo (m^2/m^2). Conforme Liu, et al. (2016) o IAF é a principal variável descritora do dossel vegetal estando diretamente relacionado com os processos de crescimento, absorção de energia, evapotranspiração e produtividade dos ecossistemas. O IAF é uma propriedade estrutural que possui forte relação com a refletância do dossel no NIR,

enquanto o visível é sensível às propriedades da clorofila. Sua relevância está vinculada a biomassa vegetal e por caracterizar a arquitetura do dossel, fornece informações importantes sobre o vigor da cobertura vegetada, Shiratsuchi et al. (2011).

Daughtry et al. (2000) relata que dentre os métodos utilizados para aferir o IAF constam os diretos e indiretos, os de medida direta (destrutivos) são mais trabalhosos que os indiretos, no entanto apresentam maior precisão. O método indireto (não destrutivo) pode ser obtido com o uso de dados orbitais, de modo geral espera-se que menores valores de radiância espectral referente às regiões do visível (400 – 750nm) sejam encontrados com o aumento dos valores de IAF. Shiratsuchi et al. (2011) relata que esse processo ocorre devido à maior presença de pigmentos fotossintetizantes disponíveis para a absorção da radiação eletromagnética (REM) incidente. O autor aponta ainda, que fato diferente é, de maneira geral, observado na região do infravermelho próximo onde os maiores valores são detectados devido ao múltiplo espalhamento entre folhas.

O método adotado pela pesquisa para a obtenção do IAF está vinculado ao procedimento direto (destrutivo) tendo em vista este ser considerado mais preciso. Conforme Favarin (2002); Gassen (2017) a medição da área foliar é um processo simples que consiste basicamente em multiplicar o maior comprimento da folha pelo seu maior índice de largura, o resultado será área de um retângulo. Deste modo, descontamos a deformidade da folha tendo em vista a sua forma oval (30% da área do retângulo). Após o cálculo da área da folha, contamos o número de plantas por m² e número de folhas por planta. Com esses valores em mãos aplicamos a equação:

Equação 2:

$$\text{IAF} = \text{AF} \cdot \text{NFP} \cdot \text{NPm}^2$$

Onde:

IAF: Índice de Área Foliar.

AF: área de uma folha.

NFP: número de folhas/planta.

NPm²: número de plantas/m².

3.2.3 Coleta de Dados Espectrais

A eficácia em analisar a assinatura espectral da soja foi constatada em diferentes pesquisas, algumas investigações apontam a importância do sensoriamento remoto no monitoramento de áreas de soja com a utilização de refletância espectral. Desde a década de 2000 pesquisadores empenham-se na busca por características espectrais imbricadas as diversas condições em que a cultura da soja é exposta durante o período de plantio/colheita, Bauriegel et al. (2011); Furlanetto et al. (2017); Crusiol et al. (2018).

Nesse cenário, os dados hiperespectrais foram obtidos a campo e em casa de vegetação, em períodos de três em três dias (em média) com a finalidade de detectar as respostas das curvas espectrais de vegetais em diferentes condições sanitárias. O levantamento das medidas hiperespectrais contou com o auxílio de instrumentos tais como um espectrorradiômetro *Field Spec-3 – HandHeld* (portátil) com faixa de operação entre 325 nm a 1075 nm, resolução de 1 nm e Field of View (FOV) 25°. Acoplado a esse, um acessório *Probe Leaf Clip* que possui um sensor ativo. O equipamento é composto de uma lâmpada halógena de 4,5 W e sua calibração é realizada por meio de uma placa interna do tipo *Spectralon*, a mesma é fixa e integra a estrutura do equipamento posicionada a frente do sensor, ASD, (2012).

O aparelho consiste em uma unidade de leitura em forma de clip (pega e prende) equipado com um detector ligado por cabo ao equipamento onde os valores de cada medida são armazenados. O dispositivo foi programado para realizar 10 leituras consecutivas em cada amostra, para as leituras, a(s) folha(s) foram posicionadas no meio da unidade “clip” prendendo-as e mitigando deste modo as interferências do ambiente. As áreas amostrais foram georreferenciadas utilizando-se receptor de GPS (Global Positioning System) modelo “*Montana 650*” com a finalidade de demarcar os limites entre elas e os pontos de coleta. A Figura 15 demonstra os equipamentos utilizados a campo.

Figura 15 – Espectroradiômetro (a, d) - Probe Clip (b) – GPS (c)



Fonte: O autor (2019).

As amostragens realizadas nas casas de vegetação foram posicionadas sempre na face adaxial evitando as nervuras principais. Os alvos em evidência tiveram suas medidas intercaladas com a placa de referência (*spectralon*) contida no interior do aparelho *Probe Leaf Clip*. Esse processo se fez necessário para que as medidas de radiância sejam transformadas posteriormente em valores de refletância. Em posse dessas medidas foram obtidos o Fator de Refletância Direcional que consiste na razão entre a radiância espectral da amostra (soja) e a radiância da placa de Spectralon (referência) medidas em mesmas condições de aquisição, Cui Di et al. (2009), Nakai et al. (2019).

Os perfis espectrais dos dosséis da soja foram coletados a campo em uma área previamente selecionada e preparada para a investigação. Os períodos de coleta foram irregulares devido as interferências do clima (chuvas excessivas e cobertura de nuvens). Para as leituras, o sensor hiperespectral (equipamento supracitado sem o acoplamento do *Probe*) foi posicionado a cerca de 0,5 m sobre o dossel da cultura em três diferentes pontos de cada área amostral. Foram efetivadas (10) dez leituras em

cada ponto totalizando (60) sessenta leituras nas áreas selecionadas. A reflectância espectral das amostras foram obtidas entre 12:00 e 13:00 hs visando o melhor período de iluminação solar, devido ao seu ângulo de elevação, e preferencialmente em condições de céu limpo.

Em cada ponto amostral foram realizados a calibração e otimização do espectrorradiômetro com a utilização de uma placa de referência (*Spectralon*) a fim de obter o Fator de Reflectância Bidirecional (ρ), Schaepman-Strub et al. (2006); Novo (2010). Após obtidos e armazenados os dados espectrais, realizou-se o processamento das informações com o auxílio do software *ViewSpec-Pro*. Para gerar as curvas de refletância, em função da presença de ruídos em comprimentos de ondas inferiores a 400 nm, adotou-se o intervalo entre 400-900 nm. Com o software *Excel* foram elaboradas as médias das amostras dos espectros coletados, determinou-se com isso a curva média das leituras de refletância de cada ponto amostral.

3.2.4 Método de Análise dos Dados Espectrais

A análises das amostras foram realizadas em três etapas, a primeira se devolveu com base nos dados hiperespectrais obtidos do dossel da soja nas áreas de campo e das leituras das folhas com equipamento *probe leaf* das plantas condicionadas nas casas de vegetação. Com isso, procedeu-se a análise das curvas espectrais da vegetação, para tanto adotou-se a descrição e inspeção direta dos gráficos das curvas de refletância. A segunda etapa analítica buscou inteirar a análise dos dados hiperespectrais coletados a campo sobre os dosséis. Nesse sentido, foram adotados técnicas de extração de informações dos espectros com a aplicação de diferentes índices de vegetação, a saber, foram aplicados na base de dados dos espectros de refletância dos dosséis da soja quarenta (40) opções de IVs disponíveis na literatura.

Em decorrências dos resultados obtidos com a utilização dos índices da vegetação, selecionou-se os mais representativos com base em suas aplicações, (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index, reNDVI - Red Edge Normalized Difference Vegetation Index e NDI- Normalized Difference index), Zarco-Tejada et al. (2001); Ahamed et al. (2011); Gitelson et al. (2015). Usa-se estes IVs para detecção de danos provocados por fitoparasitas, efeitos de secas, estimativas de clorofila em

dosséis arbóreos, produtividade e mapeamento de áreas agrícolas, Rouse et al. (1974); Martins e Gallo (2014); Sanches e Fomaggio, (2017). A descrição matemática dos IVs de resultados mais significativos estão em destaque nas equações abaixo representadas:

Equação 3:

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

Em que:

NIR = Banda do infravermelho próximo;

RED = Banda do Vermelho.

Comprimentos de onda: NIR (750); Red (650).

Equação 4:

$$\text{reNDVI} = \frac{\text{re NIR} - \text{Red}}{\text{re NIR} + \text{Red}}$$

Em que:

NIR = Banda do infravermelho próximo;

RED = Banda do Vermelho.

Comprimentos de onda: NIR (750); Red Edge (710).

Equação 5:

$$\text{NDI} = \frac{\text{Green C} - \text{Green}}{\text{Green C} + \text{Green}}$$

Em que:

Green C = Banda do verde em 550 nm;

Green = Banda do verde em 531 nm.

O NDVI e reNDVI variam de -1 a 1, de maneira geral, uma vegetação sadia terá um índice próximo a 1 e qualquer área com alterações nas estruturas da planta ou com baixa presença de matéria vegetal terá um NDVI (reNDVI) afastado 1. Quando atacadas por pragas ou em situação de déficit hídrico e/ou nutricional as plantas apresentam sintomas causados pelas modificações metabólicas resultantes desses distúrbios. Em decorrência disso, a refletância dos dosséis é alterada e difere daquela vista em plantas sadias uma vez que as sadias apresentam maior quantidade de pigmentos. Essas oscilações são detectadas com a aplicação de NDVI (reNDVI) o que permite e facilita o diagnóstico e o direcionamento dos recursos para correção dos problemas existentes, Abawi e Chen (1998); Schowengerdt et al. (2007); Meneses e Netto (2013); Junges et al. (2017). De forma semelhante, as alterações de taxas nos pigmentos de clorofila em dosséis de algumas plantas podem ser detectadas pelo Normalized Difference Index (NDI – R 550 - R531 /R550 + R531). Estima-se que a diminuição no teor total da clorofila nos dosséis altera a proporção de energia absorvida pelos pigmentos levando a diferenças significativas entre a vegetação verde saudável e estressada (Zarco-Tejada et al. 2001).

Na terceira etapa, os valores registrados com a aplicação dos IVs foram organizados e tabelados e posteriormente submetidos aos testes estatísticos. A fim de visualizar as relações entre as estimativas de cada variável biofísica (Clorofila, IAF e biomassa) e os IVs (NDVI, re-NDVI e NDI) considerados, foram elaboradas matrizes

de correlação linear de Pearson (r) e matriz de P-valor a 5% de probabilidade. As análises foram realizadas com o auxílio do suplemento Action (versão de avaliação) do office excel. Para interpretá-los estatisticamente os valores foram submetidos ao teste de normalidade com o método Shapiro-Wilk visto que esse procedimento permite avaliar o ajustamento de uma variável aleatória a uma distribuição normal com número de amostras inferior a trinta (30). Esse método atende aos pressupostos do coeficiente de correlação de Pearson (r), uma vez que este é fortemente influenciado pela média da distribuição. No caso do teste, um resultado de $p > 0,05$ indica normalidade, se o p valor apresentar índices abaixo ($p < 0,05$) pressupõe-se que não há normalidade entre os dados, Callegari-Jacques, (2003); Figueredo Filho e Junior (2009).

A correlação mede o grau de associação entre variáveis quantitativas, esta é expressa por valores entre -1 (correlação negativa perfeita) e +1 (correlação positiva perfeita). Quando a correlação é direta, ou seja, x e y variam no mesmo sentido é porque os valores são positivos, já na correlação inversa, os valores são negativos, ou seja, se os valores de x aumentam, os valores de y tendem a diminuir. Deste modo, o coeficiente de correlação de Pearson pode ser definido como uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas, Stanton, (2001); Cargnelutti Filho et al. (2010). Nesse sentido Dancey e Reidy (2006) elaboram uma classificação dos valores de correlação, onde $r = 0,10$ até $0,30$ (correlação fraca); $r = 0,40$ até $0,6$ (correlação moderada); $r = 0,70$ até 1 (forte correlação), assim quanto mais perto do valor 1 (+ ou -) maior será grau de dependência estatística linear entre as variáveis. De outra forma, ao afastar-se de 1, ou quanto mais próximo de zero, menor será força dessa relação.

Sequencialmente foram elaborados os diagramas de dispersão, os quais permitem avaliar quanto os dados diferem e se distanciam do seu valor central e possibilitam analisar o formato da distribuição dos dados. A presença de outliers (pontos discrepantes fora da linha de tendência) tende a distorcer o valor da média e por consequência o valor de " r ". Desse modo, o dado outlier pode comprometer as estimativas dos pesquisadores levando a interpretações errôneas, Hair et al. (2005); Carnelutti Filho et al. (2010).

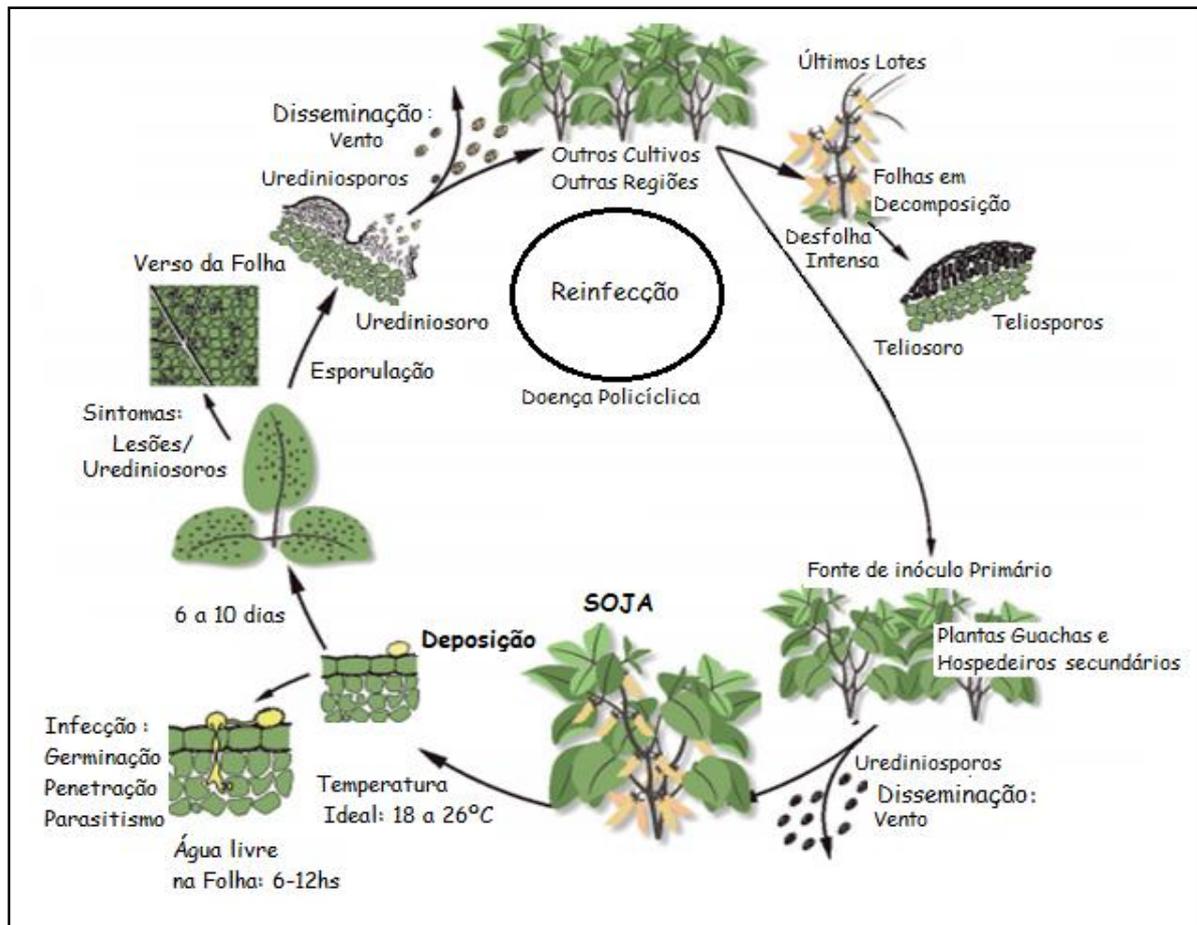
4. RESULTADOS

4.1 Influência dos Elementos do Clima no Sistema Epidêmico da Ferrugem Asiática

Os sintomas da doença consistem basicamente em pequenos pontos (1mm de diâmetro) geralmente mais escuros do que o tecido foliar (castanho, castanho claro ou marrom escuro), onde se pode observar pequenas saliências (pústulas). O surgimento dessas estruturas na parte inferior da folha constitui a principal característica do início da frutificação do fungo, Lourenço Jr et al. (2014); Wen, Bowen e Hartman (2017); Embrapa (2018).

Diversas fases compõem o ciclo do fungo *Phakopsora pachyrhizi*, inicialmente os esporos são disseminados na atmosfera pela ação do vento ou pelo impacto das gotas da chuva. Ao se depositarem nas folhas das plantas de soja, com molhamento foliar e temperaturas adequadas, os esporos germinam e o fungo penetra na folha diretamente sobre a epiderme, processo que ocorre à noite. Entre 6 e 9 dias são formadas pequenas protuberâncias chamadas de urédias as quais passam a produzir esporos que novamente se disseminam pelo vento, deste modo o ciclo é completado, Camargo (2017); Trentini et al. (2017); Godoy, et al. (2018). O comportamento geral do fungo com relação a influência das variáveis climáticas na ocorrência da ferrugem asiática é demonstrado de modo simplificado na Figura 16 que segue.

Figura 16 – Condições gerais e clima durante o ciclo de vida do *P. pachyrhizi*.



Fonte: Adaptado de Reis et al. (2006).

Nesse contexto, Narváez et al. (2010), Lourenço Jr. et al. (2013), Stefanello et al. (2016) relatam que a combinação das informações do tempo/clima associada ao monitoramento de esporos, permitem aperfeiçoar modelos de previsão e risco da ocorrência de doenças que atingem as plantações de soja em diversas regiões. Desde 2001, momento em que se identificaram as primeiras infecções do fungo no país, o *Phakopsora pachyrhizi* atingiu em torno de 20 milhões de hectares do território nacional. Esse evento ocorreu devido à sua alta capacidade de propagação pelo ar, o que lhe permitiu alcançar as áreas mais longínquas impondo virulência e perdas. Assim, a agressividade do agente contaminante está fortemente vinculada a condições climáticas favoráveis encontradas em todas as regiões brasileiras, Dias et al. (2014); Beruski et al. (2019).

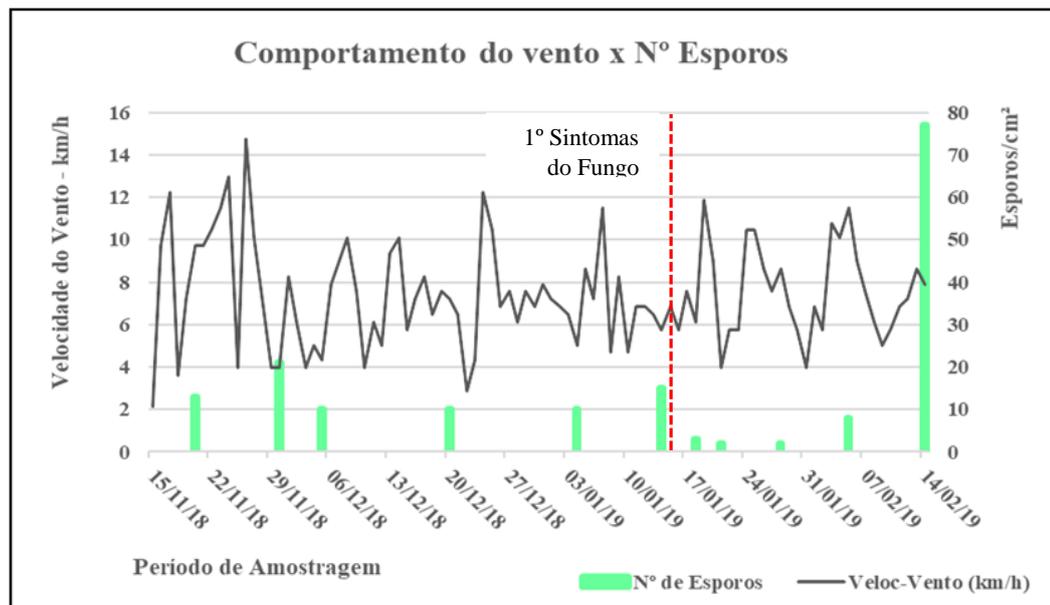
Nesse cenário, a presente pesquisa obteve os índices expressos pelos elementos do clima, dentre estes, temperatura, umidade relativa, pluviosidade, velocidade do vento e tempo de molhamento foliar. O registro dos dados do tempo teve por finalidade identificar a influência das condições climáticas no sistema epidêmico durante a fase pré-sintomática da ferrugem asiática. Os valores foram anotados diariamente conforme metodologia supracitada.

Nesse contexto, a Figura 17 que segue expõe o comportamento do vento e do número de esporos presentes na atmosfera de novembro/2018 a fevereiro de 2019. A data de identificação dos primeiros sintomas da ferrugem asiática, 15/01/2019 – está representada na figura pela linha pontilhada em vermelho. Deste modo, pode-se observar que os intervalos de maior velocidade do vento antecedem as coletas com maior número de esporos encontrados no coletor (21/11/2018 - 13 esporos/cm²), (30/11/2018 - 21 esporos/cm²), (14/01/2019 – 15 esporos/cm²) e (14/02/2019 – 77 esporos/cm²). No primeiro intervalo, anterior a de 21/11/2018, os ventos atingiram valores de até 12,2 km/h, o segundo, antes de 30/11/2018, ficaram entre 12,9 e 15 km/h. O terceiro período precede a data de 14/01/2019 e os ventos variaram de 11,5 a 12,2 km/h, o último intervalo de elevação do número de esporos na atmosfera, antes de 14/02/2019, apresentou números levemente menores de velocidade do vento e obtiveram valores entre 10,4 a 11,8 km/h. Em face disso, a constante movimentação da atmosfera permitiu que fossem suspensos no ar um número considerável de esporos que se desloca de uma área para outra e se depositam na superfície das folhas nos dias de baixa velocidade do vento.

O comportamento geral do vento identificado nas áreas de pesquisa acorda com as afirmações de Chevarria et al. (2013), Wen, Bowen e Hartman (2017), os autores afirmam que a propagação do fungo ocorre exclusivamente pela dispersão dos esporos ao vento. Estes podem se deslocar dentro da lavoura 3 metros por dia e atingir até 96 km por semana conforme a intensidade do vento. Segundo Megeto (2012); Hartman et al. (2015), Nunes et al. (2018) nos últimos anos estudiosos tem abordado em suas investigações a influência dos elementos do clima na colonização, infecção e desenvolvimento do *Phakopsora pachyrhizi*. Além das variáveis do clima, visam também entender os fatores aerobiológicos como dispersão, deposição e liberação de esporos. Assim, as condições prévias identificadas pela investigação apontavam para presença consistente do agente infeccioso no ambiente e para a necessidade de monitoramento constante das demais variáveis promotoras do

desenvolvimento da ferrugem asiática, como se pode visualizar na Figura 17 abaixo representada.

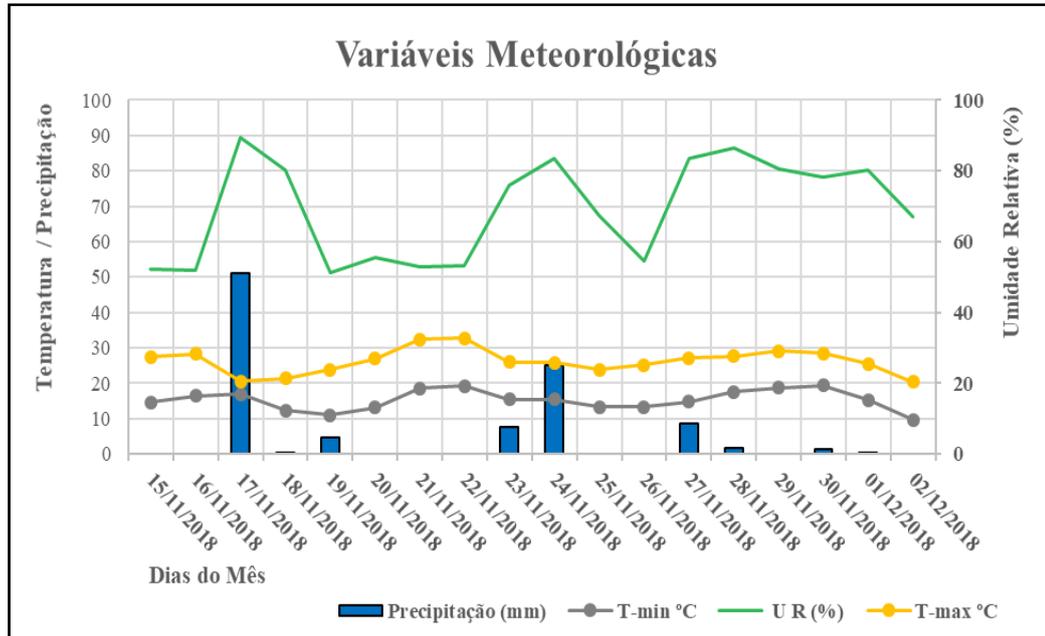
Figura 17: Condições de vento e número de esporos presentes na atmosfera de novembro/2018 a fevereiro de 2019.



Fonte: o autor (2019).

Nesse contexto, distintos fatores ambientais influenciam no comportamento do agente infeccioso e na sua interação com a planta de soja, a Figura 18 seguinte apresenta as variáveis meteorológicas no mês de novembro/2018. A amplitude térmica nesse período apresentou média diária de 11,1°C e não evidenciou alterações bruscas durante quase todo o mês. No intervalo considerado, as temperaturas médias máximas foram de 26,4°C e mínimas de 15,3°C com umidade relativa (UR) 71,7% a qual registrou seus maiores valores nas datas de precipitação. Naquele mês teve um acumulado de chuva de 101mm o que, somados as demais variáveis, proporcionou as condições adequadas para o plantio. Vale lembrar que na data de 30/11/2018 identificou-se uma elevação no número de esporos na atmosfera (Figura 17). Assim, o contexto climático apresentado aponta para condições atenuantes para presença e posterior crescimento do agente contaminante (esporos).

Figura 18 - Variações da temperatura, umidade relativa e precipitação em novembro/2018

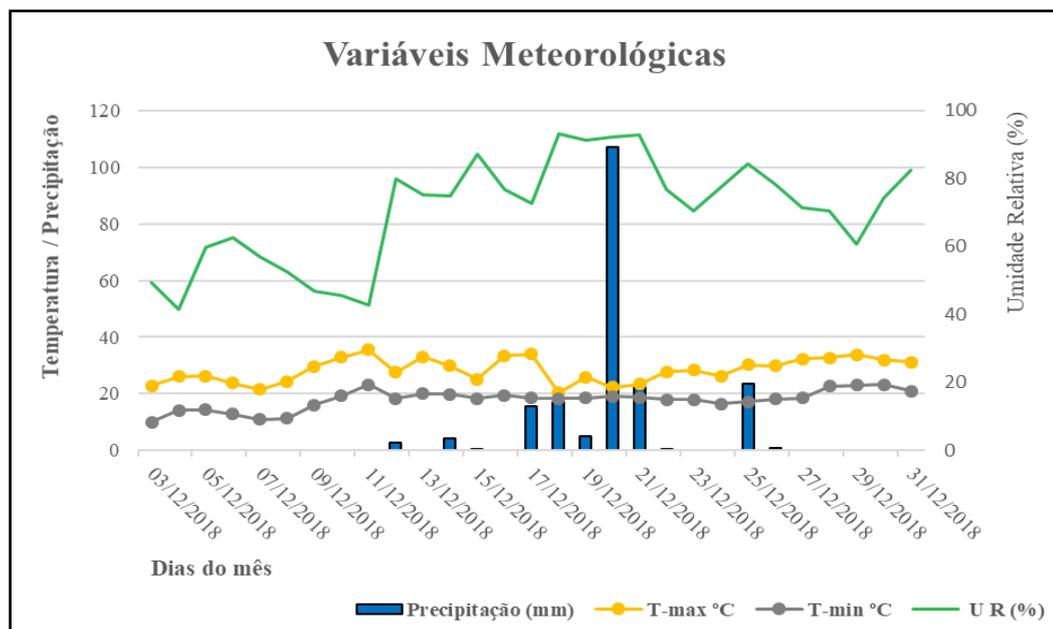


Fonte: o autor (2019).

As amostras coletadas no mês de dezembro de 2018 estão ilustradas na Figura 19 que segue. Os valores expõem a continuidade das condições favoráveis para perpetuação dos esporos nas áreas de plantio de soja. A amplitude térmica apresentou média de 9,9°C, índices próximos aos de novembro de 2018. A precipitação expressou um acréscimo consistente com elevação dos valores e um acumulado de 199,8mm, portanto, 98,8mm a mais do que o período anterior. Comportamento semelhante foi observado nos índices médios de umidade relativa e temperatura, a (UR) alcançou 74,2(%) e a temperatura registrou valores médios entre 18,4 e 28,3 °C. Fato relevante foi identificado entre os dias 12/12/2018 e 28/12/2018, momento em que a umidade relativa do ar não baixou de 70(%) em um intervalo de 16 dias atingindo valores superiores a 80(%) em metade das amostras observadas no período. Deste modo, as condições ambientais identificadas a campo indicavam para circunstâncias que viabilizavam a permanência e disseminação do esporo, bem como o processo de infecção. De mesma forma, Galloti et al. (2006); Godoy et al. (2009); Sikora et al. (2014); Maumary et al. (2016) apontaram em suas investigações que elevada frequência de precipitação associada a períodos elevados de (UR), com

presença intensa de orvalho, são fatores favoráveis ao desenvolvimento de doenças fúngicas. Os autores comentam que a severidade e agressividade do *Phakopsora pachyrhizi* está relativamente ligada a quantidade de umidade relativa e intensidade de chuvas e ao longo do ciclo da cultura. As variações climáticas do mês de dezembro de 2018 estão ilustradas na Figura 19 seguinte.

Figura 19 - Variações da temperatura, umidade relativa e precipitação em dezembro/2018



Fonte: o autor (2019).

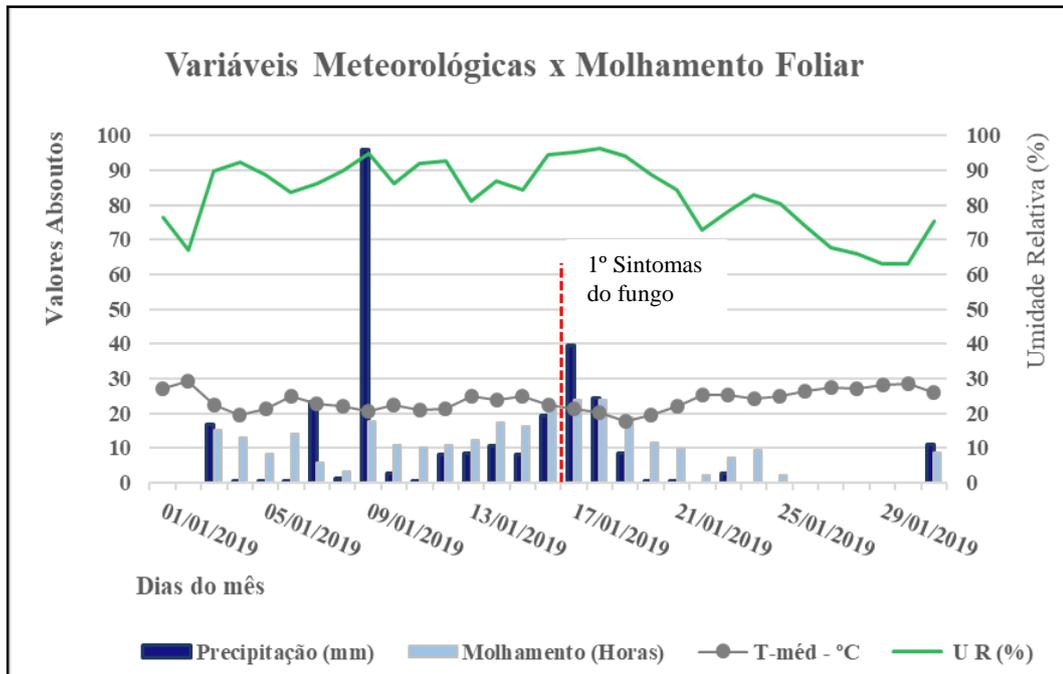
As variações climáticas referentes ao mês de janeiro de 2019 indicam a elevação dos índices pluviométricos, o mês acumulou 282,6 mm com aumento de chuva de 82,8mm, se comparado ao mês anterior. A umidade relativa seguiu em ascendência e atingiu a média de 84,4(%) com pequena queda apenas nos primeiros dias do mês. A amplitude térmica média reduziu para 6,5°C com aumento da temperatura média mínima para 20,2°C e queda da temperatura média máxima de 28,3°C em dezembro de 2018 para 26,7 °C em janeiro de 2019. O tempo de molhamento foliar (TMF) registrado ficou em torno de 10 horas/dia em média.

Essa configuração climática desenvolveu mudanças importantes nas áreas de estudo, os esporos (agentes infecciosos) apresentaram queda nos valores identificados no coletor (Figura 17). Isso provavelmente ocorreu pelo elevado tempo de

molhamento que causa o enxague da folha e dificulta a adesão do esporo nas estruturas foliares. Situação semelhante foi revelada nas investigações desenvolvidas por Dufault et al. (2010), os autores observaram que as precipitações elevadas e contínuas nas lavouras de soja podem causar efeitos prejudiciais sobre a ocorrência do fungo. Os pesquisadores constataram, em leituras de campo, que intensidades entre 45 e 85 mm removem de 38 a 91% dos esporos depositados nas folhas. Segundo Embrapa (2010) a umidade relativa e as precipitações são as principais fontes de água livre (molhamento foliar), em condições inapropriadas afetam principalmente a esporulação e a infecção por fungos fitopatogênicos.

Os indicativos climáticos do mês de janeiro de 2019 apontaram para a possibilidade de emergência da doença nas áreas de estudo, tendo em vista que o aumento do tempo de molhamento foliar (TMF), 10 horas em média, e a elevação da umidade relativa do ar 84,4(%), são variáveis preditoras para o surgimento da doença. Estas características (UR e TMF) são determinantes para o pronunciamento da ferrugem asiática pela ação do *Phakopsora pachyrhizi*, Bonde et al. (2013); Rowlandson et al. (2014). Tal afirmação acorda com os resultados obtidos nos experimentos das áreas de estudo, visto que os primeiros sintomas foram identificados nas estruturas foliares da soja em 15/01/2019 (linha vermelha pontilhada na Figura 20).

Figura 20 - Variações da temperatura, umidade relativa, precipitação e tempo de molhamento foliar de **janeiro/2019**



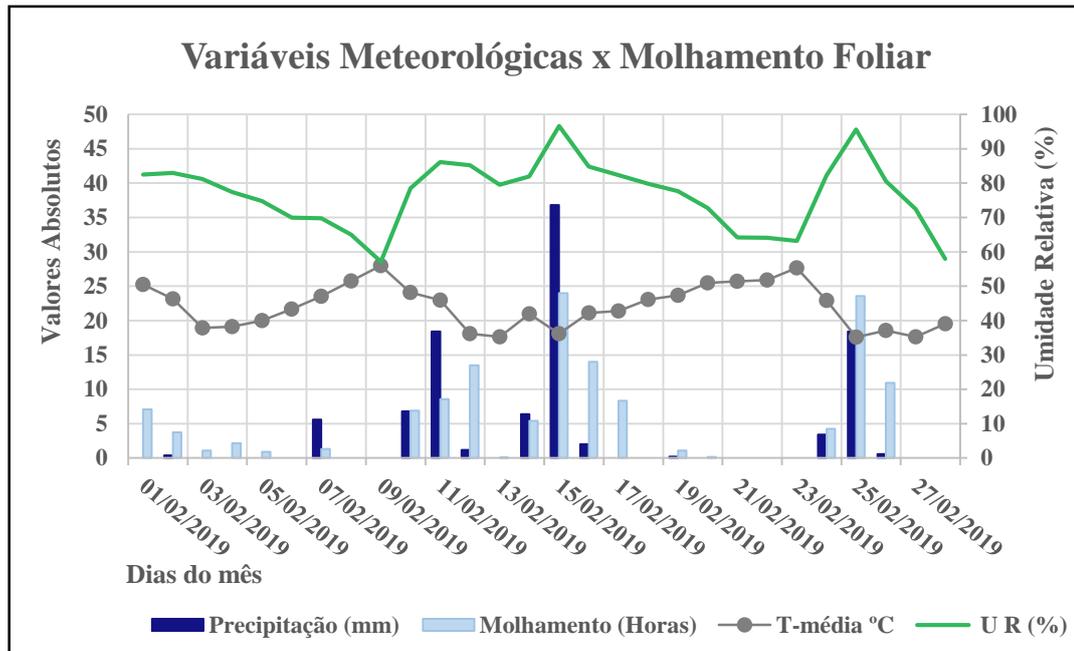
Fonte: o autor (2019).

O mês de fevereiro de 2019 está representado na Figura 21, o comportamento do clima nas áreas de estudo apresentou valores menores de precipitação, o acumulado de chuvas chegou 100,2 mm com diferença de 182,4 mm se comparado ao mês anterior. O tempo de molhamento foliar registrado ficou em torno de 5 horas/dia e a umidade relativa do ar em 79% de média, respectivamente, 5 horas e 5,4% inferior à média mensal anterior. As temperaturas do mês oscilaram entre 17,9 e 27,9°C em média, com leve queda, as médias mínimas e as máximas praticamente se mantiveram inalteradas, no entanto, a amplitude térmica elevou-se e modificou os valores médios diários de 6,5 °C em janeiro para 9,9 °C em fevereiro. Essas condições climáticas possibilitaram um aumento significativo no total de esporos encontrados na atmosfera em fevereiro (Figura 17 supracitada). Com isso, a relação clima/esporo torna-se um indicativo da perpetuação da infecção na área de estudo, possibilidade está marcada pelas condições climáticas favoráveis.

Os valores de esporos apresentaram maior elevação na coleta do dia 14/02/2019 (Figura 17) provavelmente pela menor exposição das plantas ao tempo

de molhamento foliar contínuo, acompanhado pela ocorrência de ventos fracos e moderados o que permite a deposição dos esporos a superfície das folhas.

Figura 21 - Variações da temperatura, umidade relativa, precipitação e tempo de molhamento foliar de **fevereiro/2019**.



Fonte: o autor (2019).

As variações dos elementos do clima apontavam para a continuidade da infecção, visto que entre os dias 09/02/2019 e 14/02/2019 a (UR) apresentou valores diários crescentes acompanhados de temperaturas que variaram entre 18 °C e 27 °C, expondo com isso as condições facilitadoras para o surgimento de novas pústulas nas folhas da soja. As variações climáticas verificadas na fase pré-sintomática são próximas aos relatos de Megeto (2012) e Rowlandson et al. (2015) os autores anotaram em seus resultados que a infecção é decorrente de uma sequência de eventos, o principal é a necessidade de molhamento foliar (água livre) para ocorrer a germinação dos esporos, após a formação do tubo germinativo e depois um apressório. Situações semelhantes foram identificadas por Esker, (2009), Narváez et al. (2010), Alvares et al. (2015) os autores expõem que períodos elevados de molhamento na superfície das folhas de soja aumentam a taxa de disseminação no dossel superior e a severidade da ferrugem-asiática, e caso a água não seja um fator

limitante, a germinação é influenciada também pelas variações de temperatura no ambiente.

Em acordo, Marchetti et al. (1976) com experimentos desenvolvidos *in vitro*, observaram que o fungo foi capaz de germinar a temperaturas de 7 a 28 °C com uso de água-agar como substrato. Nicolini et al. (2010) revelaram em suas atividades de pesquisa que temperaturas entre 5 e 30 °C, tem como melhor faixa de crescimento 21°C em condições de campo. Em diferente situação, Carlini et al. (2009) desenvolveu suas atividades de pesquisa em laboratório. Os autores obtiveram as melhores condições de germinação dos esporos (96.5%) em placas de Petri a temperatura de 23° C. O substrato utilizado no experimento continha extrato de folha de soja/ágar. Recentemente, Maumary et al. (2016) identificaram em suas investigações, conduzidas na região de Santa Fé na Argentina, que a exposição de esporos a temperaturas diárias entre 25 a 35°C diminuíram a germinação e a formação de apressores e, conseqüentemente, a produção de uredinia. Para os autores essas características epidemiológicas explicariam a ocorrência irregular da ferrugem asiática na região de estudo.

Deste modo, as variáveis climáticas têm uma intervenção decisiva na atividade biológica de pragas sendo também e um fator chave a temperatura, pois a maioria dos agentes infecciosos se desenvolvem e acumulam energia dentro de um limite térmico. Assim, na epidemiologia da ferrugem asiática e as variantes ambientais são motivadas pelo macro, meso ou microclima. Estas características afetam, pela expressão de suas condições, os distintos processos do ciclo da doença e influenciam na severidade e taxa de progresso das epidemias, Chevarria et al. (2013), Yorinori et al. (2014); Nunes (2016). Nesse cenário, após a formação das primeiras frutificações fúngicas, o comportamento do clima permaneceu favorecendo o desenvolvimento e disseminação da doença uma vez que os índices de (UR) se mantiveram elevados (78 a 96%) e temperatura de 18 a 23°C até o dia 19/02/2019.

Conforme Del Ponte et al. (2011) as informações sobre influência de fatores climáticos em experimento de campo, para as pragas da soja, ainda são escassas, na região sul do Brasil a produtividade tem sido variável em função das oscilações climáticas, especialmente da precipitação sazonal que influencia nos níveis finais de severidade da ferrugem asiática. Os autores alegam que estudos de impactos do clima são relevantes e necessários para caracterizar o risco médio e a variabilidade interanual. Com isso se poderá estimar a data de determinados eventos que

interferem no ciclo fenológico da soja, e a partir do qual se poderão gerar modelos bioclimáticos para a predição desses eventos.

A análise geral das variáveis climáticas nos permitiu observar que houve relação entre os dados de temperatura, umidade relativa, precipitação e a instauração das primeiras pústulas da ferrugem asiática nas estruturas foliares da soja. Por meio dos índices do clima, obtidos a campo, constatou-se que as condições ambientais antecedentes ao evento da infecção foram favoráveis, permissivas e facilitadoras ao surgimento e o progresso da epidemia do fungo. Destaca-se que os resultados demonstram coerência com dados da literatura para um grande número de casos, especialmente relacionados à (UR), pluviosidade, temperatura e tempo de molhamento foliar.

Os dados climáticos apresentados expõem variações que conduzem a situações particulares para esta região, com isso, concluiu-se que as condições ambientais foram específicas e favoráveis durante o período de cultivo da soja nas áreas de estudo. Embora o tempo apresente constantes modificações, estas alterações climáticas permitiram o desenvolvimento da ferrugem asiática e apresentaram características semelhantes no intervalo que precedeu a infecção durante o intervalo de amostragem. As temperaturas médias ficaram entre 17 e 28°C, com melhores faixas de crescimento entre 21 e 26 °C, (UR) acima de 80% associada a precipitações moderadas (em torno de 20mm) e tempo de molhamento foliar entre 5 a 10 horas. As leituras gerais dos dados climáticos identificados nas áreas de estudo foram próximas aos inventários expostos por Henning et al. (2014) e Hartman et al. (2015), essas pesquisas explicitaram que o fungo necessita, em média, de seis horas de molhamento foliar associados a temperaturas ótimas entre 18 °C e 26,5 °C.

Apesar dos dados meteorológicos não representarem as condições microclimáticas de lavouras distribuídas em diversas localidades, a exposição do comportamento do clima na fase pré-sintomática da doença representa uma contribuição na utilização de técnicas que visam explorar fatores meteorológicos influenciadores da epidemia de ferrugem asiática. Vale lembrar que o acompanhamento e registro das mudanças do clima ocorridas ao longo do período de plantio, podem, por meio da leitura e interpretação dos dados, fornecer subsídios para se gerar recursos que visem auxiliar no controle e combate da doença em diferentes lavouras de soja distribuídas em outras localidades. De acordo com os dados de campo se pode inferir que a emergência e perpetuação da ferrugem asiática está

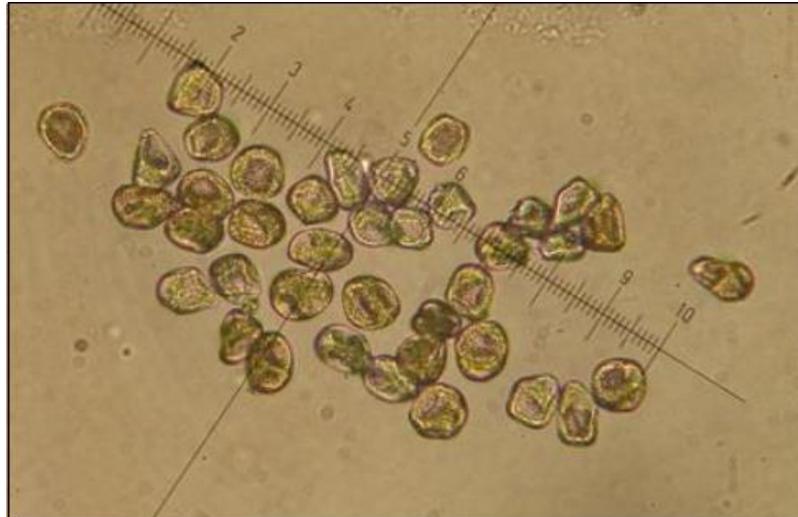
vinculada à frequência de chuvas associadas a altos índices de umidade com temperaturas elevadas, esse contexto promove a infecção, reprodução e disseminação da doença.

4.2 Registro da Variáveis Biofísicas

Os dados das variáveis biofísicas e suas respectivas análises constam no decorrer deste subcapítulo, vale lembrar que as áreas foram divididas em duas partes e nominadas **P01**= infectada e **P03**= Livre de infecção, com data de plantio em 15/11/2019. Os valores de clorofila “b” (Chl-b), biomassa (PmSc), índice de área foliar (IAF) e número de esporos foram identificados e quantificados ao longo das campanhas nas áreas de estudo.

As espécies do gênero *Phakopsora* invadem a cultura da soja e promovem o crescimento da ferrugem asiática, dois tipos de esporos são conhecidos: teliósporos e uredósporos. O *P. pachyrhizi* em sua fase teleomórfica possui teliósporos assimétricos distribuídos em camadas de 2 a 7 esporos. Na fase anamórfica, os uredósporos são ovoides, equinulados e medem aproximadamente (15-24 μm x 18-34 μm) com paredes em torno de 1.0 μm de espessura. A sua coloração varia de castanho, esverdeado a amarelo pálido, estes esporos se estabelecem na fase epidêmica da doença, C. Junior e Figueiredo (2000); De Souza (2007); Hartman et al. (2015). A figura 22 (abaixo) apresenta essas estruturas.

Figura 22 – Esporos vistos ao microscópio óptico (aumento de 640 vezes).



Fonte: O autor (2019).

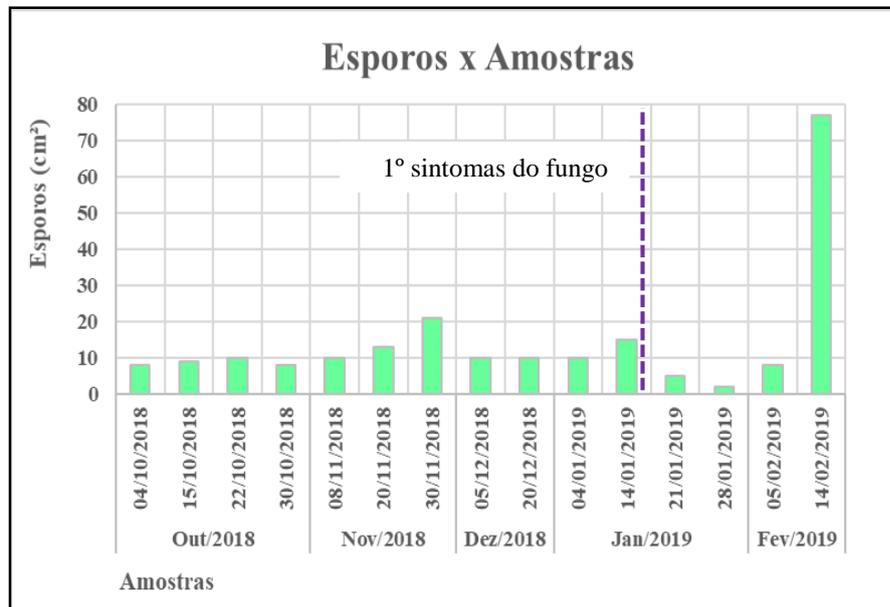
Os esporos levam em torno de 6 a 9 horas após a depósito sobre a folha para penetração nas estruturas vegetais, diferentemente de outras ferrugens, o *P. pachyrhizi* apresenta penetração direta sobre a cutícula com a formação de apressório, seu período oculto pode durar de 6 a 9 dias dependendo das condições do clima local, Zambenedetti et al. (2007); Fialhos, (2011); Godoy et al. (2018). As pústulas liberam os esporos de *P. pachyrhizi* que são transportados pelo ar e espalhados na atmosfera pela turbulência do vento. A perpetuação do patógeno e a consolidação das epidemias estão fortemente imbricadas a propagação de esporos que se deslocam entre as diversas regiões. Os fatores ambientais (temperatura, pluviosidade, velocidade do vento e umidade relativa) interferem na persistência e disseminação dos esporos no ambiente, Gardiano et al. (2010); Sikora et al. (2014); Igarashi et al. (2016).

Conforme Embrapa (2018) o monitoramento e quantificação dos esporos é uma ferramenta de fundamental importância para auxiliar na prevenção e manejo do fungo causador da ferrugem asiática. Por esse motivo, foram coletados e identificados nas áreas de estudo conforme metodologia supracitada, os indicativos numéricos dos esporos do fungo causador da doença. Inicialmente foram utilizados os valores de

esporos identificados no coletor para análise e sequencialmente foram abordadas as demais variáveis biofísicas consideradas na investigação, o que pode ser observado entre as Figuras 23 a 25.

A leitura das primeiras lâminas recolhidas do coletor de esporos iniciou em 04/10/2018, portanto, em data anterior ao plantio das áreas disponibilizadas para a investigação. Em geral, as amostras apresentaram ao longo das campanhas valores moderados de esporos/cm² oscilando, na maioria das coletas, entre 10 e 15 esporos/cm² até a 30/11/2018. Nesta data, ocorreu um aumento significativo no número de esporo e, a partir deste registro, as amostras seguintes apontaram valores próximos aos coletados anteriormente, no entanto, verificou-se um acréscimo considerável no número de esporos em data (14/01/2019) anterior a identificação dos primeiros sintomas na folha (15/01/2019). Vale lembrar que os sintomas iniciais são identificados no momento em que as primeiras pústulas aparecem na face abaxial da folha (visíveis a olho nu). As amostragens seguintes evidenciaram a queda dos valores entre as coletas dos dias 18/01/2019 e 05/02/2019, após esse período, constatou-se uma elevação substancial no número de esporos presentes na atmosfera. O incremento nos índices de esporos teve início no dia 05/02/2019 e seu ápice foi registrado em 14/02/2019 – Figura 23.

Figura 23 – Número de esporos obtido no coletor.



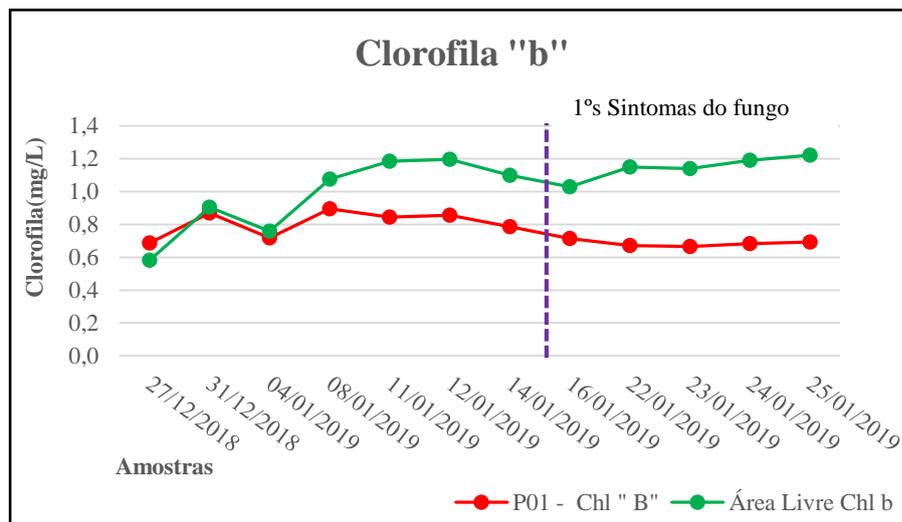
Fonte: O autor (2019).

Outra variável biofísica considerada pela investigação está ligada aos valores expressos pela clorofila “b”, visto que esta tem sido utilizada para verificação da eficiência fotossintética em plantas acometidas por stress, Mascarenhas (2009); Moraes et al. (2011). Deste modo, a diminuição na clorofila e alterações na estrutura interna das folhas podem modificar os mecanismos de absorção e dispersão da radiação electromagnética, Liebisch, Rohrer e Walter (2015). Nesse cenário, o registro dos valores desta variável teve por finalidade apontar mudanças significativas da clorofila no intervalo que precede os primeiros sintomas do fungo visíveis à folha (fase pré-sintomática).

Os índices de clorofila extraídos na área de estudo demonstram uma redução expressiva nos valores do pigmento na área infectada-P01 entre os dias 08/01/2019 (0,89 mg/l) e 16/01/2019 (0,71 mg/l). A constatação dessa condição é de relevante importância visto que os primeiros sintomas do fungo *Phakopsora pachyrhizi* foram apontados no dia 15/01/2019 (linha roxa pontilhada na figura), portanto, o declínio da clorofila precede o aparecimento das primeiras estruturas fúngicas visíveis a olho nú.

A fase pré-sintomática apresenta oscilações distintas entre as áreas de estudo nos valores de clorofila "b", os maiores números foram verificados nas áreas "livre de infecção" com índices superiores entre os dias 04/01/2019 e 14/01/2019. A partir da constatação da presença do fungo, a clorofila "b" retoma o crescimento dos valores em 16/01/2019, área livre-P03. No entanto, a outra área (P01-infectada) não apresenta as mesmas características uma vez que segue em declínio conforme avança o ciclo fenológico, o que se pode constatar ao observar a Figura 24 que segue.

Figura 24 – Índice de Clorofila "b" obtidos nas áreas de estudo ao longo das campanhas



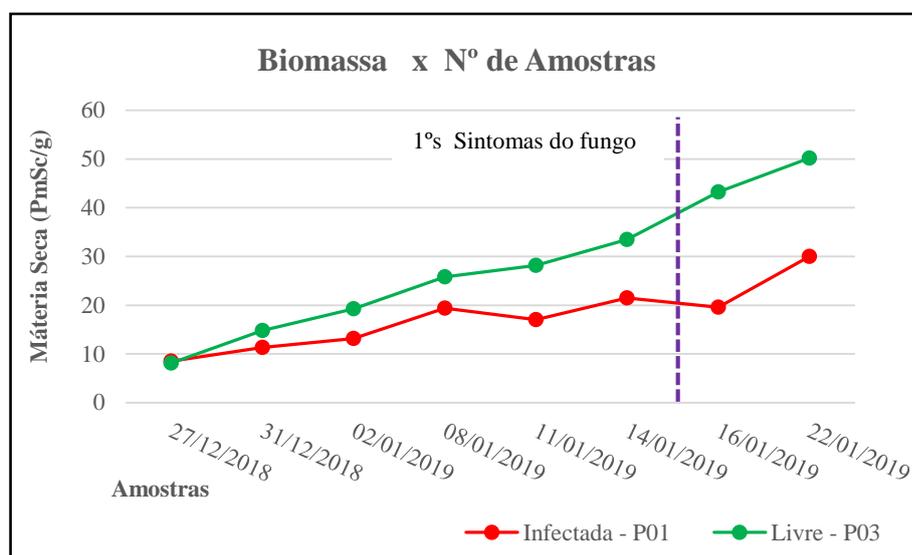
Fonte: O autor (2019).

Soma-se a leitura da variável anterior, a biomassa, a qual está vinculada ao desenvolvimento e capacidade de incorporação de matéria (PMSc/g) nas plantas de soja. Conforme Zilio (2014); Chagas et al. (2017) a biomassa da parte aérea e raiz pode apresentar diferença de peso em plantas submetidas a stress hídrico, ataque de insetos e demais agentes patológicos. Estima-se que a redução de 20 % de peso de matéria seca, em relação ao desenvolvimento considerado normal de uma planta de soja, está vinculada a fatores de stress na planta, Embrapa (2010), Zilio (2014). Em

acordo Lima (2011); Braga Junior et al. (2018) manifestam que existe uma ampla influência de microrganismos sobre o desenvolvimento das plantas, podendo ser restritivos (*Phakopsora pachyrhizi*) ou atenuantes com efeitos benéficos na germinação e desenvolvimento de culturas dependendo do contexto em que se encontram inseridos. Em face disso, os indivíduos foram coletados aleatoriamente dentro de cada área de estudo, identificados e levados ao laboratório para secagem e pesagem conforme metodologia expressa no capítulo 3.

No transcorrer das coletas a biossima incrementou seu peso nas duas condições avaliadas (Infectada-P01 e Livre de Infecção-P03) das áreas de estudo, dados de campo obtidos na fase pré-sintomática apontam situações distintas para P01 (infectada) e P03 (livre). A área infectada apresenta pouca variação em seus valores entre os dias 08/01/2019 e 16/01/2019, situação distinta é apontada na amostra P03 (livre) com crescimento da massa seca no mesmo período de avaliação. A queda na incorporação de biomassa em P01 possivelmente ocorreu devido aos menores índices de clorofila, o que compromete a capacidade da soja em absorver radiação eletromagnética, dispondo por esse meio, de menos energia acumulada necessária ao processo fotossintético. Essa constatação está ancorada na deficiência do pigmento de clorofila, verificável nos dados apresentados na Figura 24 (anterior) em P01-Infectada. O reflexo dessa condição também pode ser percebido ao observar o comportamento do processo de incorporação de biomassa ao longo do desenvolvimento das plantas de soja. Após o surgimento da doença nas estruturas foliares a área infectada retoma o crescimento, porém os valores são relativamente menores se comparados as áreas livre conforme se pode observar na Figura 25.

Figura 25 – Índices de Biomassa registrados nas áreas de estudo a longo das campanhas.



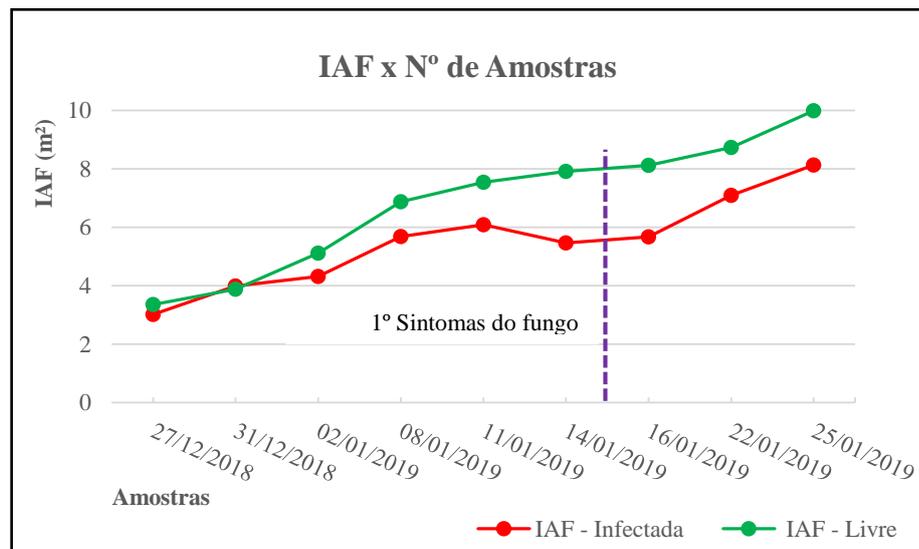
Fonte: O autor (2019).

Nesse cenário, agregou-se a clorofila “b” e a biomassa analisadas anteriormente o Índice de Área Foliar (IAF), este foi coletado e investigado consoante a metodologia exposta anteriormente. Os índices de área foliar representam as condições da vegetação monitorada, a importância de seu acompanhamento se fundamenta no fato de que a produção primária de uma cultura tem estreita relação com a energia solar absorvida, o que define, em grande parte, o sucesso do desenvolvimento das comunidades vegetais Fontana et al. (1998), Da Silva et al. (2009).

Deste modo, o IAF emerge como um importante parâmetro de leitura das condições de desenvolvimento da vegetação, o qual, nos últimos 20 anos, tem sido empregado em diversas pesquisas para a estimativa do potencial vegetativo de culturas como soja, milho e cana-de-açúcar, Picoli (2009), Liu et al. (2016). Nesse contexto, avaliou-se as alterações nos índices de Área Foliar, a Figura 26 que segue aponta modificações entre as coletas de 11/01/2019 e 16/01/2019, os valores das áreas infectada-P01 entraram em declínio no intervalo considerado, enquanto os valores da área livre-P03 registraram dados crescentes no decorrer do mesmo

período. Após o tratamento a área infectada recupera sua área foliar, claramente observado nas campanhas após o dia 25/01/2019. Entretanto pode-se averiguar que a área infectada não atinge os mesmos valores foliares ao longo do ciclo, com isso, compromete o desenvolvimento da planta e o seu potencial produtivo. Os registros de IAF acompanham a tendência dos dados biofísicos expostos anteriormente, os mesmos demonstram que a perda de clorofila influencia na incorporação de biomassa e formação de novas folhas, aparentemente pela mobilização imunológica necessária a planta para combater a ação inicial do agente infeccioso. Vale lembrar que o foco da pesquisa está voltado a fase pré-sintomática, no entanto optou-se por registrar as alterações nessa área após o surgimento dos corpos de frutificação. A Figura 26 que segue ilustra os resultados obtido durante as campanhas.

Figura 26 – Valores de índice de área foliar (IAF) registrados nas áreas de estudo



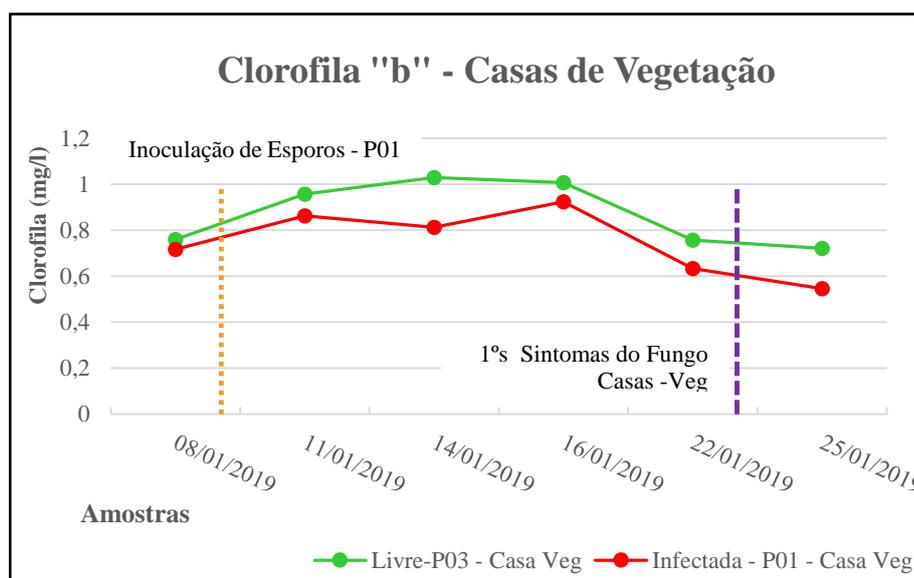
Fonte: O autor (2019).

Paralelo as atividades de campo, foram coletados os dados de clorofila “b” das plantas de soja que se encontravam nas casas de vegetação. Seguiu-se um padrão semelhante aos trabalhos desenvolvidos a campo, no entanto, nessa etapa da investigação não foram registradas amostras de biomassa e nem de Índice de Área Foliar, tendo em vista que o método adotado era destrutivo e havia um reduzido

número de indivíduos disponíveis para pesquisa nessa condição de cultivo. A Figura 27 demonstra valores distintos de clorofila "b" para as diferentes condições de cultivo, esse comportamento se repete ao longo da campanha.

As atividades desenvolvidas nas casas de vegetação contaram com um incremento (intencional) no número de esporos sobre as superfícies das folhas das plantas de soja em P01-Infetada (linha laranja pontilhada na figura 27). Para tanto foram inoculados em 10/01/2019, sobre as superfícies foliares dos indivíduos em P01, uma solução contendo esporos em suspensão (0,04 ml por folíolo de soja em média). Sequencialmente foram coletadas novas amostras em 11/01/2019 e, por este meio, constatou-se que o acúmulo de esporos na superfície das folhas não altera os valores de clorofila. Os primeiros sintomas da doença foram identificados na casa de vegetação em P01 em 23/01/2019 (linha roxa tracejada na figura). A queda geral dos índices de clorofila acompanhou os resultados obtidos a campo no período pré-sintomático conforme se pode observar na Figura seguinte.

Figura 27 – Valores de clorofila extraídos nas casas de vegetação



Fonte: O autor (2019).

Nesse cenário, por meio da análise das variáveis biofísicas, constata-se que a ação, mesmo que inicial do fungo *Phakopsora pachyrhizi*, ocasiona uma considerável restrição das atividades fotossintéticas, uma vez que seu crescimento entre os tecidos foliares promove a destruição dessas estruturas, acentuando a possibilidade de desfolha precoce da planta de soja. Essa afirmação acorda com as ideias de Juliatti et al. (2004); Ugalde (2005); Shimabukuro et al. (2009); Ponzoni et al. (2012); Florenzano (2016) no momento em que os autores relatam que com a evolução do ciclo fenológico da planta, as atividades de fotossíntese e demais funções fisiológicas são comprometidas e a perda destas funcionalidades podem levar a significativos prejuízos no processo de produção principalmente se infecção ocorrer próximo ao enchimento dos grãos.

De modo geral constatou-se, com as atividades de campo e as desenvolvidas nas casas de vegetação, que houve um aumento repentino e significativo no número de esporos no período pré-sintomático. Nesse mesmo intervalo de tempo foram identificadas quedas nos valores de clorofila "b" em ambas as áreas de estudo e em diferentes pontos de coletas de dados. Esse evento antecedeu a formação das pústulas na da cultura da soja, a inspeção dos dados de biomassa e IAF apresentaram menor capacidade de incorporação de biomassa nas estruturas vegetais e menor cobertura foliar nas áreas infectadas pela doença. Nesse sentido a presente investigação destaca que as perdas de valores das variáveis biofísicas (Chl"b", Biomassa, IAF) no intervalo assintomático e o incremento de esporos na atmosfera apontam para condições predisponentes que viabilizam o processo de infecção pela ação do fungo *Phakopsora pachyrhizi* e permitem a ocorrência da doença. Assim, as variáveis biofísicas são importantes indicativos que devem ser monitorados com a finalidade de comporem dados que permitam a correta tomada de decisão no sentido de promover o adequado manejo das aplicações de fungicidas para que se possa conter o sistema epidêmico da doença.

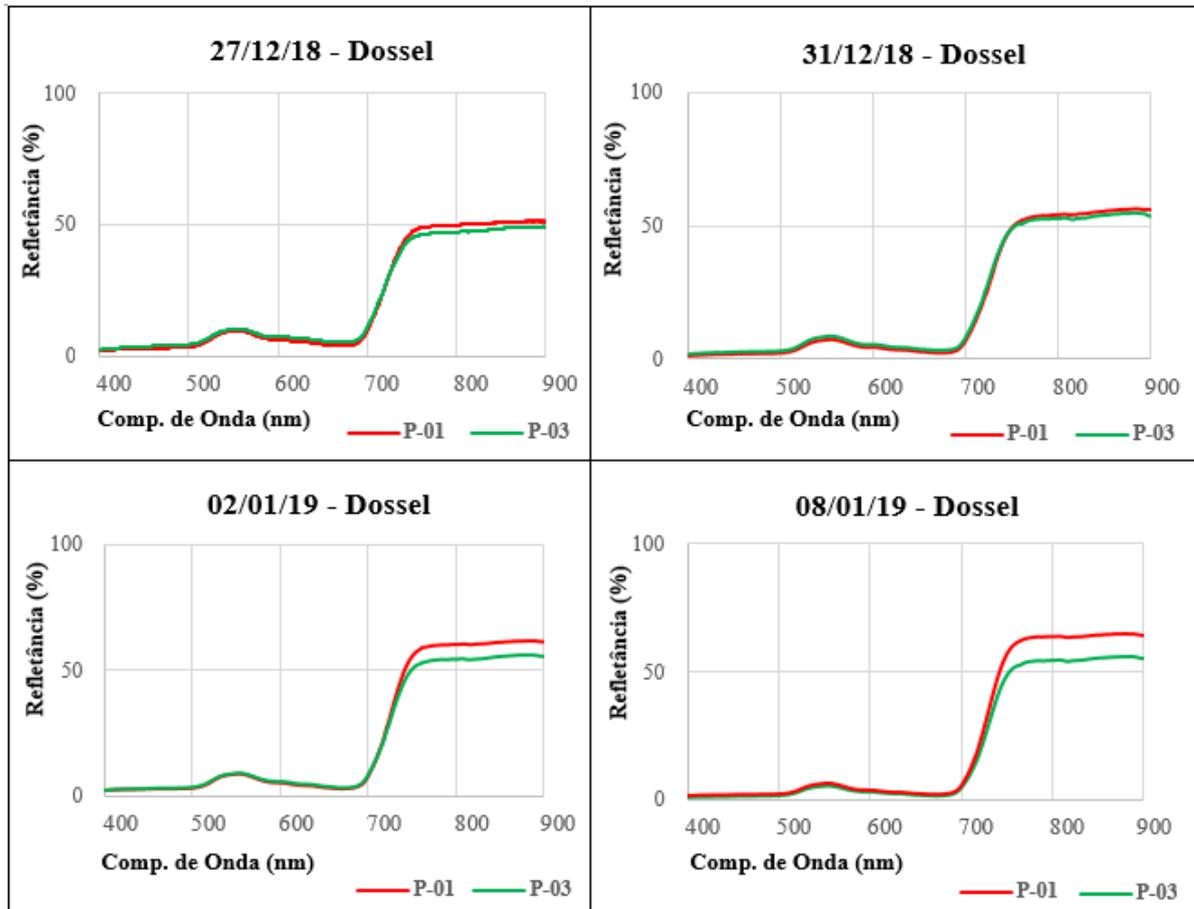
4.3 Espectros de Refletância do Dossel Obtidos a Campo

Os produtos do sensoriamento remoto (SR) são aplicados nos mais variados campos do conhecimento, a radiometria espectral tornou-se uma área importante do

SR que permite a efetivação de atividades em laboratório ou a campo. Por esse motivo, os dados da refletância têm sido utilizados com a finalidade de identificar a fração fotossinteticamente ativa bem como suas relações com o desenvolvimento de plantas de interesse comercial tais como, videiras, cana de açúcar, milho e soja. A agricultura de precisão tem utilizado as propriedades da refletância, em faixas específicas do espectro eletromagnético, para avaliar as transformações ocorridas oriundas da interação da vegetação com a energia eletromagnética (REM). Para tanto, utilizam as faixas do visível e infravermelho próximo (NIR - Near Infrared), regiões do espectro que permitem identificar detalhes do desenvolvimento vegetal e que atendem a distintos interesses da ciência e da agricultura de precisão, Atzberger (2013); Mcbratney et al. (2013); Shiratsuchi et al. (2014).

Os índices espectrais foram obtidos a partir da média de dez leituras efetivadas em três diferentes pontos de cada área amostral (P01-Infected e P03-Livre), o valor médio foi tomado como a curva característica de cada uma das parcelas em estudo. A Figura 28 apresenta a refletância espectral de dosséis da cultura de soja das missões compreendidas entre os dias 27/12/2018 e 08/01/2019 nas áreas de estudo a campo. Inicialmente expõe apenas o comportamento espectral característico de vegetação verde saudável com alguns traços de interferência do solo exposto (27/12/2018), condição essa pertinente ao período de desenvolvimento vegetativo considerado "V6". Isso ocorreu tendo em vista que o plantio das áreas foi efetivado no dia 15/11/2018 e no momento da coleta as plantas estavam com quarenta e dois dias de desenvolvimento. A descrição dos estádios de desenvolvimento vegetal está em consonância com a proposta por Fehr e Caviness (1977), estes compreenderam, durante o período de amostragem, os estágios identificados **entre V6 a V9 (vegetativo) e R1 a R4 (reprodutivo)**.

Figura 28 – Refletância espectral da soja (Dossel) – 27/12/2018 a 08/01/2019.



Fonte: O autor (2019).

Os espectros das áreas de estudo em 31/12/2018, quatro dias após a coleta anterior, expõem feições espectrais em que ainda se identificam as características da vegetação verde saudável. Na faixa do infravermelho próximo há um pequeno aumento de refletância, no entanto a condição P01 - infectada atinge valores na ordem de 3% maiores em comprimentos de onda adjacentes a 750 nm. A expressão da REM acima 760nm expõe claramente a influência do substrato e fatores associados ao desenvolvimento da vegetação, essa condição é possivelmente atribuída às alterações metabólicas ocorridas pela planta de soja pois a mesma se encontrava em transição entre os estágios vegetativos V7 para V8.

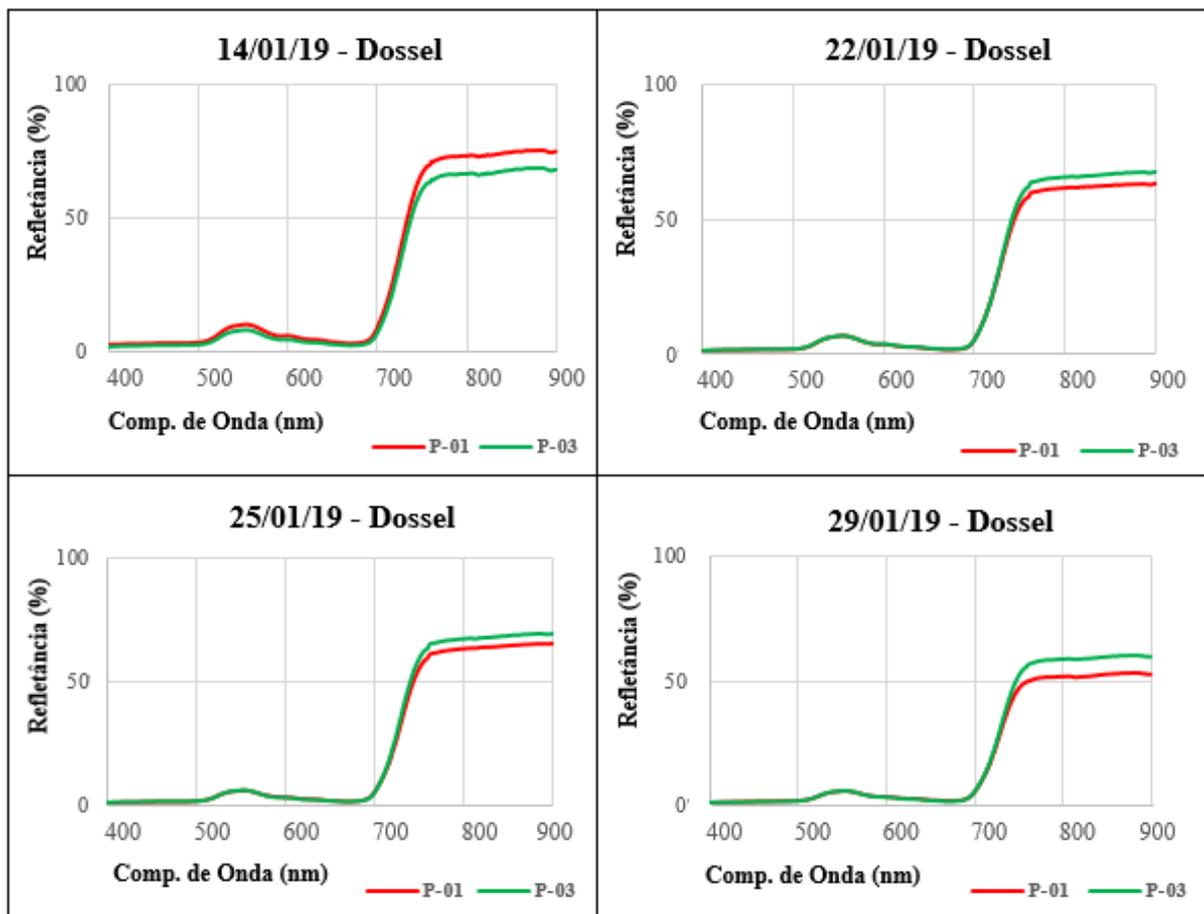
Alterações significativas são percebidas no comportamento espectral da vegetação no dia (02/01/2019), a área infectada mantém maior refletância ao longo do infravermelho próximo (750nm, 5 a 6% maior). Destaca-se que essa região do espectro geralmente sofre modificações pela ocorrência do estresse oriundo da ação de insetos, bactérias e fungos, o que promove mudanças na resposta espectral deslocando levemente o pico de refletância do (NIR) em função da depreciação dos pigmentos foliares e das alterações metabólicas ocorridas na planta em face da ação do agente agressor, Junges et al. (2017). Esse resultado acorda com os experimentos elaborados por Martins e Galo (2015) em pesquisas desenvolvidas em lavouras de cana de açúcar com a finalidade de discriminar espectralmente plantas saudáveis e plantas infectadas por nematoides. Os autores apontaram a região do (NIR) como a mais indicada para a análise da resposta espectral do dossel de plantas adoecidas. Vale salientar que as plantas se apresentavam na transição do estágio V8 para V9 e a interferência do solo na leitura radiométrica dessas amostras eram quase inexistentes pois os dosséis das plantas de soja estavam praticamente fechados.

Em 08/01/2019, seis dias após a coleta anterior (estágio vegetativo R1) fato ocorrido devido ao período prolongado de chuva que inviabilizou as amostragens em datas anteriores a esta, se apresentam feições espectrais que possuem características distintas da vegetação verde saudável em relação à área infectada-P01. Na região do infravermelho próximo observa-se um aumento geral nos valores de refletância, porém mais acentuados acima de 750nm onde a P01-infectada apresenta valores em torno de 4% maior do que a coleta em 02/01/2019. Ao comparar as áreas em P03 e P01 na amostragem do dia 08/01/2019 a refletância alcança uma diferença significativa de 10% entre os valores obtidos. Embora ainda não tenha sido constatada a presença do fungo visível à folha, ocorreram fortes indícios, nos espectros de refletância (**sete dias antes das primeiras pústulas percebidas em 15/01/2019**), os quais nos levam a inferir que são decorrentes da atuação do parasita na planta.

A figura 29, abaixo representada, expõe os espectros representativos do dossel da vegetação das amostras obtidas entre os dias 14/01/2019 (estágio vegetativo-R3) e 29/01/2019. A coleta do dia 14/01/2019, um dia antes da constatação das primeiras pústulas visíveis a folha (15/01/2019), apresenta novas alterações no espectro de refletância ocorridas na área Infectada-P01. Nesta área, identificou-se um incremento

significativo da refletância no intervalo do NIR, 10% de aumento com relação a amostra do dia 08/01/2019. Ainda que não se tenha identificado a presença do *Phakopsora pachyrhizi* visível à folha, os indícios percebidos nos espectros de refletância acentuam a condição da eminente infecção decorrente da ação do parasita na planta.

Figura 29 – Refletância espectral da soja (Dossel) – 14/01/2019 a 29/01/2019.



Fonte: O autor (2019).

Nesse sentido, as condições expostas no NIR em 14/01/2019 com valores maiores identificados na área Infectada-P01 (acima de 760nm) é fato é anunciante do crescimento fúngico no mesófilo lacunoso, pois essa é uma região entre as duas faces da epiderme foliar caracterizada pela presença de cloroplastos e por um grande

volume de espaços intercelulares preenchidos com água e gases. Em diversas plantas se diferenciam em parênquima clorofiliano, o paliçádico e o lacunoso, principalmente em dicotiledôneas como a soja. A forma e o arranjo das células desse tecido são atributos que propiciam condições favoráveis de interação dos cloroplastos com a luz bem com o espaço adequado para o crescimento das hifas do fungo causador da ferrugem asiática da soja, Taiz e Zeiger, (2013).

Resultados semelhantes foram obtidos por Saito, Imai e Tommaselli (2013), os autores exploraram as diferenças das respostas espectrais na região do visível e infravermelho próximo para identificar e caracterizar a ação do fungo da ferrugem alaranjada em plantas de cana de açúcar. Usando videiras para sua investigação Pithan et al. (2019) apontaram a região do visível e (NIR) para caracterizar plantas saudáveis e infectadas por diferentes espécies de fungos em plantações na serra gaúcha. Assim, o leve aumento da refletância no visível associado ao incremento significativo de valores no NIR da área infectada, apontam para a condição que expõe a proliferação do fungo nos mesófilos foliares da soja. Com isso, a ocorrência da perturbação causada pela ação fúngica promove mudanças na resposta espectral dos dosséis e o aumento da energia refletida no infravermelho próximo ocorre devido à degeneração das membranas celulares nos mesófilos durante a expansão do parasita, Fontaine et al. (2016); Junges et al. (2017).

Na amostra do dia 22/01/2019 a refletância da vegetação (soja) demonstra feições extraídas sete dias após a constatação da presença do fungo na folha da soja (15/01/2019). Isso aconteceu devido a novos episódios de precipitação prolongada o que inviabilizou a amostragem a campo nesse intervalo de tempo. A área em P03-livre não expõe variações consistentes no espectro de refletância, comportamento distinto é verificável em P01-infectada, a qual apresenta feições diferentes principalmente em comprimentos de ondas superiores a 750nm. Nessa região (NIR) os valores expressos estão na ordem de 12% menores do que a amostra anterior em P01-Infectada. Essa queda dos valores espectrais no infra-vermelho são atribuídas à presença expansiva do fungo, esse resultado está em consonância com os níveis de severidade elaborados por Cui et al. (2009) e Arantes et al. (2019). Conforme os autores, em plantas com sintomas visíveis a folha, os valores de refletância compreendidos de 70% para 60% estão na zona de transição do estágio médio para severo de infecção respectivamente.

Paralelo a missão de campo do dia 25/01/2019, efetivou-se na área livre de infecção-P03 o tratamento químico com fungicidas a fim de conter possíveis investidas do fungo nas estruturas vegetais (prática essa realizada a cada 15 dias). A área escolhida para ser o testemunho absoluto (Infectada – P01) permaneceu sem tratamento químico e apresentou redução nos percentuais de refletância ao longo do infravermelho próximo conforme o esperado. Nesse contexto, vale lembrar que as feições espectrais das coletas anteriores, em especial a do dia 08/01/2019, quarta leitura, expuseram registros espectrais relacionados à presença e expansão do processo de infecção, portanto **sete dias antes** da emergência fúngica na face abaxial da folha da soja. Desse modo, pode-se inferir que as medidas hiperespectrais registram o processo de deposição de esporos bem como a contaminação da ferrugem da soja principalmente no vermelho e infravermelho próximo. Em consequência disso, é possível, nestes intervalos espectrais, caracterizar a presença e expansão do fungo causador da ferrugem asiática mesmo em fase pré-sintomática, ou seja, antes do surgimento das primeiras pústulas que o torna visível a olho nu e lhe confere a capacidade de dispersão e novos esporos na atmosfera.

Os índices extraídos na coleta de campo ocorrida em 29/01/2019 registram que a área livre de infecção-P03, após a aplicação de fungicida, retoma as feições da vegetação verde saudável ao longo do espectro eletromagnético. Diferente condição é identificada nos pontos infectados-P01, os quais apontam nova queda nos índices de refletância na região do infravermelho próximo, local em que os valores expressos estão na ordem de 11% menores do que a amostra anterior em P01-Infectada em 22/01/2019. Essa queda dos valores espectrais no infravermelho são indícios à presença expansiva do fungo entre os espaços do parênquima lacunoso das folhas que compõem o dossel. Vale salientar que desde a amostra do dia 14/01/2019 as áreas infectadas acumulam quedas na região do NIR. Esta situação está em acordo com a literatura e coincidente com as verificações de campo.

Em conformidade com os resultados obtidos a campo com o emprego do SR hiperespectral, pode-se inferir que a leitura de dosséis em lavouras de soja infectadas por fungos causadores da ferrugem asiática permite discriminar plantas em diferentes condições sanitárias, mesmo que estejam no período assintomático de desenvolvimento do agente agressor *Phakopsora pachyrhizi*. Nesse cenário, conclui-se que o SR é capaz de gerar informações para lavoura que podem ser obtidas de

forma rápida e de modo não-destrutivo. Com isso, permite a obtenção e tratamento dos dados de campo que tem efetivo potencial para auxiliar os tomadores de decisão no manejo e gerenciamento de insumos capazes de combater essa doença com maior eficácia e precisão. Sendo assim, a exposição das leituras das refletâncias dos dosséis da cultura da soja visa reforçar a importância da implementação de atividades que, como esta, buscam angariar recursos técnicos capazes de otimizar, permitir e validar meios eficazes que podem auxiliar de maneira relevante nos processos de produção.

Nesse cenário, a agricultura de precisão caminha em direção a implementação de técnicas menos invasivas que permitem utilizar com exatidão abordagens científicas modernas associadas aos conhecimentos tradicionalmente conhecidos. Nesse sentido, o sensoriamento remoto consolida-se como um instrumento de informação para uma produção agrícola inteligente que possui elevado potencial para viabilizar a otimização de recursos, aumento da produção e preservação do meio ambiente.

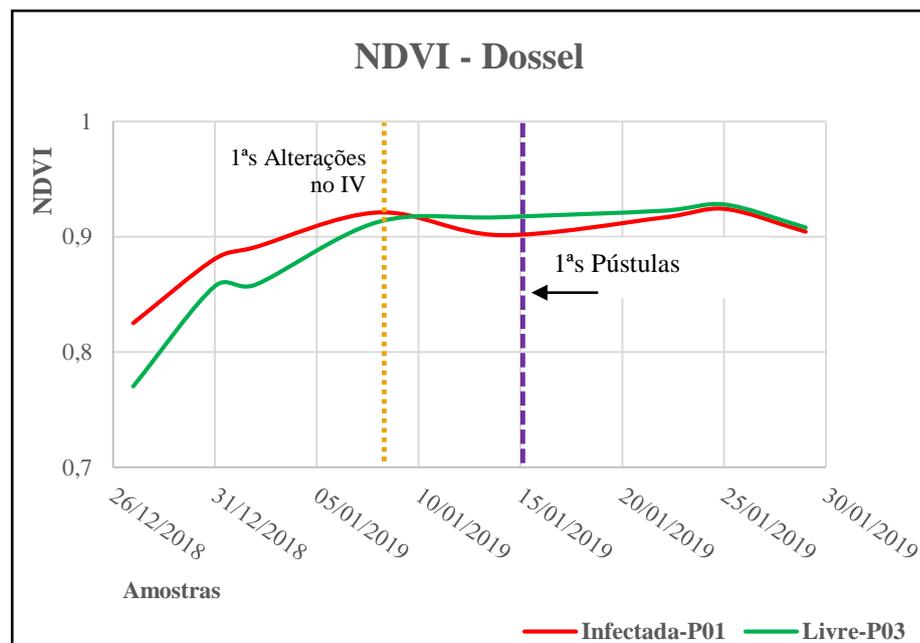
4.4 Avaliação da Soja com Aplicação de Índices de Vegetação Espectral

Os índices de vegetação possuem a finalidade de ressaltar a resposta espectral da vegetação por meio de combinações lineares de regiões espectrais específicas do vermelho e infravermelho próximo, Cattabi et al. (2015). Segundo Huete et al. (2002); Breunig et al. (2011); Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich (2012) os IVs são diretamente relacionados a parâmetros como biomassa, clorofila; cobertura vegetal e o índice de área foliar, características estas avaliadas durante o desenvolvimento da presente investigação que apontam para consistentes modificações metabólicas da soja durante a deposição de esporos e crescimento das hifas do fungo no período assintomático da doença. Nesse contexto, estabeleceu-se com os dados espectrais coletados nos dosséis da soja o NDVI, para tanto utilizou-se os comprimentos de onda 650nm no vermelho e 750nm no infravermelho próximo, Rouse et al. (1974). A Figura 30 abaixo apresenta os perfis temporais médios de NDVI coletados por meio do sensor hiperespectral *FildSpec 3*. Inicialmente as curvas apresentaram o

comportamento típico da cultura de soja visto que os valores de NDVI são baixos e aumentam à proporção que a planta cresce e atinge estágios vegetativos mais avançados. Conforme o ciclo vegetal avança, a planta reduzirá seu vigor vegetativo atingindo a fase senescência e fazendo com que os valores do NDVI diminuam próximos aos valores iniciais do ciclo.

Relações fotossintéticas normais foram identificadas para ambas as áreas de estudo até o dia 08/01/2019 (linha pontilhada laranja - Figura 30), a partir desta data os registros de NDVI para P01- Infectada entram em queda (0,91 para 0,89) ao passo que a área tratada apresenta uma relativa estabilidade até 24/01/2019, data em que recebeu novo tratamento preventivo. Vale salientar que a perda gradual dos valores de NDVI ocorreram sete dias antes (08/01/2019) da constatação das primeiras pústulas identificadas a olho nu na área P01 (15/01/2019 - linha roxa tracejada - Figura 30) e tiveram seus menores índices no período que antecede esse evento.

Figura 30 – NDVI registrado durante as campanhas nas áreas de estudo.

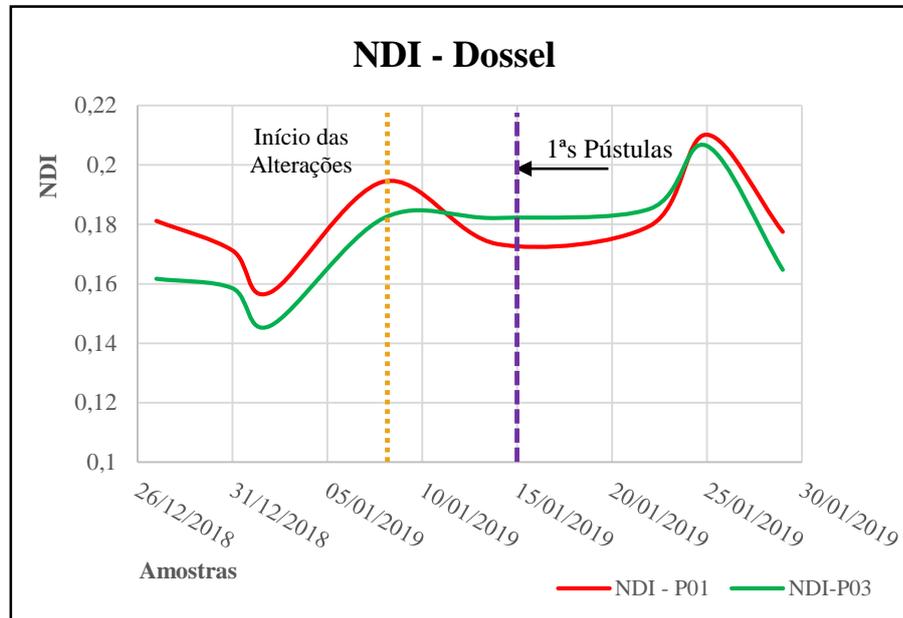


Fonte: O autor (2019).

Cabe salientar que não havia diferenças de ciclo entre as áreas de estudo (plantadas na mesma data) uma vez que tal diferença poderia influenciar diretamente na composição dos índices de vegetação uma vez que apresentariam distintos valores de pigmentos fotossintéticos ocasionados pelo diferente desenvolvimento vegetativo. Desse modo, para efeito de comparação, os estádios de desenvolvimento eram comuns para ambas as áreas (P01-Infecteda e P03-Livre) pois fenologicamente possuíam características semelhantes. Esse aspecto da soja condicionada nas áreas de campo foi avaliado com a aplicação de um IV específico, assim optou-se por aplicar o NDI (Normalized Difference Index,) índice voltado a percepção das alterações no pigmento de clorofila oriundos de alterações metabólicas das plantas em condições de estresses. Esse índice de vegetação é expresso pela relação entre a diferença dos comprimentos de onda do verde pela soma dos mesmos ($NDI = \frac{550-531}{550+531}$), Zarco Tejada et al. (2001).

As primeiras amostras registram valores menores, isso ocorre visto que nas coletas iniciais as plantas de soja se encontravam em “V6”, crescimento típico da cultura para data considerada. Os valores de NDI são baixos e aumentam à proporção que a planta ganha novos estágios vegetativos, fato importante ocorreu na data de 08/01/2019, tal qual como a queda de atividades fotossintéticas registradas no NDVI (Figura - 30). As atividades metabólicas expressas pela ação dos pigmentos também registraram alterações na referida data (**linha pontilhada laranja**) com queda nos índices de 0,19 para 0,17, tais modificações se prolongaram até o dia 22/01/2019. A área em P-03 Livre não expõe mudanças significativas para o mesmo período de amostragem de dados, conforme se pode perceber na figura 31.

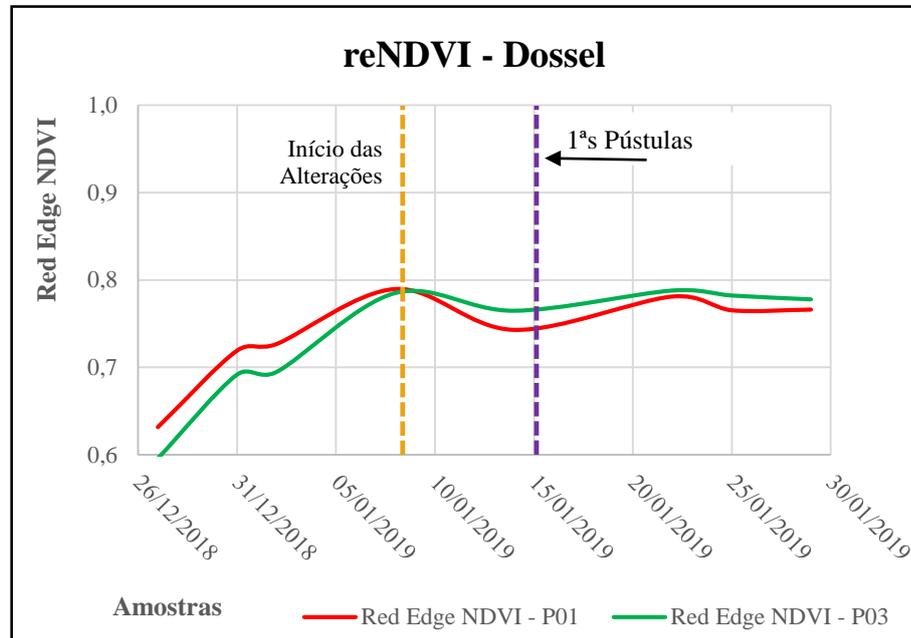
Figura 31 – Normalized Difference Índice (índice de diferença Normalizada)



Fonte: O autor (2019).

A diferença normalizada de borda vermelha (re-NDVI) tem sido utilizada em pesquisas que visam a identificação de modificações estruturais, fisiológicas e metabólicas que afetam o desenvolvimento de plantas. Isso incluiu as diferenças na posição do comprimento de onda da borda vermelha e dos valores de refletância compreendidos entre as faixas de (650-750 nm), Gitelson et al. (2002), Ahamed et al. (2011). Nesse contexto, aplicou-se o reNDVI com base nos dados de refletância de dossel das áreas de campo. Os índices registrados apontam para alterações nos valores de Red edge-NDVI, a queda os valores (0,78 para 0,74) coincidem com a data identificada nos demais IVs aplicados nessa investigação (08/01/2019 área P01-Infected). A área P03-Livre apresenta pouca variação nos valores deste IV e, tal como no NDVI (750nm-650nm), expõe dados relativamente estáveis. A Figura 32 registra os valores identificados durante as campanhas.

Figura 32 – Valores da diferença normalizada de borda vermelha (Red Edge-NDVI)



Fonte: O autor (2019).

Com base na análise direta dos resultados identificados pela aplicação dos IVs pode-se inferir que o NDVI, re-NDVI e NDI são indicadores que devem ser considerados para a tomada de decisão, principalmente com relação a escolha de qual melhor momento realizar a aplicação do fungicida na cultura da soja a fim de prevenir e/ou combater a ferrugem asiática. Vale lembrar que para resultados mais precisos, é primordial que pesquisas futuras aumentem a frequência das leituras dos IVs aqui apresentados com um número maior de tomada de dados entre as parcelas Livre e infectada.

4.5 Testes de Correlação Linear entre os Índices de Vegetação Espectral (dossel) e as variáveis biofísicas

A mensuração de características que envolvem o processo de desenvolvimento de plantações comerciais tornou-se importante para maximizar as informações de áreas de interesse. Em programas de acompanhamento de doenças, de plantio/produção e de melhoramento genético de plantas, o estudo das relações lineares entre as variáveis pode fornecer resultados importantes, especialmente na identificação de caracteres que possam ser aplicados como subsídios para o gerenciamento de recursos e tomada de decisão. Nesse sentido, a correlação linear de Pearson (r) (estatística utilizada para medir a intensidade, a força ou o grau de relação linear entre duas variáveis consideradas) pode fornecer informações que contribuem para o acompanhamento de processos relacionados ao desenvolvimento vegetal, Ferreira, (2009); Galarça et al. (2010); Cargnelutti Filho et al. (2010).

Nesse contexto, com base nos valores obtidos com a aplicação dos IVs e das estimativas de cada uma das variáveis biofísicas, foram realizados testes estatísticos a fim de identificar o grau de relação entre os dados bem como o índice de vegetação de melhor desempenho. Todos os valores das variáveis foram submetidos ao teste e obedeceram a distribuição normal pois atingiram pvalor $p > 0,05$.

A partir dessa constatação elaborou-se as matrizes de correlação linear de Pearson (r) e matriz de P valor a 5% de probabilidade. Em vista dos resultados identificados optou-se por apresentar o IV de melhor desempenho, os demais foram representados e interpretados por meio de uma tabela onde se encontram os valores obtidos com a aplicação dos referidos testes estatísticos. A tabela 1 apresenta o os valores das correlações entre o NDVI nas faixas de 650 nm a 750 nm e os dados de clorofila “b” (Chlb), índice de área foliar (IAF) e biomassa identificados na **área infectada-P01**. A matriz de correlação apontou que houve associação linear significativa ao relacionar o IV com IAF e Biomassa com os valores de $r = 0,78$ e $r = 0,71$ e p-valor $p = 0,02$ e $p = 0,04$ respectivamente. Os resultados são estatisticamente significativos, pois determinam uma forte correlação positiva entre estas variáveis uma vez que alcançaram valores superiores a $r = 0,70$ e p valor inferior para 0,05 para IAF e biomassa. Situação diferenciada foi identificada ao correlacionar a clorofila “b”, a

qual registrou $r = 0,58$ e p-valor superior a $p = 0,05$ ($p = 0,16$), portanto existe uma correlação moderada entre as variáveis, mas não são estatisticamente significativas. Essa condição possivelmente é atribuída a ação inicial do *Phakopsora pachyrhizi* nas estruturas do dossel visto que o fungo consome parte da clorofila durante a implementação do sistema epidêmico nas plantas de soja. Esta característica modifica a quantidade disponível de pigmentos fotossintéticos e por consequente altera as relações fotossintéticas da planta.

Tabela 1 - Matriz de correlação entre NDVI e variáveis biofísicas em P01-Infectedada

Matriz de Correlação: Pearson				
Dados do Processo	Chl - P01 Infect	IAF – P01	Biomassa - P01	NDVI – P01
Chl-P01- Infect	1	0,2200	0,0202	0,54
IAF – P01	0,2200	1	0,9048	0,78
Biomassa – P01	0,0202	0,9048	1	0,71
NDVI-Infect-P01	0,5463	0,7815	0,7192	1
Matriz de P-Valores				
Dados do Processo	Chl - P01 Infect	IAF – P01	Biomassa - P01	NDVI – P01
Chl-P01- Infect	1	0,6006	0,9620	0,1612
IAF – P01	0,6006	1	0,0020	0,0220
Biomassa – P01	0,9620	0,0020	1	0,0443
NDVI-Infect-P01	0,1611	0,0219	0,0443	1

Fonte: Action 3.0 (2019).

Os valores das correlações entre o NDVI e os dados de clorofila “b”, (IAF) e biomassa obtidos das amostras da área **Livre-P03**, tabela 2, indicam uma forte correlação entre as variáveis biofísicas e o NDVI. A clorofila “b” apresenta $r = 0,96$, IAF $r = 0,92$ e biomassa $r = 0,86$ com p-valor $p = 0,0004$, $p = 0,030$ e $p = 0,012$ respectivamente. A forte correlação entre as variáveis é possivelmente resultado da boa condição fisiológica em que se encontravam as plantas submetidas ao tratamento preventivo do fungo, preservando com isso os valores adequados dos pigmentos fotossintéticos

e as relações fotossintéticas da planta de soja. Estas inferências são sustentadas pelo fato de que as correlações de Pearson entre os pares da matriz foram significativas e de alta magnitude, pois apontam para uma forte correlação positiva entre as variáveis uma vez que alcançaram valores superiores a $r=0,70$ e p valor inferior a 0,05 para Chlb, Biomassa e IAF, portanto os valores são estatisticamente significativos.

Tabela 2 - Matriz de correlação entre NDVI e variáveis biofísicas em P03-Livre

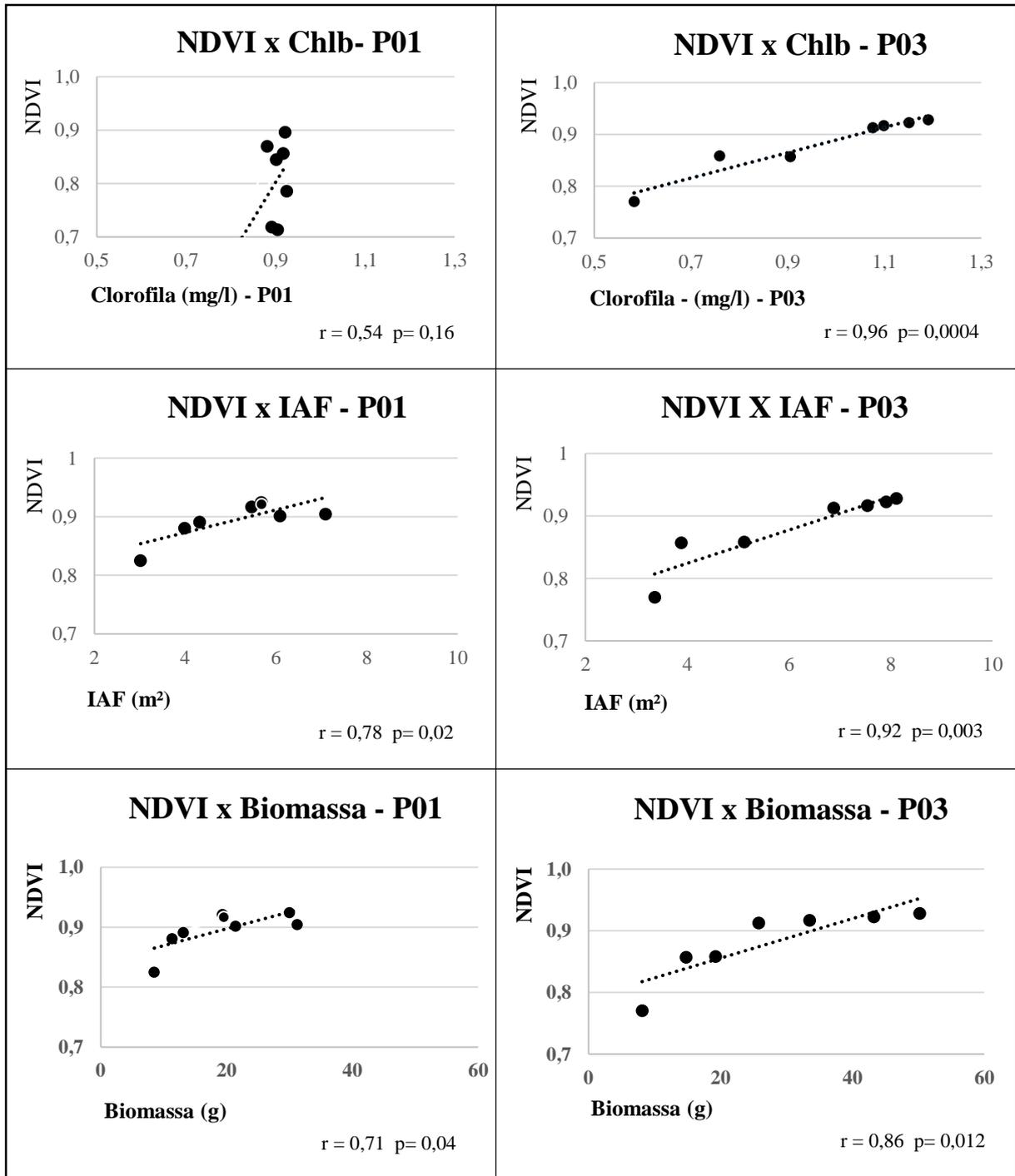
Matriz de Correlação: Pearson				
Dados do Processo	Chl - P03 Livre	IAF – P03	Biomassa - P03	NDVI – P03
Chl–P03- Livre	1	0,9134	0,8904	0,96
IAF – P03	0,9134	1	0,9416	0,92
Biomassa – P03	0,8904	0,9416	1	0,86
NDVI-Livre – P03	0,9671	0,9234	0,8614	1
Matriz de P-Valores				
Dados do Processo	Chl - P03 Livre	IAF – P03	Biomassa - P03	NDVI – P03
Chl–P03- Livre	1	0,00	0,01	0,0004
IAF – P03	0,00	1	0,00	0,0030
Biomassa – P03	0,0071	0,0015	1	0,0127
NDVI – P03	0,0003	0,0029	0,0127	1

Fonte: Action 3.0 (2019).

Os índices expostos nas tabelas 1 e 2 podem ser melhor visualizados na Figura 33, a qual apresenta os diagramas de dispersão com os valores de correlação entre as variáveis biofísica de cada área de estudo e o NDVI. Ao analisar a figura se pode observar que há correlação positiva entre o IV e as variáveis biofísicas de cada área, ou seja, maior será o NDVI à medida que aumentam os valores de biomassa, IAF e Chl “b”. A exceção está contida na área P01-infectada visto que embora se perceba uma correlação moderada $r=0,54$ esse índice não alcança p-valor menor ($p<0,05$) portanto a correlação não é significativa.

Vale lembrar que o valor de p indica se o coeficiente de correlação é significativamente diferente de 0, (coeficiente zero “0” indica que não há relação linear). Quando valor de $p < \alpha$: a correlação é estatisticamente significativa, se o valor p for maior ou igual ao nível de significância $p > \alpha$: a correlação não é estatisticamente significativa, portanto não é possível inferir que a correlação é diferente de 0, Callegari-Jacques, (2003).

Figura 33 – Representação dos diagramas de dispersão para cada área de estudo.



Fonte: Action 3.0 (2019).

A partir das correlações anteriormente descritas, aplicou-se as matrizes de correlação linear de Pearson (r) e matriz de P valor a 5% de probabilidade aos demais

IVs selecionados para o experimento (DNI, reNDVI). Para a interpretação dos dados desses outros índices de vegetação foram analisados a normalidade dos dados com o método de Shapiro-Wilk (menos de 30 amostras). O teste identificou que os dados das variáveis biofísicas e dos IVs foram normais com p-valor maior que 0,05 ($p > 0,05$). Os resultados estão expressos na tabela 3 onde se pode observar que o desempenho do índice de vegetação NDI não apresenta correlações significativas entre este IV e as variáveis biofísicas para ambas as áreas de estudo (P-01 e P03). Os testes estatísticos apontam para associações fracas e moderadas com correlações não estatisticamente significativas conforme se pode verificar pelos valores de p-valor, todos superiores ao nível de significância 0,05.

Na área **infectada-P01** identifica-se que não houve associação linear ao relacionar reNDVI com Clorofila “b” e Biomassa, visto que seus valores apresentam $r = 0,57$ e $r = 0,69$ e p-valor $p = 0,14$ e $p = 0,06$ respectivamente, deste modo os resultados alcançados não são estatisticamente significativos. Diferente condição é expressa pela relação reNDVI com IAF, seus valores demonstram uma forte correlação positiva com $r = 0,81$ e p-valor = 0,02 portanto existe uma boa correlação com associações estatisticamente significativas.

Os resultados das correlações entre o reNDVI e os dados de clorofila “b”, (IAF) e biomassa obtidos das amostras da área **Livre-P03**, tabela 3, indicam uma forte correlação entre as variáveis e o referido IV. A clorofila “b” apresenta $r = 0,96$, IAF $r = 0,91$ e biomassa $r = 0,83$ com p-valor $p = 0,0002$, $p = 0,015$ e $p = 0,010$ respectivamente. Os resultados são estatisticamente significativos, pois apontam uma forte correlação positiva entre as variáveis uma vez que registraram valores (r) maior que 0,50 e p-valor inferior para 0,05.

Tabela 3 - Correlação entre NDI e reNDVI com variáveis biofísicas (P01-Infecteda e P03-Livre).

Descrição	Área	IV	Clorofila b	IAF	Biomassa
Estatística: Shapiro-Wilk	P01	NDI			
P-valor	0,67		0,25	0,82	0,52
Correlação (r)	P01	NDI	0,22 	0,28 	0,52 
P-valor/Correl	P01	NDI	0,60	0,52	0,19
Estatística: Shapiro-Wilk	P03	NDI			
P-valor	0,78		0,20	0,23	0,60
Correlação (r)	P03	NDI	0,67 	0,64 	0,62 
P-valor/Correl	P03	NDI	0,06	0,08	0,09
Estatística: Shapiro-Wilk	P01	reNDVI			
P-valor	0,10		0,25	0,82	0,53
Correlação (r)	P01	reNDVI	0,57 	0,81 	0,69 
P-valor/Correl	P01	reNDVI	0,14	0,02	0,06
Estatística: Shapiro-Wilk	P03	reNDVI			
P-valor	0,08		0,20	0,23	0,60
Correlação (r)	P03	reNDVI	0,96 	0,91 	0,62 
P-valor/Correl	P03	reNDVI	0,0002	0,0015	0,0107
Correlação (r) não significativa (P>0,05) 					
Correlação Forte 					
Correlação Moderada 					
Correlação Fraca 					

Fonte: Action 3.0 (2019).

4.6 Espectros de Refletância Obtidos à Folha nas Casas de Vegetação – *Probe Leaf Clip*

As medidas foram realizadas com o espectrorradiômetro *FieldSpec-3* (Analytical Spectral Devices (ASD), ligado ao acessório *Probe* e com o auxílio do aparato *Leaf Clip*. Este equipamento foi desenvolvido com o objetivo de minimizar os erros associados à luz difusa e cobre as regiões do espectro compreendidas entre 325-1075 nm (visível/NIR) com 1 nm de resolução espectral. O instrumento possui um sensor ativo integrado a sua estrutura e a calibração é realizada com o uso de uma placa

interna do tipo *spectralon*, a mesma é fixa e posicionada frente do sensor, (ASD, 2012). A figura 34 ilustra o instrumento utilizado nas coletas.

Figura 34 – Acessório *Probe* e com aparato *Leaf Clip*.



Fonte: O autor (2019).

Com esse aparato foram obtidas as feições espectrais (casa de vegetação) com a intenção de caracterizar o comportamento espectral de folhas da soja por espectrorradiometria a fim de detectar de alterações decorrentes da ocorrência do fungo *Phakopsora pachyrhizi* no período pré-sintomático. Nesse sentido, várias atividades de pesquisa vêm sendo desenvolvidas visando identificar a interação da energia eletromagnética (R.E.M) com doenças que acometem os diversos tipos de vegetação. Isso ocorre devido ao elevado potencial discriminante da região do visível e do NIR pelos quais se pode identificar informações valiosas de propriedades biofísicas e bioquímicas que afetam as funções vegetais. Essas atividades são possíveis uma vez que as alterações nos arranjos celulares dos tecidos vegetais ou nos processos fotossintéticos, distorcem a interação da REM com a vegetação e, portanto, a refletância de folhas e dosséis, Jensen, (2009); Prabhakar et al. (2012); Fontaine et al. (2016); Mahlein, (2016).

Em consequência disso, a presente pesquisa desenvolveu as leituras em casas de vegetação com auxílio do acessório supracitado, após a semeadura nas estufas os ensaios foram conduzidos quando as plantas se encontravam entre os estágios fenológico V5 a R1. Vale lembrar que os indivíduos foram condicionados em ambientes separados, as plantas testemunhas (P01-sem tratamento químico) foram destinadas propositalmente a casa de vegetação em que se encontravam outras plantas em estágios médio e avançado de desenvolvimento da ferrugem asiática, portanto, totalmente insalubre para as amostras que ali foram inseridas. As plantas que seriam tomadas como “livre de infecção-P03” foram designadas para casa de vegetação que foi previamente preparada a fim de manter o ambiente saudável ao desenvolvimento das plantas depositadas naquele local. As folhas foram analisadas aleatoriamente no sensor hiperespectral com o uso do acessório *Contact probe* acoplado ao *Leaf clip* em acordo com a metodologia supracitada (capítulo 3).

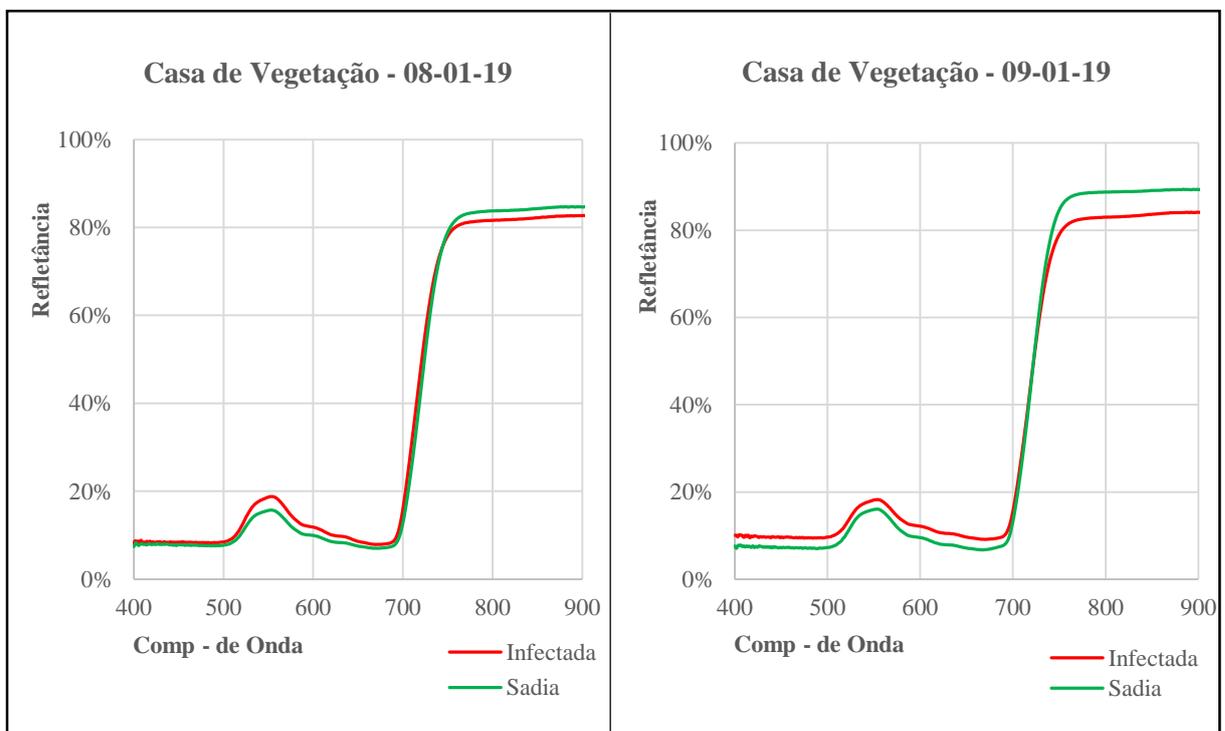
Conforme mencionado anteriormente as plantas da casa infectada-P01 estavam expostas ao agente infeccioso anteriormente a primeira coleta, embora não fosse possível visualizar a folha, o ambiente possuía um número elevado de esporos por haver nesse local plantas em diferentes estágios de desenvolvimento da doença. Com isso, a leitura dos dias 08/01/2019 e 09/01/2019 expõem alterações consistentes nas curvas espectrais na região do visível. Observa-se na Figura 35, sequente, a interferência na resposta espectral da amostra do dia 08/01/2019 (região do verde e do vermelho) em plantas em condições de ataque dos esporos da ferrugem asiática.

A coleta do dia seguinte 09/01/2019 apresenta modificações nas curvas espectrais ao longo do visível com maiores percentuais de refletância nos intervalos do azul (400-500nm) e vermelho (600-700nm) com aumento de 3 a 4% respectivamente. O registro dessa condição constata a perda de absorção nessa região do espectro eletromagnético pelos pigmentos foliares devido ao rearranjo da constituição bioquímica impostos a planta de soja pela presença incipiente do parasita.

As plantas condicionadas na casa de vegetação “livre” P03 expõem na região visível menor refletância, se comparada as amostras em P01, causando a sensação de tonalidade verde normal que observamos na vegetação. A alta absorção do comprimento de onda azul e vermelho é atribuído a maiores concentrações de

clorofilas nas folhas. Fato importante é verificado na região do infravermelho próximo, onde ocorre um aumento significativo da refletância quando comparado à região do visível. De modo geral, maior será o espalhamento interno da radiação incidente e conseqüentemente maior será também a refletância, quanto mais lacunosa for a estrutura foliar. Portanto, esse aumento é devido às propriedades ópticas das folhas decorrente de sua morfologia.

Figura 35 – Refletância Espectral da soja – Casa de Vegetação – 08/01/2019 – 09/01/2019.



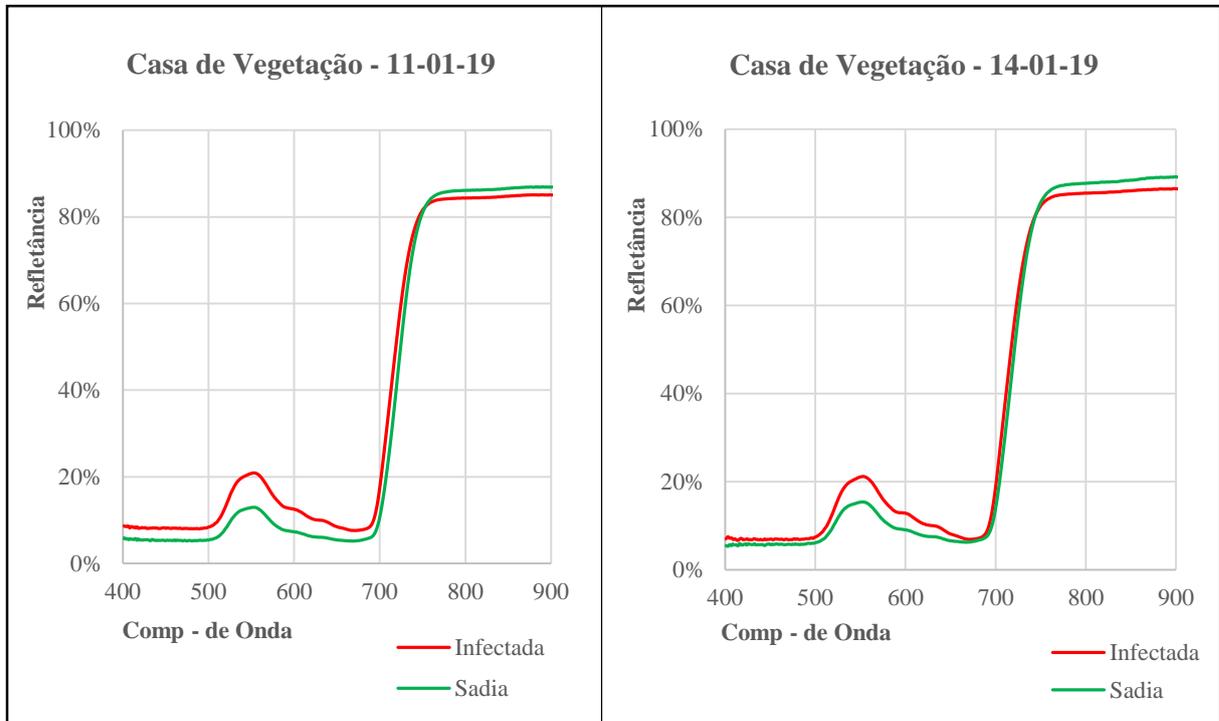
Fonte: O autor (2019).

Na casa de vegetação P01-Infected (em 09/01/2019) foi realizado propositalmente uma inoculação preparada com uma suspensão de esporos de *Phakopsora pachyrhizi*, esse composto foi aplicado com pulverizador manual de 1 litro sobre todas estruturas da amostra. A finalidade deste experimento era identificar a resposta espectral após uma sobrecarga de esporos na superfície das folhas da soja.

Após 48 horas da inoculação foram desenvolvidas as leituras espectrais da folha como se pode observar na Figura 36.

Ao analisar o comportamento espectral da folha (Figura 36) pode-se observar alterações expressivas na refletância na a região visível do espectro eletromagnético. O intervalo do azul (450nm) e principalmente na região do verde (550nm) e do vermelho (630nm) aumentaram os valores 4 a 5% em média no dia 11/01/2019 se comparado as coletas anteriores. Ao comparar as amostras da casa de vegetação P01 com as P03, na mesma data, a diferença aumenta para 11% no intervalo do verde e entre 4 e 5% na maioria dos comprimentos de onda do vermelho. Quanto aos dados de refletância do dia 14/01/2019, apresentam curvas espectrais parecidas com as da coleta anterior em P01, apenas a região do azul registra mudanças significativas com perda de aproximadamente 4% da refletância nesta região do espectro eletromagnético. As leituras da casa de vegetação em P03-livre (ambas as amostras) seguem com a resposta espectral da vegetação verde saudável, tal como as anteriores, não apresenta sintoma de infecção pelos esporos do fungo e não expõe curvas espectrais com alterações consideráveis.

Figura 36 – Refletância Espectral da soja – Casa de Vegetação – 11/01/2019 – 14/01/2019.



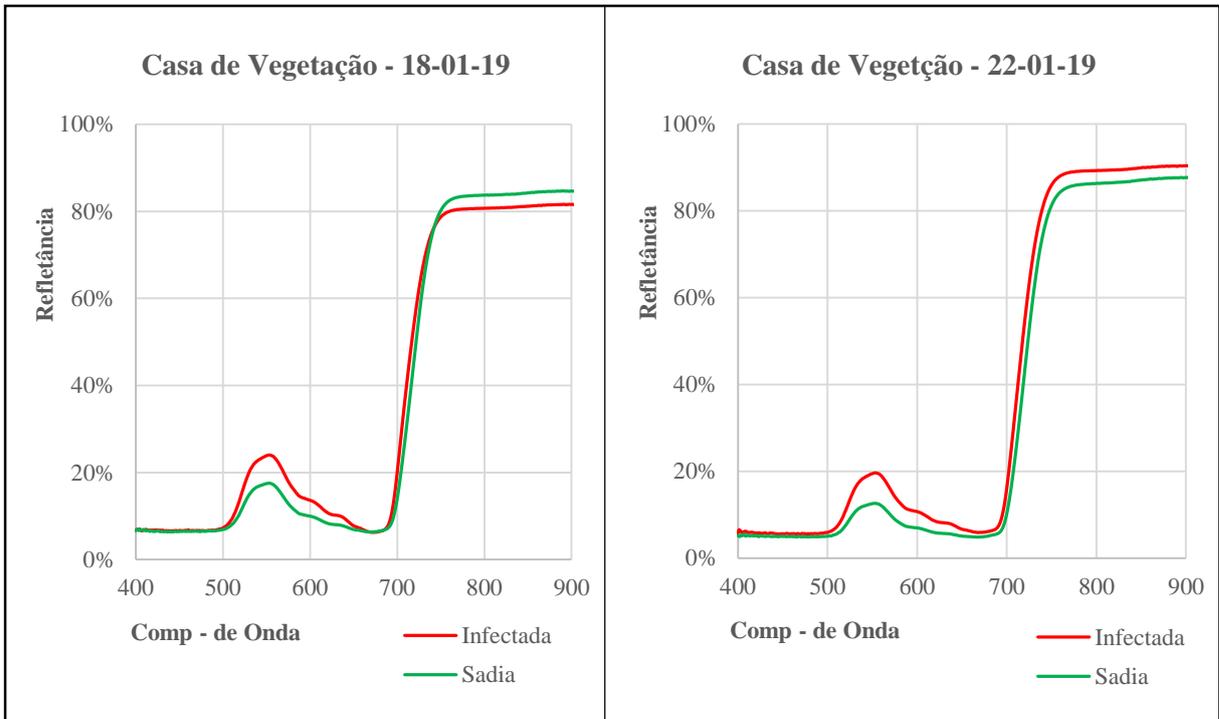
Fonte: O autor (2019).

Nesse contexto, mesmo que as plantas não apresentem visualmente sintomas específicos tais como, sucessão de regiões cloróticas e necróticas nos tecidos e exposição de pústulas, estruturas típicas dos fungos, se percebe alterações as quais podem influenciar as propriedades ópticas da interação planta-patógeno. A intensificação das modificações na composição química dos tecidos e as mudanças na estrutura foliar interna durante o processo da patogênese, explicam as alterações na refletância devido à presença do fungo nas plantas de soja, Moreira (2011); Mahlein et al. (2010); Furlanet et al. (2017).

Na faixa do visível, verificável na Figura 37, o pico de refletância característico na região do verde é acentuado na casa de vegetação em P01-infetada (18/01 e 22/01/2019) e atinge o maior percentual dentre as feições espectrais até aqui identificadas (23%, 20% respectivamente). No intervalo do vermelho as características

das curvas espectrais são mantidas com percentuais elevados, se comparados a casa de vegetação livre-P03 as coletas do dia 18 e 22/01/2019 apresentam valores entre 4 e 5% maiores. O intervalo do (NIR) as amostras do dia 18/01/2019 expõe uma pequena queda nos valores de refletância para a casa de vegetação em P01-infectada, no entanto, na data (22/01/2019) que antecede a visualização dos primeiros sintomas do fungo à folha (23/01/2019) os indivíduos da casa P01 apresentam uma elevação considerável de refletância pois aumentam 10% acima dos comprimentos de onda em 750nm. Soma-se a essa constatação um deslocamento de borda do vermelho a partir de 700nm, condições estas atribuídas a expansão do agente infeccioso nos tecidos vegetais.

Figura 37 – Refletância Espectral da soja – Casa de Vegetação – 18/01/2019 – 22/01/2019



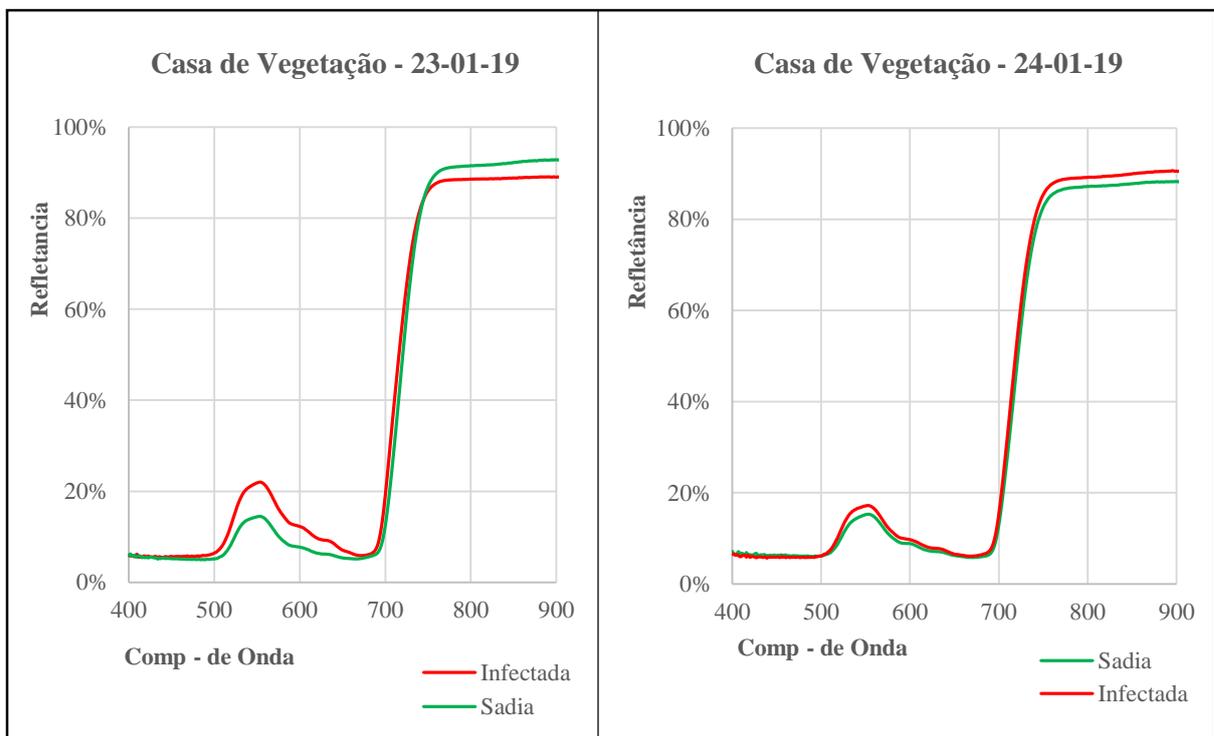
Fonte: O autor (2019).

A observação dos dados apresentados na Figura 38, no dia da identificação das primeiras pústulas na folha (23/01/2019) revelam a permanência dos altos índices de energia refletida na região do visível, conforme se identificou ao longo das campanhas na casa de vegetação em P01-Infectada. Nota-se que as regiões do verde (500-600nm) e do vermelho (600-700nm) são as mais sensíveis a ação do parasita. Nessa mesma data a casa de vegetação P03-Livre mantém as feições espectrais da vegetação verde saudável com valores no intervalo do visível em torno de 8% e 5% inferiores, verde e vermelho respectivamente, se comparado as amostras infectadas. Os índices em NIR apresentaram poucas alterações ao longo das campanhas e mantiveram os valores de refletância em torno de 80 – 85% nos comprimentos de onda acima de 750 nm.

As amostras do dia 24/01/2019, dia seguinte a identificação do fungo a olho nú na folha, registrou uma queda acentuada de refletância na região do visível do

espectro eletromagnético com valores próximos ao identificados na casa de vegetação livre-P03. Nesta coleta os índices em NIR apresentam um leve aumento e chegaram a 89% de refletância acima de 800nm.

Figura 38 – Refletância Espectral da soja – Casa de Vegetação – 23/01/2019 – 24/01/2019



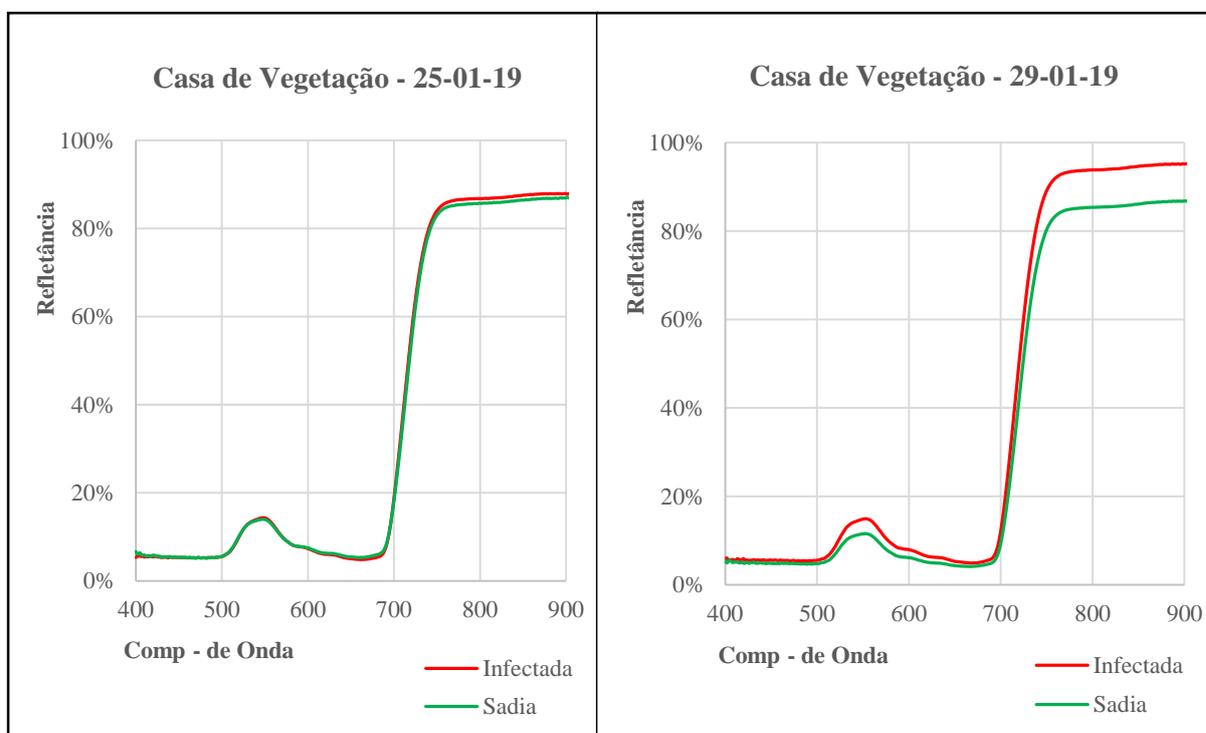
Fonte: O autor (2019).

Nesse cenário, conforme o parasita toma as camadas da folha a refletância das folhas assumem uma tendência inversa, ou seja, diminui ao longo das regiões do visível, eleva seus valores no infravermelho próximo do espectro à medida que a infecção por ferrugem se torna mais severa. Essa afirmação acorda com os estudos desenvolvidos por Cui et al. (2009) e Arantes et al. (2019). Tal inferência tem fundamento ao analisarmos a Figura 39 de 25/01/2019 e 29/01/2019. Na primeira coleta aos 25/01/2019 se percebe que na região do visível ocorreu queda de refletância na casa P01-Infecteda com valores próximos aos coletados em P03-livre,

o NIR registra índice levemente superior ao comparar com a casa de vegetação P03-Livre.

Em 29/01/2019, as feições espectrais observadas na casa de vegetação P01-Infected apresentam a retomada de crescimento fúngico no mesófilo lacunoso das folhas, possivelmente decorrente do processo de reinfecção visto que o fungo se retroalimenta infectando novas folhas pela dispersão e adesão de novos esporos. Esta característica está expressa no espectro pela presença de um deslocamento de borda do vermelho acima dos comprimentos de onda de 700nm e um leve aumento de refletância ao longo do visível (3%) entre os intervalos do verde e do vermelho. As modificações da refletância em fase inicial de infecção (reinfecção) no infravermelho próximo foram descritas na literatura por Cui et al. (2009); Martins e Galo (2015); Godoy et al. (2017b); Pithan et al. (2019) e Arantes et al. (2019) em pesquisas desenvolvidas com plantas de interesse comercial em casas de vegetação.

Figura 39 – Refletância Espectral da soja – Casa de Vegetação – 25/01/2019 – 29/01/2019



Fonte: O autor (2019).

Nesse cenário, a dificuldade de monitoramento das plantas infectadas é um fator relevante relacionado as doenças fúngicas como a ferrugem asiática. Um dos principais entraves diz respeito a dificuldade de constatar o sistema epidêmico em estágio inicial de contaminação. Por esse motivo, a contenção e prevenção da doença são onerosas e relativamente difíceis, esses processos requerem acompanhamento contínuo com o intuito de que se possa obter a redução de perdas e da disseminação de novos focos. Nessa perspectiva, tornou-se de suma importância identificar a ocorrência da doença na fase assintomática. Assim, emerge a possibilidade de combater ou mesmo anular os problemas relacionados à ação do patógeno, o que poderá evitar algumas aplicações desnecessárias ou excessivas de fungicidas e por esse meio mitigar os danos causados ao meio ambiente Calcante et al. (2012); Di Gennaro et al. (2016); Fontaine et al. (2016).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do sensoriamento remoto hiperespectral permitiu caracterizar o comportamento espectral da soja bem como detectar alterações de refletância decorrentes da ocorrência do fungo *Phakopsora pachyrhizi* no período assintomático. Nesse sentido, as variáveis espectrais coletadas em lavouras a céu aberto e nas casas de vegetação apontam para a ocorrência de mudanças significativas nos espectros de refletância.

Com base no primeiro objetivo específico, “*verificar as condições climáticas associadas a ocorrência da ferrugem asiática*” observou-se que houve influência direta das condições climáticas no sistema epidêmico, especificamente pode se apontar a influência da temperatura, umidade relativa (UR), precipitação pluviométrica no aparecimento das primeiras pústulas nas estruturas foliares da soja. Os dados climáticos permitem concluir que as condições ambientais foram favoráveis durante o período de cultivo da soja nas áreas de estudo, o intervalo que precedeu a infecção durante a amostragem registrou temperaturas médias entre 17 e 28°C, com melhores faixas de crescimento entre 21 e 26 °C, UR acima de 80% associada a precipitações moderadas (em torno de 20mm) e tempo de molhamento foliar entre 5 a 10 horas.

Ao observar o segundo objetivo específico, “*identificar as características biofísicas do sistema epidêmico nas fases pré-sintomática e sintomática*”, constatou-se que houve um aumento significativo no número de esporos no período pré-sintomático, nesse mesmo intervalo foram identificadas quedas nos valores de clorofila “b” (Chl”b”) em ambas as áreas de estudo e em diferentes pontos de coletas de dados. No entanto, os valores de Chl “b” são superiores na área previamente tratada a qual apresenta um incremento nos seus índices ao longo do tempo, condição inversa foi apontada na área Infectada. Com a identificação das características biofísicas do sistema epidêmico foi possível constatar a afinidade entre as variações dos dados clorofila (Chl “b”), índice de área foliar (IAF) e biomassa e o surgimento das primeiras pústulas da ferrugem asiática nas estruturas foliares da soja.

Os valores de biomassa e IAF indicam que essas variáveis apresentaram menor capacidade de incorporação de matéria vegetal nas estruturas da soja e menor cobertura foliar nas áreas infectadas pela doença se comparada com a área Livre. Nesse sentido, destaca-se que as perdas de valores das variáveis biofísicas (Chl”b”, Biomassa, IAF) no período assintomático e o incremento de esporos na atmosfera

apontam para condições predisponentes que viabilizam o processo de infecção pela ação do fungo *Phakopsora pachyrhizi* e permitem a ocorrência da doença.

A análise geral dos resultados, a fim de atender o terceiro objetivo específico “*caracterizar o comportamento espectral da soja a fim de detectar de alterações de refletância decorrentes da ocorrência do fungo Phakopsora pachyrhizi no período assintomático*”, constatou-se que as folhas de soja infectada apresentaram alterações em suas refletâncias. Os experimentos realizados em folhas na **casa de vegetação**, com o uso do probe, exibem refletância significativamente mais altas nos comprimentos de onda do visível do que as plantas livres do fungo. Essa característica das curvas espectrais pode ser explicada pela perda de clorofila durante o estabelecimento do processo epidêmico do fungo.

As refletâncias dos **dosséis**, obtidas a campo, foram mais elevadas nos comprimentos de onda do infravermelho próximo (NIR) durante o período assintomático. Após a presença das primeiras pústulas, a refletância perdeu valores visto que o fungo cresce significativamente nas estruturas que compõem o mesófilo, o que pode ser possivelmente atribuído a invasão das hifas do fungo nos espaços intercelulares do mesófilo lacunoso que tendem a compactar as estruturas internas da folha. Essa inferência está vinculada a análise dos espectros de refletância dos experimentos visto que são percebidas inflexões nas curvas de refletância a partir das missões de campo do dia 08/01/2019 (7 dias antes da percepção a olho nu em 15/01/2019). Tais conclusões são confirmadas pela aplicação dos índices de vegetação (IV – Dossel) em cada uma das áreas de estudo. Destaca-se, que dentre os IVs considerados pela investigação o NDVI ($R_{750nm-650nm}/R_{750nm+650nm}$) apresentou os melhores resultados estatísticos por meio de correlações lineares significativas para ambas áreas de estudo.

Nessa perspectiva, a dificuldade de monitoramento das plantas infectadas é um fator relevante relacionado as doenças fúngicas como a ferrugem asiática. Um dos principais problemas diz respeito a dificuldade de identificar o sistema epidêmico em estágio inicial de infecção. Por esse motivo, a contenção e prevenção da doença são onerosos e relativamente difíceis, requerendo acompanhamento contínuo com o intuito de que se possa obter a redução do dano e da disseminação de novos focos. Assim, as informações hiperespectrais associadas as leituras das variáveis climáticas e agronômicas (biofísicas) apontaram para evidências de alterações causadas na soja devido à infecção com **antecedência de 7 dias** a observação da doença a campo.

Nesse sentido, a introdução de atividades que visem identificar a ocorrência da doença na fase assintomática ganha elevada importância no atual cenário de produção agrícola. Esses procedimentos podem levar a redução de aplicações de fungicidas no combate das interferências causadas ao desenvolvimento da planta pela ação do patógeno. Atualmente, a fim de atenuar os danos à cultura, estratégias específicas de manejo são recomendadas no Brasil para essa doença. Dentre estas constam: semeaduras na época recomendada, utilização de cultivares de ciclo precoce, vazio sanitário e eliminação de plantas de soja voluntárias. Recomenda-se ainda a constante vigia da lavoura desde o início do desenvolvimento da cultura, no entanto, a utilização de fungicidas preventivamente e/ou no aparecimento dos primeiros sintomas são as práticas mais eficazes.

O custo do controle químico da ferrugem asiática é formado pela associação de múltiplos fatores, tais como custos da pulverização, da máquina, do operador, do fungicida e do adjuvante recomendado para o fungicida. Esses processos oneram os custos da lavoura, o que reduz ganho e dificulta a produção. Assim, a eficiência ao combate do fungo está vinculada a da capacidade técnica e operacional na condução da lavoura e na otimização de recursos. Nesse sentido, o emprego de novas metodologias/tecnologias pode potencializar a capacidade de produção bem como reduzir custos de manejo e operação das lavouras. A vista disso, a recorrente aplicação de técnicas precisas para previsão de eventos como os da ferrugem asiática poderá levar os produtores a economia de recursos financeiros e um aumento significativo na produtividade e por consequente nos ganhos. Outrossim, a redução de aplicações desnecessárias ou excessivas de fungicidas podem mitigar os danos causados ao meio ambiente.

6. REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAHMAN, E. M.; AHMED, F. B. **The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum spp. hybrid*) production: a review of the literature.** International Journal of Remote Sensing, 3753-3767, 2010.
- ALVARES, C.A. DE M.; SENTELHAS, P.C.; MIRANDA, A.C.; STAPE, J. L. **Modeling Temporal And Spatial Variability Of Leaf Wetness Duration In Brazil.** Theor Appl Climatol, (2015).
- ALVES, R. O. **Consequências dos mecanismos de controle da Ferrugem Asiática na produção de soja no município de Pedra Preta, Mato Grosso.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, Pelotas, 2012.
- ALVES, S.A.M.; FURTADO, G.Q.; GODOY, C.V.; BERGAMIN FILHO, A. **Influência da temperatura no período latente da ferrugem asiática da soja.** Summa Phytopathologica, v.32, p.71. 2006.
- ANDERSON, J. H.; WEBER, K. T.; GOKHALE, B.; CHEN, F. . **Intercalibration and Evaluation of Resource Sat-1 and Landsat-5 NDVI.** Canadian Journal of Remote Sensing, 37(2): 213-219, 10.5589/m11-032, 2011.
- ANDRADE, P.J.M., ANDRADE, D.F. DE A.A. **Ferrugem asiática: uma ameaça à sojicultura brasileira.** Dourados: EMBRAPA/Pecuária Oeste, 2002. 24p. (Circular Técnica II).
- APAN, A.; HELD, A.; PHINN, S.; MARKLEY, J. **Detection of sugarcane orange rust disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery.** International Journal of Remote Sensing, 25, 2004, p. 489–498.
- ARANTES, B.H.T.; MARTINS G. D.; CARVALHO, E. R.; NOGUEIRA, L.C.A. **Identificação da Ferrugem na Soja Por Meio de Imagens e Alta Resolução Espacial.** Revista Brasileira de Geografia Física. v. 12, n03, p1003-1016, 2019.
- ASD (Analytical Spectral Devices, Inc.). **FildSpec HandHeld Spectroradiometer: User's Guide,** 2012. Disponível em: <<http://support.asdi.com/Document/Documents.aspx>>. Acesso em 14 de agosto de 2019.
- ATZBERGER, C., DARVISHZADEH, R., IMMITZER, M., SCHLERF, M., SKIDMORE, A., & LE MAIRE, G. **Comparative Analysis Of Different Retrieval Methods For Mapping Grassland Leaf Area Index Using Airborne Imaging Spectroscopy.** International journal of applied earth observation and geoinformation, 2015.
- ABAWI, G. S.; CHEN, J. Concomitant pathogen and pest interactions. **Plant and Nematode interactions.** Madison: American Society of Agronomy. p. 135-158, 1998.
- BALDECK, C. A.; ASNER, G.P. **Improving remote species identification through efficient training data collection.** Remote Sensing, v. 6, n. 4, p. 2682-2698, 2014.
- BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas.** 2007. 282p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005.

BAURIEGEL, E.;GIEBEL, A.;GEYER, M.;SCHMIDT, U.; HERPPICH, W. B. **Early detection of Fusarium infection in wheat using hyper-spectral imaging.** Computers and Electronics in Agriculture.v. 75, n. 2, p. 304-312, 2011.

BATTUDE, M.; AL BITAR, A.; MORIN, D.; CROS, J.; HUC, M.; SICRE, C. M.; LE DANTEC, V.; DEMAREZ, V. **Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel-2 like remote sensing data.** Remote Sensing of Environment jornal, 2016.

BAURIEGEL, E.;GIEBEL, A.;GEYER, M.;SCHMIDT, U.; HERPPICH, W. B. 2011. **Early detection of Fusarium infection in wheat using hyper-spectral imaging.** Computers and Electronics in Agriculture.v. 75, n. 2, p. 304-312.doi.org/10.1016/j.compag.2010.12.006.

BELTRÃO, R. **Cronologia histórica de Santa Maria e do extinto município de São Martinho.** Vol 01. 1787 – 1930. Santa Maria: Pallotti, 1958.

BERRA, E.F.; FONTANA, D.C.; KUPLICH, T.M. **Comparação da Reflectância Espectral e do IVDN dos Sensores Liss-ii/Resourcesat-1 E Tm/Landsat 5 Em Povoamento Florestal.** Porto Alegre, Revista Brasileira de Cartografia, 2014.

BLACKBURN, G. A. . **Hyperspectral remote sensing of plant pigments.** Journal of experimental botany, 58(4), 2006.

BRANDÃO, Z. N.; BEZERRA, M. V. C.; FREIRE, E. C.; SILVA, B. B. **Agricultura de precisão para gerenciamento do algodão.** In: AZEVÊDO, D. M. P.; BELTRÃO, N. E. M. O Agronegócio do Algodão no Brasil. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA); **Cadeia produtiva da soja.** Secretaria de Política Agrícola, Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura. Brasília: IICA: MAPA/SPA, 2007.

BREUNIG, F. M. ; GALVAO, L.S. ; FORMAGGIO, A. R. ; COUTO, E. G. **The Combined use of reflectance, emissivity and elevation ASTER/Terra data for tropical soil studies.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, p. 1785-1794, 2009.

_____; GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. **Directional Effects on NDVI and LAI Retrievals from MODIS: A Case Study in Brazil with Soybean'**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. v. 13, 2011, p. 34–42. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2010.06.004>>. Acesso em: 10 Jul. 2018.

BOECHAT, L. T. **Técnicas de Sensoriamento Remoto na Detecção do Mofo-Branco e da Mancha- Angular do Feijoeiro.** Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa-MG, 2012.

BONDE, M. R.; NESTER, S. E.; BENER, D. K. **Effects of frequency of “extreme” temperature highs on development of soybean rust.** Phytopathology, Saint Paul, v. 103, n. 7, 2013.

BOYD, D.S.; DANSON, F.M. **Satellite remote sensing of forest resources:three decades of research development.** Progress in Physical Geography, n 29, p. 126, 2005. Disponível em : < <http://journals.Sagepub.com/doi/pdf/10.1191/0309133305pp432ra>>. Acesso em: 28 Fev. 2018.

BRAGA JUNIOR, G.M.; CHAGAS, L.F.B.; AMARAL, L.R.O.; MILLER, L.O.; JUNIOR, A.F.C. **Efficiency Of Inoculation By Bacillus Subtilis On Soybean Biomass And Productivity.** Rev. Bras. Cienc. Agrar., Recife, v.13, n.4, 2018.

CALCANTE, A., MENA, A., MAZZETTO, F **Evaluation of “ground sensing” optical sensors for diagnosis of *Plasmopara viticola* on vines.** Spanish Journal of Agricultural Research, v. 10, p. 619-630, 2012.

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

CAMARGOS, R. **Ferrugem Asiática da Soja:** Informativo técnico Nortox, 3 Ed. São Paulo, 2017. Disponível em: <<http://www.nortox.com.br/wpcontent/uploads/2018/03/informativo-artigo-03-Rafael.pdf>>. Acesso em: 22/04/2018.

CANTERI, M.G. **Quantification of damages and relationships between severity, measures of reflectance and productivity in the Asian soybean rust.** system Tropical Plant Pathology, vol. 35, 2, 096-103, Londrina-PR, 2010.

CARDOSO, F. D. P., ALMEIDA, M. C., DE OLIVEIRA RIBEIRO, R., VIANA, S. F. R., MARQUES, E. E., & BARBOSA, L. **Expansão Recente da Fronteira Agrícola e o Consumo de Produtos Agroquímicos: Indicadores e Possíveis Impactos na Saúde do Trabalhador do Campo em Porto Nacional-Tocantins.** *Revista de Administração e Negócios da Amazônia*, 9(3), 37-59, (2017).

CARLINI, R. C., M. M. MULITERNO, F. R. GARCÉS, E E. M. REIS. **Efeito da concentração de folhas de soja em substratos para a germinação e crescimento do tubo germinativo de *Phakopsora pachyrhizi*.** Tropical Plant Pathology 34 (Suplemento): S117 (Resumo), 2009.

CARRIELLO, F.; MIRANDA, F.G.; JORGE PONZONI, F.J.; CARDOSO, P. A.; MARTINS, S.P. **Uso da Transmitância na Caracterização Espectral de Folhas Verdes.** Anais XI SBSR, Belo Horizonte, 2003, INPE, p. 2451 - 2457.

CHEVARRIA, V.V.; DEL PONTE, E.M.; JAHNKE, S.M.. **Número de Gerações de um Percevejo e Seu Parasitoide e da Severidade da Ferrugem Asiática em Soja, Simulados em Cenários de Clima e Manejo no Norte do RS.** *Ciência Rural*, Santa Maria, v.43, n.4, p.571 - 578, 2013.

CHOA, M. A.; DEBBA, P.; MUTANGA, O.; DUDENI-TLHONE, N.; MAGADLA, T.; KHULUSE, S. A. **Potential Utility Of The Spectral Red-Edge Region Of Sumbandilasat Imagery For Assessing Indigenous Forest Structure And Health.** *International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation*, 2012.

CONAB - **Companhia Nacional de Abastecimento.** Acompanhamento da safra 2007/08. 2008. Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: 10 jan. 2018.

_____ - **Companhia Nacional de Abastecimento.** Acompanhamento da safra 2017/18. 2018. Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: 12 jun. 2018.

_____ - **Companhia Nacional de Abastecimento,** Séries Históricas. 2010. Disponível em<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos> Acesso em 03/03/2018.

CORRÊA, R. L.. **Espaço: um conceito-chave da geografia**. In: CASTRO, Iná Elias, GOMES, P. C.da C., CORRÊA, R. L. (orgs.) Geografia: Conceitos e Temas. 5ª edição. Bertrand: Rio de Janeiro, 2003.

COSTA, B. S. C.; KUPLICH, T. M. **Análise da dinâmica de vegetação campestre em série temporal de índice de vegetação e dados meteorológicos** In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. INPE, Curitiba, 2011.

CRUSIOL, L. G. T.; NANNI, M. R.; FURLANETTO, R. H.; CEZAR, E. SIBALDELLI, R. N. R., MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. FARIAS, J. R. B. **“Assinatura espectral de cultivares de soja submetidas a diferentes níveis de disponibilidade hídrica”**. Anais VIII Congresso Brasileiro de soja, pp. 293-295, 2018.

DELALIEUX S.; VAN AARDT J.; KEULEMANS W.; COPPIN P. **Detection of biotic stress (*Venturiainaequalis*) in apple trees using hyperspectral data**: Nonparametric statistical approaches and physiological implications. European Journal of Agronomy. v. 27, n. 1, p. 130-143, 2007.

DALL'GNOL, A.; **The impact of soybeans on the brazilian economy**. In: Technical information for agriculture. São Paulo: Máquinas Agrícolas Jacto, 2000.

_____. **Current status of soybean production and utilization in Brazil**. In: World Soybean Research Conference, 7., Foz do Iguaçu - PR, February 29 to March 5, 2004.

DANCEY, C. e REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia**: Usando SPSS para Windows. Porto Alegre, Artmed, (2006).

DANTAS, P. A. S.; SOUZA Júnior, J. O.; GOMES, F. P.; RIBEIRO, D. O. **Estimativa não destrutiva do teor foliar de nitrogênio em cacauzeiro utilizando clorofilômetro**. Revista Brasileira de Fruticultura, v.34, p.669-677, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-29452012000300004>> Acesso em: 10/03/2018.

DAUGHTRY, C. S. T.; WALTHALL, C. L.; KIM, M. S.; COLSTOUN, E. B.; McMURTREY III, J. E. **Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance**. Remote Sensing of Environment, v. 74, n. 2, p. 229-239, 2000.

DEBONA, D.; NAVARINI, L.; FAVERA, D.D.; BALARDIN, R.S. **Efeito de níveis de cálcio e sombreamento em plantas de soja sobre a infecção por *Phakopsora pachyrhizi***. Tropical Plant Pathology, 2008. vol. 33, 5, 388-389.

DELALIEUX S.; VAN AARDT J.; KEULEMANS W.; COPPIN P. 2007. **Detection of biotic stress (*Venturia inaequalis*) in apple trees using hyperspectral data**: Nonparametric statistical approaches and physiological implications. European Journal of Agronomy. v. 27, n. 1, p. 130-143. doi.org/10.1016/j.eja.2007.02.005.

DEL FIORE, A.; REVERBERRI, M.; RICELLI, A.; PINZARI, F.; SERRANTI, S.; FABBRI, A. A.; BONIFAZI, G.; FANELLI, C. 2010. **Early detection of toxigenic fungi on maize by hyperspectral imaging analysis**. International Journal of Food Microbiology. v.144, n. 1, p. 64-71, 2010.

DEL PONTE, E.M. . **Early-season warning o f soybean rust regional epidemics using El Niño Southern/Oscillation information**. International Journal of Biometeorology. v.55, p.375-383, 2011.

_____; GODOY, C.V.; CANTERI, M.G.; REIS, E.M.; YANG, X.B. **Models and applications for risk assessment and prediction of Asian soybean rust epidemics.** *Fitopatologia Brasileira*, Brasília, v. 31, n. 6, p. 533-544, 2006.

DEMATTÊ, J. A. M. ; BELLINASSO, H. R.; DANILO J.F. CAIO T. **Morphological Interpretation of Reflectance Spectrum (MIRS) using libraries looking towards soil classification.** *Scientia Agricola (USP. Impresso)*, v. 71, p. 509-520, 2014.

DIETRICH, S.S. **Rotas Turísticas Para o Município de Itaara – RS: Uma Leitura Geográfica da Paisagem e do Lugar.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências. UFSM, 2011, Santa Maria, RS, Brasil.

DI CUI; QIN ZHANG; MINZAN LI; YOUFU ZHAO; GLEN L. HARTMAN. **Detection of soybean rust using a multispectral image sensor.** *Beijing, Sens. & Instrumen. Food Qual.* (2009).

DI GENNARO, S.F., BATTISTO, E., DI MARCO, S., FACINI, O., MATESE, A., NOCENTINI, M., PALLIOTTI, A., MUGNAI, L. **Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based remote sensing to monitor grapevine leaf stripe disease within a vineyard affected by esca complex.** *Phytopathologia Mediterranea*, v.55, n.2, p.262-275, 2016.

DIAS, A. P. S.; LI, X.; YANG, X. B. **Modeling the effects of cloudy wather on regional epidemics of soybean rust.** *Plant Disease*. Saint Paul, v. 98, n. 6, p. 811-816, 2014.

DOBSON, J. E.; **Automated Geography.** *The Professional Geographer*, Vol. 35, n.2, p.135-143. 1983.

DUFAULT, N.S.; ISARD, S.A.; MAROIS, J.J.; WRIGHT, D.L. **Removal of wet deposited *Phakopsora pachyrhizi* urediniospores from soybean leaves by subsequent rainfall.** *Plant Disease*, St. Paul, v. 94, n. 11, p. 1336-1340, 2010.

DU, L., SHI, S., YANG, J., WANG, W., SUN, J., CHENG, B. . **Potential of spectral ratio indices derived from hyperspectral LiDAR and laser-induced chlorophyll fluorescence spectra on estimating rice leaf nitrogen contents.** *Optics Express*, 25(6), 6539-6549, (2017).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Custo Ferrugem Asiática da Soja.** 2018. Disponível em: <<http://www.consorcioantiferrugem.net>> Acesso em: 10 abril de 2019.

EMBRAPA SOJA, **Tecnologias de produção de soja** – região central do Brasil, 2005. Londrina, Embrapa soja; Embrapa cerrados; Embrapa Agropecuária Oeste; Fundação Meridional, 2004, 239 p. (Embrapa Soja. Sistemas de produção).

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de Soja:** região central do Brasil – Perspectivas 2009 e 2010. Londrina: Embrapa Soja; Embrapa Cerrados, Embrapa Agropecuária Oeste, 2010.

_____, **Tecnologias de Produção de Soja:** região central do Brasil – Perspectivas, Londrina: Embrapa Soja, 2014.

EPIPHANIO, J.C.N.; GLERIAN, J.; FORMAGGIO, A.R.; RUDORFF, B.F.T. **Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura de feijão**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.31, n.6, p.445-454, 1996.

FAVARIN, J. L.; DOURADO NETO, D.; GARCÍA, A. G.; NOVA, N. A. V.; FAVARIN, M. G. G. V. **Equações Para a Estimativa do Índice de Área Foliar do Cafeeiro**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília-DF, v. 37, n. 6, p. 769-773, 2002.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: State University of Science and Technology, 1977.

FERREIRA, D.F. **Estatística básica**. 2.ed. Lavras: UFLA, 2009. 664p.

FIGUEREDO, D. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. 2005. Disponível em: <http://lsa.ufpa.br/imbiriba/NUMA_SR/conceitos_sm.pdf> Acesso em: 09/04/2018.

FILHO, W.P. **Cartografia e Sensoriamento Remoto na Avaliação de Dados com Abordagem Espaço e Tempo**. São Paulo. Revista do Departamento de Geografia (USP), v. Especial, 2014. Disponível em: <<https://www.Revistas.usp.br/rdg/article/download/85563/88352>>. Acesso em: 10/03/2018.

FIORIO, P. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; NANNI, M. R.; FORMAGGIO, A. R. **Diferenciação Espectral de Solos Utilizando Dados Obtidos em Laboratório e Por Sensor Orbital**. Bragantia, v.69, p.453-466, 2010.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficinas de Textos. 2008.

FLORENZANO, T.G.. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FOLEY, J.A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K.A.; CASSIDY, E.S.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.; MUELLER, N. D.; O'CONNELL, C.; RAY, D. K.; WEST, P. C.; BALZER, C.; BENNET, E. M.; SHEEHAN, J.; SIEBERT, S.; CARPENTER, S. R.; HILL, J.; MONFREDA, C.; POLASKY, S.; ROCKSTRO, J.; TILMAN, D.; ZAKS, D. P. M. **Solutions For a Cultivated Planet**. Nature, v 478, p.337-342, 2011. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21993620>> Acesso em: 12/03/2018.

FONTAINE F., C. PINTO, J. VALLET, C. CLÉMENT, A.C. GOMES AND A. SPAGNOLO. **The effects of grapevine trunk diseases (GTDs) on vine physiology**. European Journal of Plant Pathology, v.144, p. 707-721, 2016.

FORMAGGIO, A. R.; MOURA, V.; EPIPHANIO, J.C.N.; SILVA, H.R.; FIORIO, P.R.; CAMPOS, R. C. **Dados Tm/Landsat na Estimativa de Áreas Destinadas a Cultura de Verão, no Estado de São Paulo**: In simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11 (SBSR), 2003, Belo Horizonte, MG. Anais. INPE 2003, p.93-100.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I.D.A. **Sensoriamento Remoto em Agricultura**. São Paulo. Oficina de Texto, 2017.

FURLAN, S. H. **Diagnose e Manejo da Ferrugem Asiática da Soja no Brasil**, 2005.

FURLANETO, R. H ; DA SILVA, C. R.; MIZUNO, M. S.; CRUSIOL, L. G. **Resposta Espectral Da Soja em Diferentes Condições de Severidade de Ferrugem Asiática**. ANAIS X EPCC - UNICESUMAR – Centro Universitário de Maringá-PR, 2017.

GALLOTI, G. J. M., A. A. BALBINOT JR., E R. L. BACKES. **Efeito da época de semeadura e da aplicação de fungicidas no progresso da ferrugem asiática, oídio e doenças de final de ciclo na cultura da soja.** *Ciências Agroveterinárias* 4(2): 87-93. 2006.

GALVÃO, L. S.; EPIPHANIO, J. C. N.; BREUNIG, F. M.; and FORMAGGIO, A. R. **Crop Type Discrimination Using Hyperspectral Data:** in *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*, ed. by Australia Prasad S. Thenkabail, U.S. Geological Survey, Arizona, USA; John G. Lyon, Clifton, Virginia, USA; Alfredo Huete, University of Technology, Sydney, 1st edn (Boca Raton: CRC Press, 2011), p. 397–421. Disponível em: <<http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b1122225>>. Acesso em: 10 Jul. 2018.

GARCEZ FIALLOS. F.R. **A Ferrugem Asiática da Soja Causado Por *Phakopsora pachyrhizi* – Sidow e Sidow.** *Ciência e Tecnologia*, p.45-90, Equador, 2011.

GARDIANO, C.G.; BALAN, M.G.; FALKOSKI FILHO, J.; CAMARGO, L.C.M.; OLIVEIRA, G.M.; IGARASHI, W.T.; SUDO, L.T.; IGARASHI, S.; ABI SAAB, O.J.G.; CANTERI, M.G. **Manejo Químico da Ferrugem Asiática da Soja, Baseado em Diferentes Métodos de Monitoramento.** *Arquivos do Instituto Biológico*, v. 77, n. 3, p. 497-504, 2010.

GASSEN, D. N. **O risco da mistura de herbicidas com inseticidas em milho.** In: Gassen, D. N. *Informativos Técnicos*, Passo Fundo-RS, 2017.

GODOY, C.V.; SEIXAS, C.D.S.; SOARES, R.M.; HENNING, A.A. Embrapa Soja. **Histórico do Vazio Sanitário Como Medida de Manejo da Ferrugem Asiática da Soja.** Londrina, Paraná, 2006.

_____; FLAUSINO, A.M.; SANTOS, L.C.M.; DEL PONTE, E.M. **Eficiência do controle da ferrugem asiática da soja em função do momento de aplicação sob condições de epidemia em Londrina - PR.** *Tropical Plant Pathology*, Brasília, v. 34, n. 1, p. 56-61, 2009.

_____; SEIXAS, C.D.S.; SOARES, R.M.; MEYER, M.; COSTAMILAN, L.M.; DEGAS, F.S. **Boas práticas para o enfrentamento da ferrugem asiática da soja.** Embrapa Soja: Londrina, PR, 2017b.

_____; FERNANDES, C.D.; FLAUSINO, A.M.; PEREIRA, T.B.C. **Avaliação da Reação de Acessos de Espécies de Estilosantes a *Phakopsora pachyrhizi*.** XIII Congresso Brasileiro de Soja, Goiânia, GO, 2018.

_____, SEIXAS, C. D. S., SOARES, R. M., MARCELINO-GUIMARÃES, F. C., MEYER, M. C., & COSTAMILAN, L. M. **Ferrugem-asiática da soja no Brasil: passado, presente e futuro.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, (2016).

GITELSON. A.A., KAUFMANB, J.Y., STARKC, R., RUNDQUIST, D. **Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction.** *Remote Sensing of Environment*, v. 80, p. 76–87, (2002).

_____.
GOULART, A.C.P.; FURLAN, S.H.; FUJINO, M.T. **Controle integrado da ferrugem asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi*) com o fungicida fluquinconazole aplicado nas sementes em associação com outros fungicidas pulverizados na parte aérea da cultura.** *Summa Phytopathologica*, Botucatu, v.37, 2011.

GUENDOZ, A.; BADRI, Y.; HAFSI, M. **Estimation Of Chlorophyll Content By Flag Leaf Reflectance In Durum Wheat (*Triticum Durum* Desf.) Genotypes Under Semi Arid Conditions.** National institute of the agronomic research Of Algeria, Research Unit of Setif (INRAA). University Ferhat ABBAS, Setif, Department of Agronomy, Algeria (2012).

GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C. **Monitoramento da Agricultura Irrigada em Tempo Real.** Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 2015.

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; TREMBLAY, N.; ZARCO-TEJADA, P. J.; DEXTRAZE, L. **Integrated Narrow-Band Vegetation Indices For Prediction Of Crop Chlorophyll Content For Application To Precision Agriculture.** Remote Sensing of Environment, v.81, p.416–426, 2002.

HAIR, JR. J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAN, R.L.; BLACK, W.C. **Análise Multivariada de Dados.** Porto Alegre, Bookman, 2005.

HARTMAN, G. L., SIKORA, E. F., AND RUPE, J. C. Rust. **Compendium of Soybean Diseases and Pests.** American Phytopathological Society, Pages 56-59, St. Paul, MN. 2015.

HEALD, C.M.; THAMES, W.J.; WIEGAND, C.L. **Detection Of Rotylenchulus Reniformis Infestations By Aerial Infrared Photography.** Nematology 4(4), 298–300,1972.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q. **An Error and Sensivity Analysis of the Atmospheric and Soli-correcting Variants of the NDVI for the MODIS-EOS.** IEEE Trasactionson Geocienceand Remote Sensing, 1994.

IGARASHI, W.T.; SILVA, M.A.A.; IGARASHI, S.; SAAB, A.; GRIGOLI, O.J.; FRANÇA, J.A. **Leaf Wetness Duration And Percentage Based On Inter-Row Spacing, And Influence On Asian Soybean Rust.** Summa Phytopathologica, Botucatu, v.40, n.2, p.123-127, 2014.

_____. **Application of Predictions Models of Soybean Rust in Two Crop Seasons.** Londrina, PR. **Seminário: Ciências Agrárias**, v. 37, n. 5, p. 2881-2890, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades.** 2015. Disponível: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=431053#>> Acesso em: 10 mar. 2018.

IPCC. **Painel Intergovernamental Sobre Mudança do Clima.** Mudança do clima 2007: Impactos, adaptação e vulnerabilidade. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/50400.html>> Acesso em: 21 Março 2018.

ISARD, S. A., N. S. DUFAULT, M. R. MILES, G. L. HARTMAN, J. M. RUSSO, E. D. DE WOLF, AND W. MOREL. **The effect of solar irradiance on the mortality of *Phakopsora pachyrhizi* urediniospores.** Plant Disease 90: 941-945, 2006.

JACKSON, S.L.; BAYLISS, K.L. **Spore Traps Need Improvement To Fulfil Plant Biosecurity Requirements.** Plant Pathology, v. 60, p. 801-810, 2011.

JACQUEMOUD, S. VERHOEF, W.; BARET, F.; BACOUR, C.; ZARCO-TEJADA, P.J.; ASNER, G. P.; FRANÇOIS, C.; USTIN, S.L. **Prospect + Sail models: A review of use for vegetation characterization.** Remote Sensing of Environment. vol.113, 2009.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** Tradução da 2ª ed. por (pesquisadores do INPE): José Carlos N. Epiphanyo (coordenador); Antonio R. Formaggio; Athos R. Santos; Bernardo F. T. Rudorff; Cláudia M. Almeida; Lênio S. Galvão. São José dos Campos: Parêntese. 672 p, 2009.

JIANG, Z., HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. **Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band.** Remote Sensing of Environment. 112, 3833–3845. 2008.

JULIATTI, F. C.; POLIZEL, A. C.; BALARDIN, R. S.; VALE, F. X. R. **Ferrugem da soja: epidemiologia e manejo para uma doença reemergente. Revisão Anual de Patologia de Plantas,** Passo Fundo, v.13, p.351-395, 2005.

JUNGES, A.H.; ALMANÇA, M.A.K.; DUCATI, J.R.; LAMPUGNANI, C.S. **Espectrorradiometria para Detecção de Alterações na Assinatura Espectral de Folhas de Videiras por Doenças de Causa Fúngica e Viral.** Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, 2017.

KAWUKI, R. S., E. ADIPALA, AND P. TUKAMUHABWA. **Yield loss associated with soya bean rust (*Phakopsora pachyrhizi* Syd.).** in Uganda, Journal of Phytopathology 151: 7-12, 2003.

KE. L.; ZHOU, Q.; WU, W. B.; XIA, T.; TANG, H. J. **Estimating The Crop Leaf Area Index Using Hyperspectral Remote Sensing.** Journal of Integrative Agriculture, Vol. 15, 2016.

KIMATI, H. et al. **Doenças da Soja.** In: Almeida, A.M.R et al. Manual de Fitopatologia. 2. São Paulo: Ceres, 2005.

KITANI, K.; INOUE, Y. **Studies on soybean rust and its control measure.** Part I. Studies on the soybean rust. Shikoku Agric. Exp. Stn. Bull., v.5, p.319-342. 1960.

KOGA, L. J.; CANTERI, M. G.; GODOY, C. V. **Relação Entre Medidas de Refletância e Área Foliar Sadia, Severidade da Ferrugem Asiática e Produtividade da Cultura da Soja.** Universidade Estadual de Londrina – PR. Seminário: Ciências Agrárias, vol. 28, núm. 4, (2007).

KUNAL, S.; SINGH, S.; RANA, A.; KALIA, V.; KAUSHAL, A. **Application of GIS in Precision Agriculture.** Conference National Seminar of “Precision Farming Technologies for High Himalayas”. 2015. Disponível em :<<https://www.researchgate.net/publication/295858552> Application of GIS in precision agriculture>. Acesso em 25/03/2018.

KUPLICH, T. M.; BARBIERE, D. W.; MOREIRA, A.; QUADROS, F.L.F.; TRENTIN, A. B.; CORAZZA, R.; DEPRÁ, B. **Algumas Aplicações de Sensoriamento Remoto em Estudos de Vegetação Campestre no RS.** INPE, São José dos Campos, 2016. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LQEG78>>. Acesso em: 10/05/18.

LIEBISCH, F.; ROHRER, B.; WALTER, A. **Evaluation Of Literature Indices For Determination Of Crop Biophysical Properties For Ground And Airborne Hyperspectral Methods.** Zurich, Department of Environmental Systems Science, Institute of Agricultural Sciences, 2015. Disponível em:< <https://www.ethz.ch/en.html>>. Acesso em: 10/04/18.

LIMA, F.J O.; LOPES, F.B.; ANDRADE, E. M.; FARIA, C.C.; TEIXEIRA, A. S. **Uso do Sensoriamento Remoto no Monitoramento de Plantas Aquáticas.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Conex. Ci. e Tecnol. Fortaleza - CE, 2017.

LIU, J.; PATTEY, E.; MILLER, J. R.; MCNAIRN, H.; SMITH, A.; HU, B. **Estimating Crop Stresses, Aboveground Dry Biomass And Yield Of Corn Using Multi-Temporal Optical Data Combined With A Radiation Use Efficiency Model**. *Remote Sensing of Environment*, e.114 p.1167–1177, 2016.

LONDE, L. R. **Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado** – Ibitinga (SP). 2008. 223p. Tese de Doutorado em Sensoriamento Remoto – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

LORENZEN, B.; JENSEN, A. **Changes In Spectral Properties Induced In Barley By Cereal Powdery Mildew**. *Remote Sens. Environ.* 27(2), 201–209, 1989.

MADALOSSO, M.G.; DOMINGUES, L.S.; DEBORTOLI, M.P.; LENZ, G.; BALARDIN, R.S. **Cultivares, espaçamento entrelinhas e programas de aplicação de fungicidas no controle de *Phakopsora pachyrhizi* Sydow em soja**. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.40, 2010.

MAHLEIN, A.K., **Plant disease detection by imaging sensors – parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping**, *Plant Disease*, v. 100, p. 241-251, 2016.

MAHLEIN, A. K.; OERKE, E. C.; STEINER, U.; DEHNE, H. W. **Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection**. *European Journal of Plant Pathology*. v. 133, n. 1, p. 197-209, 2012.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Ferrugem Asiática: uma ameaça à sojicultura Brasileira**. Dourados – MT. Circular técnica, 2002.

MARCHIORATO, I. A. **Mapas de Variabilidade do Potencial de Produtividade Obtidos Por Satélites Como Instrumentos Auxiliares às Decisões Sobre o Manejo de Nematóides na Cultura de Soja**. 2008, Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Unesp, Jaboticabal, 2008.

MARCHETTI, M. A., J. S. MELCHING, AND K. R. BROMFIELD. **The effects of temperature and dew period on germination and infection by uredospores of *Phakopsora pachyrhizi***. *Phytopathology* 66: 461-463, 1976.

MARTINS, G. D. **Inferência dos Níveis de Infecção Por Nematoides na Cultura Cafeeira a Partir de Dados de Sensoriamento Remoto Adquiridos em Multiescala**. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista, 2016.

MARTINS, G. D. e MLB.T. **Inferência dos Níveis de Infecção Por Nematoides na Cultura Cafeeira a Partir de Dados de Sensoriamento Remoto Adquiridos em Multiescala**. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista, 2016.

MARTINS, T. C. (org). **Caminhos de Itaara 2030: plano de desenvolvimento local**. Conselho regional de desenvolvimento central (COREDE). Itaara: Ed. Faith, 2012.

MASCARENHAS, L. M. A.; FERREIRA, L. G.; FERREIRA, M. E.. **Sensoriamento remoto como instrumento de controle e proteção ambiental: análise da cobertura vegetal remanescente na bacia do rio Araguaia**. *Revista Sociedade & Natureza*, 21(1), (2009).

MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M.; ANCEV, T.; BOUMA, J. **Future directions of precision agriculture**. Precision Agriculture, v. 6, n. 1, p. 1-17, 2013.

MEGETO, G. A.S. **Avaliação da Influência da Temperatura e da Precipitação na Ocorrência da Ferrugem Asiática da Soja por Meio da Técnica de Árvore de Decisão**. Dissertação de Mestrado Apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, SP. Campinas, SP, 2012.

MELCHING, J. S., W. M. DOWLER, D. L. KOOGLE and M. H. ROYER. 1989. Effects of duration, frequency, and temperature of leaf wetness periods on soybean rust. Plant Disease 73:117-122.

MENEGHETTI, R.C.; BALARDIN, R.S.; DALLACORTE, G.D.; DALLA FAVERA, D.; DEBONA, D. **Avaliação da Ativação da Ativação em Soja Contra *Phakopsora Pachyrhizi* em Condições Controladas**. Ciênc. agrotec., Lavras, v. 34, n. 4, 2010. p. 823-829.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução Ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília, UNB, 2012.

MENESES, P.R; MADEIRA NETTO, J.S. (Org.) **Sensoriamento Remoto, reflectância dos alvos naturais**. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, Embrapa Cerrados, 2001.

METTERNICHT, G. **Índices de Vegetação Derivados de Videografia Aerotransportada de Alta Resolução para o Manejo Preciso das Culturas**. International Journal of Remote Sensing, 24:14, 2855-2877, (2003).

MISHRA, A.; EHSANI, R.; ALBRIGO, G.; LEE, W. S. **Spectral characteristics of citrus greening (huangongbing)**. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). n. 07, p. 01–11, 2007.

MORAES, A. C. R. **Geografia: pequena história crítica**. 19. ed. São Paulo: Anna Blume, 2003.

MORAIS, Y. C. B.; SANTOS, B. O.; LAURENTINO, M. L. S.; SILVA, J. C. B.; GALVÍNCIO, J. **Análise Espaço-Temporal e Detecção de Mudanças da Cobertura Vegetal no Município de Floresta/PE–Brasil, Utilizando o NDVI/** In: Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Curitiba, 2011.

MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. **Análise Espectral e Temporal da Cultura do Café em Imagens Landsat**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 39, n. 3, p. 223-231, (INPE), 2004.

MOREIRA, A. M. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 4. ed. Viçosa, MG: UFV, 2011. 422 p. ISBN: 978-85-7269-381-3.

MOTERLE, L. M., LOPES, P. D. C., BRACCINI, A. D. L., & SCAPIM, C. A. **Germinação de sementes e crescimento de plântulas de cultivares de milho-pipoca submetidas ao estresse hídrico e salino**. Revista Brasileira de Sementes, 28(3), 169-176, 2006.

MULLA, D. J. **Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps**. Special Issue: Sensing in Agriculture. Biosystems Engineering, 2012.

NAKAI, E.S., BARROS, P.P.S., FILHO, F.H.I., NETO, M.B., FIORIO, P.R. **Análise de Curvas Espectrais da Soja Obtidas por Diferentes Acessórios**. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2019.

NASCIMENTO, I.S. **Propriedades Espectroscópicas da Ação Antimicrobiana do Peptídeo Polycerradin**. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de São Carlos –UFSCAR, SP, 2015.

NOBREGA, I. W. **Análise espectral de sistemas aquáticos da Amazônia para a identificação de componentes opticamente ativos**. 2002. 84P. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.

NAIDU, R.A., PERRY, E.M., PIERCE, F.J., MEKURIA, T. **The potential of spectral reflectance technique for the detection of Grapevine leafroll-associated virus in two red-berried wine grape cultivars**. Computers and Electronics in Agriculture, v.66, p.38-45, 2009.

NICOLINI, F., E. M. REIS, S. M. ZOLDAN, A. L. D. DANELLI, M. ZANATTA, A. AVOZANI, R. B. TONIN, E F. R. GARCÉS. **Efeito de temperaturas na germinação de uredosporos de Phakopsora pachyrhizi**. Tropical Plant Pathology 35 (Suplemento): S143 (Resumo), 2010a.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto**. Princípios e Aplicações. Ed. Blucher Ltda, 4ª Edição, São Paulo, 2010.

NUNES JUNIOR, J. et al. **Ferrugem da Soja**: evolução, sintomas, danos e controle. EMBRAPA, Agência Rural e CTPA. Documentos 04, 2003.

NUNES, C. D. Controle de ferrugem asiática da soja baseado no número de aplicações de fungicida em diferentes estádios realizado em duas safras 2011/2012 e 2012/2013. In: VERNETTI JUNIOR, F. J. (Ed.). **Resultados de pesquisa de soja na Embrapa Clima Temperado**. Pelotas, 2017. p. 38-46.

OLIVEIRA, G. S. **Produtividade de Biomassa de Cana-De-Açúcar em Função dos Índices de Vegetação Utilizando Técnicas de Sensoriamento Remoto**. Dissertação da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, São Paulo, 2015.

ONÓRIO, D. F.; SEIXAS, F. A. V. **The Using Ft- Nir For Identification And Quantification Of Microorganisms In Foods**. UNINGÁ, Review, 2010.

PACHECO, L.P.; LEANDRO, W.M.; MACHADO, P.L.O. de A.; ASSIS, R.L. de; COBUCCI, T.; MADARI, B.E.; PETTER, F.A. **Produção de fitomassa e acúmulo e liberação de nutrientes por plantaritura na safrinha**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.46,p.17-25, 2011.

PHAM, T. A., M. R. MILES, R. D. FREDERICK, C. B. HILL AND G. L. HARTMAN. **Differential response of resistant soybean genotypes to ten isolates of Phakopsora pachyrhizi**. Plant Disease 93:224-228, 2009.

PELTONIEMI J.I., GRITSEVICH M., PUTTONEN E. **Reflectance And Polarization Characteristics Of Various Vegetation Types**. In: Kokhanovsky A. (eds) Light Scattering Reviews 9. Springer Praxis Books. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.

PETER, A. R.; RUHOFF, A. L. R.; SILVA, B. B.; ROBERTI, D. R.; BREYER, L. M.; SANTOS, R. P. **Monitoramento da Evapotranspiração por Sensoriamento Remoto em**

Áreas de Agricultura Irrigada No Brasil. Florianópolis, XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017.

PETERSON, R. B.; AYLOR, D. E. **Chlorophyll Fluorescence Induction In Leaves Of Phaseolus Vulgaris Infected With Bean Rust.** Plant Physiol, 1995.

PICOLI, M.C.A.; RUDORFF, B.F.T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. **Índice de Vegetação do Sensor Modis na Estimativa da Produtividade Agrícola da Cana-De-Açúcar.** Bragantia, Campinas-SP, v.68, n.3, 2009.

PONZZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLIC, T.M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação.** 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

_____; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação.** São José dos Campos: Parêntese, 2009.

PPDI – **Projeto do plano diretor de Itaara,** 2006.

PRABHAKAR, M., PRASAD, Y. G., RAO, M.N. **Remote sensing of biotic stress in crop plants and its applications for pest management.** In: Venkateswarlu, B., Shanker, A. K., Shanker, C., Maheswari, M. (Eds.). Crop stress and its management: perspectives and strategies. New York: Springer, 2012. pp. 517-549.

PITHAN, P.A DUCATI, J.R., GARRIDO,L.R., ARRUDA,D.C., BORTOLOTTTO, V.C. THUM,A.B., SANTOS, M.A.G. **Sensoriamento Remoto Hiperespectral Aplicado na Discriminação de Doenças Fúngicas da Videira.** Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2019.

QUEMADA, M.; GABRIEL, J.L.; ZARCO-TEJADA, P. **Airborne Hyperspectral Images and Ground-Level Optical Sensors As Assessment Tools for Maize Nitrogen Fertilization.** Remote Sensing, 2014.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAARA. **Histórico.** 2013.Disponível em:<<http://www.itaara.rs.gov.br/>>. Acesso em: 12 Mar. 2018.

RAMIREZ, G. M.; ZULLO JÚNIOR, J. **Estimativa de Parâmetros de Plantios de Café a Partir de Imagens Orbitais de Alta Resolução Espacial.** Engenharia Agrícola, v.30, p.468-479, 2010.

RAMON, H.; MOSHOU, D.; BRAVO, C.; VRINDTS, E.; BAERDEMAEKER, J. D. **Sensing And Information Handling For Crops.** In Sect. 5.6, Chapter 5 of Precision Agriculture. CIGR Handb. Agric. Eng. Inf. Technol. 6, 2006.

RAVEN, P. H.; Evert, R. F.; Eichhorn, S. E. **Biologia vegetal.** Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1996.

RECHIA, A. **Santa Maria: panorama histórico cultural.**3.ed.Santa Maria: Associação Santa-Mariense de Letras, 2006.

Reis, E M., M. Zanatta, E. N. Moreira, R. Bogorni, L. Remor, e D. A. **Curva de progresso da ferrugem da soja em Passo Fundo-RS.** Fitopatologia Brasileira 31 (Suplemento): S139 (Resumo), 2006.

Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul: **Indicações Técnicas para a Cultura da Soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, safras 2014/2015 e 2015/2016.** 1. Ed. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 127p., 2014. Disponível

em:<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1011192/1/IndicacoesTecnicasEmbrapa003.pdf>> Acesso em: 28/07/2018.

ROCHA, A. V.; SHAYER G. R. **Advantages of a two band EVI calculated from solar and photosynthetically active radiation** .uxes. Agricultural and Forest Meteorology, 2009.

ROESSING, A. C.; SANCHES, A. C.; MICHELLON, E.; **As Perspectivas de Expansão da Soja**. Anais dos Congressos. XLIII Congresso da Saber em Ribeirão Preto. São Paulo, 2005.

ROSA, R. **Geotecnologias na Geografia Aplicada**. Revista do Departamento de Geografia. p. 81-90, 2009.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SHELL, J. A.; DEERING, D. W.; HARLAN, J. C. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation**. Greenbelt, MD: NASA/GSFC, Final Report, Type III, 371 p., 1974.

ROWLANDSON, T.; GLEASON, M.L.; SENTELHAS, P.C.; GILLESPIE, T.; THOMAS, C.; HORNBUCKLE, B.. **Reconsidering leaf wetness duration determination for plant disease management**. Plant Dis; (2015). doi: 10.1094 / PDIS-05-14-0529-FE.

RUDORFF, C. M. et al. **Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia**. Acta Amazonica, v. 37, p. 269-280, 2007.

SALLES, A.T.; FILHO, M. V.; FLORENZANO, T. G. **Monitoramento da Cobertura Vegetal e do Uso do Solo da Reserva Indígena Caarapó - Ms, Através de Técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento**. São Paulo, UCDB – Universidade Católica Dom Bosco. IP&D Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento – UNIVAP. INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2016.

SANTOS JUNIOR. R.F., SANTOS, J.M., RUDORFF, B.F.T. & MARCHIORATO, I.A. **Deteção de Heterodera glycines em plantio de soja mediante espectrorradiometria no visível e infravermelho próximo**. São Paulo. Fitopatologia Brasileira. 2002.

_____. **“Comportamento espectral de soja (BRS infestada por *Meloidogyne javanica*.”** Nematologia brasileira, v. 25, n. 1, pp. 53-61, 2001.

SANTOS, M. F. R.; XAVIER, L. S.; PEIXOTO, J. A. A. **Estudo do indicador de sustentabilidade “Pegada Ecológica”**: uma abordagem teórico-empírica. Revista Ibero Americana de Estratégia, vol. 7, núm. 1, São Paulo, 2008.

SASAKI, Y.; OKAMOTO, T.; IMOU, K.; TORII, T. **Automatic Diagnosis Of Plant Disease-Spectral Reflectance Of Healthy And Diseased Leaves**. China, In Proc. of 3rd IFAC/CIGR Workshop on Artificial Intelligence in Agriculture, 1998.

SCHAEPMAN-STRUB, G., SCHAEPMAN, M. E., PAINTER, T. H., DANGEL, S., MARTONCHIK, J. V.. **Reflectance quantities in optical remote sensing**—Definitions and case studies. *Remote sensing of environment*, 103(1), 27-42, (2006).

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing**: models and methods for image processing. V.3. London: Academic Press, 522p., 2007.

SEIBT, J. A. (2017). **Molhamento Foliar Após a Aplicação de Fungicidas no Controle da Ferrugem Asiática da Soja**. Trabalho de conclusão de curso de graduação, Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo – RS, 2017.

SILVA, A.C.; LIMA, E.P.C.; BATISTA, H.R. **A Importância da Soja Para o Agronegócio Brasileiro: Uma Análise Sob o Enfoque da Produção, Emprego e Exportação**. Santa Catarina. 2011. Disponível em: <http://www.apec.unesc.net/V_EEC/sesoes_tematicas/Economia%20rural%20e%20agricultura%20familiar/A%20IMPORT%C3%82NCIA%20DA%20SOJA%20PARA%20O%20AGRONEG%C3%93CIO%20BRASILEIRO.pdf> Acesso em: 21/04/2018.

SILVA, A. J.; CANTERI, M. G.; SANTIAGO, D. C.; HIKISHIMA, M.; SILVA, A.L. **A Refletância na Estimativa do Efeito de Fungicidas no Controle da Ferrugem Asiática da Soja**. Summa Phytopathol. v. 35, n. 1, p.53-56, 2009.

SILVA, M.M. **Contribuições Para a Revitalização do Rural**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Extensão Rural (PPGER), UFSM. Santa Maria, RS, 2013.

SILVA, S.F.; MENDES, D.F.; FERRARI, J.L.; SOUZA, E.F.; GARCIA, R.F.; SANTOS, A.R. **Utilização do Sensoriamento Remoto na Agricultura de Precisão: Uma Análise Bibliométrica**. Nucleus, v.11, n.2. 2014. Disponível em:<<http://www.nucleus.feituverava.com.br/index.php/nucleus/article/view/1008/1701>>. Acesso em: 20 de Abril. 2018.

SILVEIRA, S. **Objeto de Estudo Geográfico em Milton Santos: Em Busca da Sistematização da Vida**. Monografia do Curso de Bacharelado em Geografia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2007.

SHIMABUKURO, Y. E.; MAEDA, E. E.; FORMAGGIO, A. R. **Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicados ao estudo dos recursos agrônômicos e florestais**. São José dos Campos- SP, revista Ceres, 2009.

SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDÃO, Z.N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D.C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P.; VILELA, M. F.. **Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão**. Agricultura de Precisão: Resultados de Um Novo Olhar, Embrapa, 2014. Disponível em:< <https://core.ac.uk/download/pdf/45530546.pdf>>. Acesso em: 21 de Abril de 2018.

_____.; FERGUSON, R.; SHANAHAN, J.; ADAMCHUK, V.; RUNDQUIST, D.; MARX, D.; SLATER, G. **Water and Nitrogen Effects on Active Canopy Sensor Vegetation Indices**. Agronomy Journal, v. 103, n. 6, p. 1815-1826, 2011.

SQUERI, F.V. **Ocorrência da ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) no Estado de Mato Grosso – safra 2004/05**. In: JULIATTI, F.C.; POLIZEL, A.C.; HAMAWAKI, O.T. I Workshop brasileiro sobre a ferrugem asiática. Anais. 2005. p. 93-100.

SOUZA, L. L. P. D.. **Efeito do Momento de Aplicação de Fungicida e da Época de Semeadura no Controle da Ferrugem Asiática da Soja**. Dissertação de Mestrado em Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília, 2015.

STEFANELLO, M.T.; MARQUES, L. N.; PINTO, F.F.; RAMOS, J.P.; CADORE, P.C.; BALARDIN, R. S. **Dinâmica do Controle Químico de *Phakopsora Pachyrhizi* em Plantas de Soja Submetidas a Diferentes Regimes Hídricos**. Arq. Inst. Biol., v.83, 1-6, 2016. DOI: 10.1590/1808-1657000792014.

STANTON, J. M. “**Galton, Pearson, and the peas: A brief history of linear regression for statistics instructors**”. Journal of Statistical Education, (2001).

SUGAWARA, L. M.; RUDORFF, B. F. T. **Sugarcane Yield Penalization Indicator Estimated By An Agronomic Model**. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011. Vancouver. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/em/publications.html>> Acesso em: 19 Abril 2018.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2013.

TRABAQUINI, K.; FORMAGGIO, A. R.; GALVÃO, L.S. **Changes In Physical Properties Of Soils Whit Land Use Time In The Brazilian Savana Environment**. Land Degradation & Development, 2015. v.26, p.397-408.

TRENTINI, D., MÜHL, F. R., BALBINOT, M., FELDMANN, N. A., & RHODEN, A. C. (2017). **Avaliação da Aplicação de Fungicidas no Controle da Ferrugem Asiática da Soja**. *Revista de Ciências Agroveterinárias e Alimentos*, (2).

TSUKAHARA, R. Y., M. HIKISHIMA, AND M. G. CANTERI. **Relações entre o clima e o progresso da ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) em duas micro-regiões do Estado do Paraná**. Semina: Ciências Agrárias 29(1):47-52, 2008.

UGALDE.M.G. **Controle da Ferrugem Asiática (*Phakopsora Pachyrhizi* Sidow) na Cultura da Soja**. Dissertação de Mestrado Apresentada no Curso de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

USHA, K.; SINGH, **Bhupinder**. **Potential Applications Of Remote Sensing In Horticulture-A Review**. Scientia Horticulturae, 2013.

XAVIER, A. C.; SOARES, J.V.; ALMEIDA, A. C..**Variação do Índice de Área Foliar em Clones de Eucalipto ao Longo de Seu Ciclo de Crescimento**. R. Árvore, Viçosa-MG, v.26, n.4, p.421-427, 2002.

WANG, X.; ZHANG, M.; ZHU, J.; GENG, S. 2008. **Spectral prediction of *Phytophthora infestans* infection on tomatoes using artificial neural network (ANN)**. International Journal of Remote Sensing. v. 29, n. 6, p. 1693-1706.[dx.doi.org/10.1080/01431160701281007](https://doi.org/10.1080/01431160701281007).

WATSON, D. J. **Comparative Physiological Studies on Growth of Field Crops: I. Variation In Net Assimilation Rate And Leaf Area Between Species And Varieties, And Within And Between Years**. Annals of Botany, v. 11, p. 41-76, 1947.

WEN, L.; BOWEN, C.R.; HARTMAN, G.L.. **Prediction of short-distance aerial movement of *Pakopsora pachyrhizi* urediniospores learning**. Phitopathology, v.107, p. 1187 – 1198, 2017.

WHITHAM, F. H.; BLAYDES, D. F.; DEVLIN, R. M. **Experiments in Plant Physiology**. New York, D. Van Nostrand Company, 1971, p.55-58.

WÓJTOWICZ, M.; WÓJTOWICZ, A.; PIEKARCZYK, J. **Application Of Remote Sensing Methods In Agriculture**. Poland, International Journal Of The Faculty Of Agriculture And Biology, Warsaw University Of Life Sciences – Sggw, Vol. 11, No. 1, 2016.

YAMAMOTO, N.; SEKIGUCHI, S.; KATO, S.; LIU, C.-C.; HSU, K.-H.; WU, A.-M.. **Cross Calibration of Formosat-2 Remote Sensing Instrument (RSI) Using Terra Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)**. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, v. PP, n. 99, pp.1-11, 2012.

YORINORI, J. T.; PAIVA, W. M. **Ferrugem da Soja: *Phakopsora pachyrhizi***. Londrina: Embrapa Soja, 2002.

ZARCO-TEJADA, P. J.; MILLER, J. R.; NOLAND, T. L.; MOHAMMED, G. H.; SAMPSON, P. H. - **Scaling-Up And Model Inversion Methods With Narrow-Band Optical Indices For Chlorophyll Content Estimation In Closed Forest Canopies With Hyperspectral Data**. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, v. 39, pp.1491-1507, 2001

ZILIO, M.. **Crescimento e Partição de Biomassa de Cultivares de Soja Submetida à Restrição Hídrica em Diferentes Estádios Fenológicos**. Tese do Curso de Doutorado em Produção Vegetal, da Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages/SC, 2014.

_____.; JUNIOR, J.N.; LAZZAROTTO, J.J. **Ferrugem “Asiática” da Soja no Brasil: evolução, importância econômica e controle**. Londrina-PR, 2004. Embrapa, doc. 247, ISSN 1516-781X.

ZHANG, M.; QIN, Z.; LIU, X.; USTIN, S.L. **Detection of stress in tomatoes induced by late blight disease in California, USA, using hyperspectral remote sensing**. International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation, [s.l.], v. 4, n. 4, p.295-310, nov. 2003.

ZHANG, X.; LIU, X.; WANG, H. **Developing water level regulation strategies for macrophytes restoration of a large river - disconnected lake, China**. Ecological Engineering, v. 68, p. 25 – 31, 2014.

ZHENG, Q.; HUANG, W.; CUI, X.; SHI, Y.; LIU, L. **New Spectral Index for Detecting Wheat Yellow Rust Using Sentinel-2 Multispectral Imagery**. Beijing, China. College of Geoscience and Surveying Engineering, 2018.