

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de 28/10/2025.



UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS

VINICIUS SILVA WERNECK ORLANDO



DETECÇÃO DOS SINTOMAS DE INFESTAÇÃO DO BICHO-MINEIRO DO
CAFEEIRO (*Leucoptera coffeella*) POR MEIO DE SENSORIAMENTO
REMOTO EM MULTIPLAS ESCALAS

Presidente Prudente/SP
2025



UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS

VINICIUS SILVA WERNECK ORLANDO

DETECÇÃO DOS SINTOMAS DE INFESTAÇÃO DO BICHO-MINEIRO DO
CAFEEIRO (*Leucoptera coffeella*) POR MEIO DE SENSORIAMENTO
REMOTO EM MULTIPLAS ESCALAS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista campus de Presidente Prudente.

Orientadora: Prof.^a Dra. Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo
Coorientadores: Prof. Dr. George Deroco Martins e Prof. Dr. Bruno Sérgio Vieira

Presidente Prudente/SP
2025

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação - Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - Unesp, Campus de Presidente Prudente

O79d Orlando, Vinicius Silva Werneck.
Detecção dos sintomas de infestação do bicho-mineiro do cafeeiro (*Leucoptera coffeella*) por meio de sensoriamento remoto em múltiplas escalas / Vinicius Silva Werneck Orlando. - 2025
122 f. : il.

Orientadora: Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo
Coorientadores: George Deroco Martins, Bruno Sérgio Vieira
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2025
Inclui bibliografia

1. Análise espectral. 2. Detecção de pragas. 3. Agricultura de precisão. I. Galo, Maria de Lourdes Bueno Trindade. II. Martins, George Deroco. III. Vieira, Bruno Sérgio. IV. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. V. Título.

Alessandra Kuba Oshiro Assunção
CRB-8/9013

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa apresenta métodos para detecção do bicho-mineiro no cafeeiro em diferentes escalas, utilizando sensoriamento remoto. A abordagem permite identificar níveis de infestação pela caracterização espectral de folhas, dosséis e talhões, estabelecendo bases para o monitoramento fitossanitário remoto no âmbito do manejo integrado de pragas.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research uses remote sensing to present methods for detecting coffee leaf miner in coffee plants at different scales. The approach allows identifying infestation levels through spectral characterization of leaves, canopies, and plots, establishing foundations for remote phytosanitary monitoring within integrated pest management.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: **DETECÇÃO DOS SINTOMAS DE INFESTAÇÃO DO BICHO-MINEIRO DO CAFEEIRO (*Leucoptera coffeella*) POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO EM MÚLTIPLAS ESCALAS**

AUTOR: VINICIUS SILVA WERNECK ORLANDO

ORIENTADORA: MARIA DE LOURDES BUENO TRINDADE GALO

COORIENTADOR: GEORGE DEROCO MARTINS

COORIENTADOR: BRUNO SÉRGIO VIEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Cartográficas, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dra. MARIA DE LOURDES BUENO TRINDADE GALO (Participação Presencial)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - FCT/Unesp

Prof. Dra. FERNANDA SAYURI YOSHINO WATANABE (Participação Presencial)
Departamento de Cartografia / Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Faculdade de Ciências e Tecnologia

Prof. Dr. NILTON NOBUHIRO IMAI (Participação Presencial)
Departamento de Cartografia / Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Faculdade de Ciências e Tecnologia

VIDEOCONFERÊNCIA

Prof.ª. Dra. VANESSA ANDALÓ MENDES DE CARVALHO (Participação Virtual)
Instituto de Ciências Agrárias - ICIAG / Universidade Federal de Uberlândia - UFMG



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

VIDEOCONFERÊNCIA

Prof. Dr. DAVID LUCIANO ROSALEN (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV/UNESP - Campus de Jaboticabal

Presidente Prudente, 28 de abril de 2025

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista (FCT-UNESP) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) por fornecer os recursos e a infraestrutura necessários para a realização desta pesquisa. Este estudo foi financiado por:

- O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. A CAPES também financiou meus estudos de doutorado (Processo número 88887.817758/2023-00) e doutorado sanduíche (Processo número 88887.802737/2023-00), no âmbito do Programa CAPES-PrInt (“Da Agricultura de Precisão à Agricultura Prescritiva: inserção da UNESP no contexto da Agricultura Digital e Bioeconomia”), que apoiou meu intercâmbio no Politécnico de Torino (PoliTo), em Torino, Itália.
- O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2021/06029-7, por financiar o Projeto Temático “Sensoriamento remoto de alta resolução para agricultura digital”, que apoiou as medições de campo e a participação em eventos.
- Fundação ISPRS (TIF) por apoiar minha participação no Simpósio TC III da ISPRS (Belém, Brasil) por meio de bolsas de viagem.

Sou grato à Universidade Federal de Uberlândia – Campus Monte Carmelo (UFU) pela disponibilização da área de estudos. Em relação ao apoio recebido em campo, gostaria de agradecer aos pesquisadores parceiros da Inspectral pela colaboração no levantamento aerofotogramétrico. Também sou grato aos alunos e professores do grupo de pesquisa em Fotogrametria e Sensoriamento Remoto da FCT-UNESP, que me ofereceram suporte técnico de alto nível durante os levantamentos de campo. Quero estender minha gratidão a todos os meus amigos do PPGCC. Nossas discussões e trocas de experiências foram fundamentais e me levaram, literalmente, ao outro lado do mundo.

Sou especialmente grato à minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo, cuja orientação e apoio foram essenciais ao longo da minha jornada acadêmica. Sua experiência foi crucial para o desenvolvimento desta tese e meu crescimento como

pesquisador. Agradeço também aos meus coorientadores, Prof. Dr. George Deroco Martins e Prof. Dr. Bruno Sérgio Vieira, que ofereceram suporte e viabilizaram os levantamentos de campo. Além disso, gostaria de agradecer a Prof.^a Dr.^a Gleice Aparecida de Assis e a Prof.^a Dr.^a Vanessa Andaló Mendes de Carvalho pela paciência e conhecimentos transmitidos, que foram fundamentais para a realização desta tese.

Agradeço ao meu orientador do intercâmbio, Prof. Dr. Andrea Maria Língua, que durante a minha visita ao PoliTo me recebeu no seu grupo de estudos e compartilhou experiências e conhecimento. Estendo o meu agradecimento a todos os pesquisadores do politécnico que, durante o meu intercâmbio, contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa. Como resultado desta parceria, publicamos trabalhos em conjunto, e sou grato pelo suporte financeiro dado pela instituição italiana. Além disto, a recepção e apoio durante meu intercâmbio foram inesquecíveis. Esta experiência internacional não apenas enriqueceu minha pesquisa, mas também me proporcionou uma rede de amigos.

Por fim, agradeço ao meu pai e a minha mãe pelo apoio incondicional ao longo de todos esses anos de estudos. Não tenho dúvidas de que meu doutorado é consequência dos vários anos que eles dedicaram à minha educação.

Obrigado (*Grazie mille*)!

RESUMO

O bicho-mineiro do cafeeiro (BMC), *Leucoptera coffeella* (Guérin-Méneville) (Lepidoptera: Lyonetiidae), é uma das principais pragas que afetam a cafeicultura brasileira, causando injúrias significativas às folhas do cafeeiro, reduzindo a área fotossintética, causando desfolha acentuada e comprometendo a produtividade. Sua detecção e monitoramento convencionais são trabalhosos e limitados a pequenas áreas e poucas plantas, dificultando o manejo integrado em larga escala. Métodos baseados em sensoriamento remoto multiescala apresentam potencial para identificação dos diferentes níveis de infestação, mas requerem investigação sobre as relações entre dados espectrais e a presença da praga. Esta pesquisa investigou o potencial do sensoriamento remoto multiescala para detecção do BMC, analisando dados em três níveis de observação: orbital, dossel e foliar, utilizando dados hiperespectrais e multiespectrais para caracterizar a resposta espectral da infestação. No monitoramento orbital, utilizando imagens dos sensores Planet e Sentinel-2A, observou-se que os padrões de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) responderam predominantemente aos fatores climatológicos e ao ciclo fenológico da cultura, sobrepondo-se aos efeitos da infestação. Na escala de dossel, as regiões de 595-605 nm e próximas a 700 nm (*red edge*) foram identificadas como as mais relevantes, com alta correlação entre sensores hiperespectrais e multiespectrais ($R^2 > 0,93$). O modelo SVR-Linear aplicado aos dados hiperespectrais apresentou o melhor desempenho ($p = 0,038$), embora com limitações na precisão das estimativas ($RMSE = 5,490$) do número médio de minas por planta. Em nível foliar, identificou-se que a região espectral em torno de 700 nm é a mais sensível para discriminar diferentes níveis de infestação, com diferenças espectrais significativas ($p < 0,05$) entre folhas sadias e sintomáticas. Os resultados demonstram que o sensoriamento remoto multiescala oferece potencial para o monitoramento do BMC, especialmente em nível foliar e de dossel, onde as alterações espectrais foram mais evidentes. A integração de diferentes escalas de observação proporciona um entendimento mais completo da resposta espectral desta praga, desde padrões de infestação em escala orbital até alterações biofísicas em nível foliar. Assim, esta abordagem representa um avanço como base para detecção do BMC, estabelecendo fundamentos para o desenvolvimento futuro de métodos mais eficientes de monitoramento fitossanitário dessa praga do cafeeiro.

Palavras-chave: Análise espectral; Detecção de pragas; Agricultura de precisão.

ABSTRACT

The coffee leaf miner (CLM), *Leucoptera coffeella* (Guérin-Ménéville) (Lepidoptera: Lyonetiidae), is one of the main pests affecting Brazilian coffee production, causing significant injuries to coffee leaves, reducing photosynthetic area, causing severe defoliation, and compromising productivity. Its conventional detection and monitoring are laborious and limited to small areas and few plants, hindering integrated management on a large scale. Methods based on multiscale remote sensing show potential for identifying different infestation levels but require investigation into the relationships between spectral data and pest presence. This research investigated the potential of multiscale remote sensing for CLM detection, analyzing data at three observation levels: orbital, canopy, and leaf, using hyperspectral and multispectral data to characterize the spectral response to infestation. In orbital monitoring, images from Planet and Sentinel-2A sensors showed that NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) patterns responded predominantly to climatological factors and the crop's phenological cycle, overshadowing infestation effects. At the canopy scale, the regions of 595-605 nm and near 700 nm (red edge) were identified as most relevant, with high correlation between hyperspectral and multispectral sensors ($R^2 > 0.93$). The SVR-Linear model applied to hyperspectral data showed the best performance ($p = 0.038$), although with limitations in estimation accuracy (RMSE=5.490) of the average number of mines per plant. At the leaf level, the spectral region around 700 nm was identified as most sensitive for discriminating different infestation levels, with significant spectral differences ($p < 0.05$) between healthy and symptomatic leaves. The results demonstrate that multiscale remote sensing offers potential for CLM monitoring, especially at leaf and canopy levels, where spectral changes were most evident. The integration of different observation scales provides a more complete understanding of this pest's spectral response, from infestation patterns at the orbital scale to biophysical changes at leaf level. Thus, this approach represents an advancement as a basis for CLM detection, establishing foundations for the future development of more efficient phytosanitary monitoring methods for this coffee pest.

Keywords: Spectral analysis; Pest detection; Precision agriculture.

Lista de Figuras

Figura 1 - Arquitetura da parte aérea de uma planta de <i>Coffea arabica</i> , com destaque para o ramo principal (ortotrópico) e os ramos laterais ou horizontais (plagiotrópicos).	21
Figura 2 - Fenologia do cafeeiro durante os 12 meses do ano.	22
Figura 3 - Em (A) é apresentado o bicho-mineiro em estágio larval observado no interior da injúria característica. Em (B) planta apresentando folhas com minas causadas pelo BMC....	24
Figura 4 - Flutuação populacional do BMC durante o ano na região do Triângulo Mineiro, com a ocorrência dos picos populacionais de abril/maio e setembro/outubro. Adaptado de Souza <i>et al.</i> (1998).....	25
Figura 5 – Diferentes intensidades da clorose foliar em função da redução dos níveis de auxina e aumento da síntese de etileno.....	26
Figura 6 - Assinatura espectral característica de uma folha sadia de <i>Coffea arabica</i> , evidenciando os padrões de reflectância nas regiões do visível (410-700 nm) e do infravermelho (700-1.000 nm). Adaptado de Martins (2016).	28
Figura 7 - Área de estudo indicando os talhões de cafeeiros avaliados em condições de produção comercial. Os talhões foram demarcados em imagem do Google Earth.	33
Figura 8 - Localização da área de estudo controlada e distribuição espacial das 93 plantas nos talhões avaliados. No talhão 1 (esquerda), todas as 53 plantas foram monitoradas, enquanto no talhão 2 (direita), foram selecionadas 40 plantas da mesma cultivar presente no talhão 1 para avaliação comparativa.	34
Figura 9 – Especificação das condições de aquisição de dados multiescala e as respectivas classes em cada nível de detalhamento.....	35
Figura 10 - Fluxograma das atividades para o desenvolvimento do experimento na área de produção comercial.....	36
Figura 11 - Condições meteorológicas do município de Monte Carmelo, mostrando as variações mensais na pluviosidade (barras) e temperatura (linhas) para os diferentes estádios fenológicos do cafeeiro, no período de 2020 a 2022.....	41
Figura 12 - Sequências temporais de imagens NDVI dos talhões 2 e 5, obtidas a partir dos dados Planet (A e C) e Sentinel 2 (B e D). A escala de cores à direita das imagens representa variações do NDVI, dos menores valores (vermelho) aos maiores valores (verde).....	42
Figura 13 - Comportamento temporal do NDVI em cafeeiro obtido por sensores Planet e Sentinel-2.....	43
Figura 14 - Variação temporal do NDVI obtido por imagens Planet nos talhões de estudo, relacionando as fases fenológicas da cultura com os níveis de infestação do BMC.....	44
Figura 15 - Variação temporal do NDVI obtido por imagens Sentinel-2A nos talhões de estudo, relacionando as fases fenológicas da cultura com os níveis de infestação do BMC....	45
Figura 16 – Comparação da dinâmica temporal do NDVI entre os dois sensores durante o período de junho a agosto de 2021 em talhões com diferentes níveis de infestação do BMC.	46
Figura 17 - Fluxograma do delineamento metodológico da análise hiperespectral e multiespectral das áreas infestadas por BMC em nível de dossel.	50

Figura 18 - Distribuição espacial das plantas avaliadas nos talhões experimentais.....	51
Figura 19 - (A) Aquisição dos dados hiperespectrais de um dossel de cafeeiro (B) o IFOV utilizado.	52
Figura 20 – Estratégia para coleta de dados multiespectrais aéreos. Em (A) a câmera <i>Agrowing</i> com seis cabeças de lentes ópticas, em (B) o veículo aéreo não tripulado, e em (C) os alvos das cores branco, cinza e preto, fixados em campo para realização da calibração por linha empírica.	53
Figura 21 - Estrutura da arquitetura de aprendizado de máquina utilizada para estimativa do número de minas de BMC.....	56
Figura 22 - Distribuição do número médio de minas por planta avaliada nas duas parcelas. (A) As barras em rosa representam o número médio de minas do talhão 1, enquanto as barras em azul claro representam o talhão 2. A coloração escura no centro mostra a sobreposição dos histogramas de ambas as áreas. (B) Gráfico de dispersão do número de minas em função do identificador da planta de cafeeiro.....	60
Figura 23 - Dosséis do talhão 1 apresentados em vermelho e do talhão 2 em azul: (A) Espectros individuais dos dosséis do talhão 1 (vermelho) e talhão 2 (azul); (B) Espectros médios dos talhões e casos extremos de infestação, onde a linha contínua vermelha representa o dossel com máxima infestação (40 minas) e a linha contínua azul representa o dossel com mínima infestação (2 minas).	61
Figura 24 – Resultado da análise derivativa dos espectros médios dos Talhões 1 (vermelho) e 2 (azul) com detalhes das regiões espectrais mais discriminantes. Primeira derivada ao longo de todo o espectro (400-1000 nm) (A); espectro na região do <i>red edge</i> (690-710 nm) (B); região espectral do infravermelho próximo (725-755 nm) (C).	62
Figura 25 – Reflectância de superfície dos dosséis nas bandas do sensor multiespectral, expressas pelos comprimentos de onda centrais das bandas definidas no intervalo de 405 a 850 nm para o talhão 1 (A) e talhão 2 (B).....	63
Figura 26 - Coeficientes de determinação (R^2) obtidos na análise de correspondência espectral entre dados hiperespectrais simulados e dados multiespectrais para cada dossel amostrado no talhão 1 (A) e talhão 2 (B).....	64
Figura 27 - Importância da Feature (<i>Permutation Feature Importance</i>) para diferentes comprimentos de onda no modelo SVR-Linear para o cenário do talhão 2.....	66
Figura 28 - Fluxograma metodológico para caracterização espectral e identificação das melhores regiões espectrais para discriminação de diferentes níveis de infestação do BMC em escala foliar.....	74
Figura 29 - Avaliação de folhas saudáveis e sintomáticas:(A) folha saudável com orientação para o Sul e (B) folha sintomática com orientação para o Sul.	75
Figura 30 – Esquema da aquisição de dados hiperespectrais em condições de campo. (A) Medidas sobre a placa de referência Spectralon. (B) Folha de cafeeiro com sintomas de BMC.	76
Figura 31 - Resultados da classificação das folhas com sintomas de BMC utilizando o AFSOft. (A) Representação visual e distribuição percentual correspondente das áreas minadas,	

amareladas/cloróticas e verdes/sadias em uma folha sintomática. (B) Demonstra a capacidade de detectar regiões amareladas adjacentes às áreas minadas, mesmo em folhas com níveis mais baixos de sintoma. (C) Gráfico de barras resumindo a distribuição percentual das áreas minadas, amareladas/cloróticas e verdes/sadias em todas as folhas sintomáticas avaliadas.... 79

Figura 32 - Seleção do melhor valor de K: (A) O método do cotovelo indicando que além de três grupos não há redução significativa no RMSE e (B) Índice Silhouette determinando o maior valor para três grupos. 79

Figura 33 - Distribuição das Folhas Sintomáticas e sua Distância dos Centroides dos Grupos: (A) Grupo 1, com infestação mínima, composto por 33 folhas; (B) Grupo 2, com infestação moderada, composto por 28 folhas; e (C) Grupo 3, com infestação severa, composto por 19 folhas. Em (D) exemplos de folhas de cada agrupamento avaliado, ilustrando os diferentes níveis de infestação..... 81

Figura 34 - Folhas saudáveis apresentadas em verde e folhas sintomáticas em cinza: (A) Todos os espectros das folhas saudáveis e sintomáticas (B) Espectro médio das folhas saudáveis e sintomáticas. 82

Figura 35 - Representação dos espectros: níveis de sintomas em linhas sólidas; espectros médios das folhas saudáveis e sintomáticas em linhas pontilhadas. 82

Figura 36 - Análise utilizando as diferenças absolutas entre a média das folhas saudáveis e a média das folhas (A) minimamente, (B) moderadamente e (C) severamente infestadas..... 84

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Configuração espectral das bandas do sensor PSB.SD e comprimento de onda central das bandas do instrumento MSI e respectiva interoperabilidade.....	38
Tabela 2 - Desvios padrão do NDVI por talhão e sensor.	47
Tabela 3 - Métricas estatísticas utilizadas para avaliação dos modelos de estimativa do número de minas de BMC.	58
Tabela 4 - Desempenho dos algoritmos baseados em aprendizado de máquina para os diferentes cenários para o conjunto de dados hiperespectrais e multiespectrais.	65
Tabela 5 - Resultados do agrupamento <i>k-means</i> em três grupos. Grupo 1 com infestação mínima, Grupo 2 com infestação moderada e Grupo 3 com infestação severa.....	80
Tabela 6 - Teste ANOVA utilizando a média das folhas saudáveis como referência do Grupo.	83

Lista de Quadros

Quadro 1 - Caracterização dos níveis de infestações por BMC dos talhões avaliados em campo	37
Quadro 2 - Número de minas dos dosséis avaliados por planta nos talhões da área experimental controlada. A diferença de cores das células busca evidenciar os cafeeiros com maior número de minas (vermelho) daqueles menos minas (verde).	59

Sumário

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	17
1.1 Contexto da Pesquisa.....	17
1.2 Hipótese	19
1.3 Objetivos.....	19
CAPÍTULO 2: REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 Cafeeiro	20
2.2 Bicho-Mineiro do Cafeeiro (BMC)	23
2.2.1 Caracterização da Praga e Aspectos que Influenciam sua Ocorrência.....	23
2.2.2 Caracterização do Sintoma Resposta na Planta.....	25
2.2.3 Monitoramento e Controle do BMC	27
2.3 Sensoriamento Remoto na Detecção de Estresses em Cafeeiros	28
2.4 Índices de Vegetação	30
CAPÍTULO 3: ÁREA DE ESTUDO	32
3.1 Caracterização Agronômica da Área de Produção Comercial	32
3.2 Caracterização Agronômica da Área Experimental Controlada.....	33
3.3 Concepção da Abordagem Multiescala da Pesquisa	35
CAPÍTULO 4: ANÁLISE TEMPORAL DE TALHÕES INFESTADOS POR BMC EM NÍVEL ORBITAL	36
4.1 Metodologia.....	36
4.1.1 Monitoramento em Campo do Nível de Infestação dos Talhões	37
4.1.2 Aquisição de Dados Meteorológicos da Área de Produção Comercial	38
4.1.3 Obtenção e Pré-processamento das Imagens Multiespectrais Orbitais.....	38
4.1.4 Análise Temporal dos Padrões de Infestação.....	40
4.2 Resultados.....	40
4.3 Discussão	47
4.4 Conclusão	49
CAPÍTULO 5: ANÁLISE DA INFESTAÇÃO DE BMC NO NÍVEL DE DOSSEL	50
5.1 Metodologia.....	50
5.1.1 Caracterização Agronômica dos Dosséis Infestados pelo BMC.....	51
5.1.2 Aquisição e Pré-processamento de Dados Hiperespectrais.....	51
5.1.3 Análise dos Dados Hiperespectrais	52
5.1.4 Aquisição de Imagens Multiespectrais Aéreas.....	53
5.1.5 Pré-processamento das Imagens Multiespectrais	54
5.1.6 Avaliação da Correspondência Espectral entre Medições Terrestres e Aéreas	55

5.1.7 Estimativa do Número de Minas de BMC por Planta.....	56
5.2 Resultados.....	58
5.2.1 Caracterização do Número Médio de Minas dos Dosséis.....	58
5.2.2 Caracterização Hiperespectral de Dosséis.....	61
5.2.3 Caracterização Multiespectral de Dosséis e Talhões	62
5.2.4 Análise da Correspondência Espectral entre Medições Terrestres e Aéreas	63
5.2.5 Modelos para Estimativa do Número de Minas de BMC por Planta.....	64
5.3 Discussão	66
5.3.1 Caracterização Espectral dos Talhões	66
5.3.2 Correspondência Espectral entre Medições Terrestres e Aéreas	68
5.3.3 Modelagem do Número Médio de Minas por Planta	69
5.3.4 Regiões Espectrais Relevantes para Detecção do BMC ao Nível Aéreo	70
5.4 Conclusão	71
CAPÍTULO 6: ANÁLISE ESPECTRAL DO BMC EM NÍVEL FOLIAR.....	73
6.1 Metodologia.....	73
6.1.1 Avaliação Experimental de Folhas Infestadas pelo BMC.....	74
6.1.2 Aquisição e Pré-Processamento das Medidas Espectrais da Folha.....	75
6.1.3 Determinação do Nível Percentual de Dano nas Folhas	76
6.1.4 Agrupamento de Níveis de Infestação por <i>K-means</i>	77
6.1.5 Análise e Validação Entre Grupos de Folhas Sintomáticas e Saudáveis	78
6.2 Resultados.....	78
6.2.1 Determinação do Nível de Dano nas Folhas	78
6.2.2 Caracterização Espectral de Folhas Saudáveis e Sintomáticas	81
6.2.3 Comparação do FRHC Médio de Folhas Sintomáticas e Saudáveis.....	83
6.3 Discussão	84
6.4 Conclusão	86
CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	88
7.1 Conclusões.....	88
7.2 Recomendações e Perspectivas Futuras	89
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICE I – Evolução temporal do NDVI nas imagens Planet para cada um dos 5 talhões avaliados na área de produção comercial	97
APÊNDICE II – Evolução temporal do NDVI nas imagens Sentinel-2A para cada um dos 5 talhões avaliados na área de produção comercial.....	102
APÊNDICE III – Hiperparâmetros otimizados dos modelos com melhor desempenho para cada cenário	107

APÊNDICE IV – Resultado da classificação das folhas no software AFSOft	108
DADOS CURRICULARES	122

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 Contexto da Pesquisa

A agricultura é uma das principais atividades econômicas nacionais devido a sua grande participação no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. O Brasil é o segundo maior consumidor de café e ocupa o primeiro lugar como maior produtor e exportador mundial do produto. Em 2020, ano de maior produção já registrado, foram produzidas 63,08 milhões de sacas de café arábica e conilon (CONAB, 2022).

Entre os diversos fatores que limitam o potencial produtivo do cafeeiro, o bicho-mineiro do cafeeiro (BMC), *Leucoptera coffeella* (Guérin-Méneville) (Lepidoptera: Lyonetiidae), destaca-se como uma das principais pragas da parte aérea (Pantoja-gomez *et al.*, 2019). Este inseto, cujo ciclo biológico varia entre 19 e 87 dias, dependendo das condições ambientais, tem causado perdas de produtividade entre 40% e 80% em importantes regiões produtoras de Minas Gerais, São Paulo e Espírito Santo. Em condições favoráveis, caracterizadas por altas temperaturas, baixa umidade relativa e ausência de precipitação, seu desenvolvimento é acelerado, completando-se em menos de três semanas (Souza *et al.*, 1998).

Tradicionalmente, o monitoramento do BMC é realizado por meio da inspeção de folhas coletadas aleatoriamente no terço mediano a superior das plantas, avaliando as injúrias (minas nas folhas) e produzindo gráficos de flutuação populacional que indicam a intensidade de infestação e o período adequado para aplicação de produtos fitossanitários (Souza *et al.*, 1998). Contudo, este método apresenta limitações quanto à escala de cobertura e eficiência operacional, especialmente em áreas como as encontradas no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba.

A Agricultura de Precisão preconiza a maximização de esforços para prevenção dos estresses por meio do diagnóstico localizado e precoce, otimizando o rendimento da cultura (Molin; Amaral; Colaço, 2015). Neste contexto, o sensoriamento remoto emerge como uma metodologia não destrutiva, sustentável e promissora para o diagnóstico de estresses em culturas agrícolas (Formaggio; Sanches, 2017; Ali *et al.*, 2019).

A integração de dados de sensoriamento remoto em múltiplas escalas para mapear e monitorar culturas agrícolas com produtividade comprometida por estresses bióticos e abióticos tem sido amplamente investigada (Martins *et al.*, 2017; Ali *et al.*, 2015; Weiss; Jacob; Duveiller, 2020; Yang, 2020; Orlando *et al.*, 2023; Orlando *et al.*, 2024a; 2024b). Estas pesquisas estabelecem bases metodológicas que poderão viabilizar a detecção cada vez mais

precoce de estresses e intervenções localizadas e oportunas, promovendo maior sustentabilidade nos sistemas agrícolas e redução de impactos ambientais.

Sishodia, Ray e Singh (2020) apontam que diversas técnicas de sensoriamento remoto estão sendo empregadas na agricultura, como imageamento por satélites, Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) e sensores proximais, aplicadas desde o monitoramento de pragas até a avaliação do estado nutricional das plantas. No entanto, é necessário superar diversos desafios antes que o sensoriamento remoto possa ser adotado amplamente na agricultura, incluindo: a escassez de dados básicos sobre o comportamento espectral de culturas afetadas por patógenos e pragas, como é o caso do BMC; a necessidade de protocolos padronizados para aquisição de dados espectrais; e a determinação dos períodos ideais de coleta de dados considerando os estágios fenológicos da cultura que melhor expressam os sintomas do ataque da praga.

Assim, o estudo do comportamento espectral de folhas e dosséis afetados pelo BMC, ao longo do ciclo fenológico do cafeeiro, pode permitir identificar padrões espectrais específicos das plantas infestadas, visando a detecção do BMC em condições de campo. Embora a literatura apresente múltiplos esforços para mensurar e mitigar as infestações do BMC, ainda existem lacunas significativas no conhecimento sobre sua caracterização espectral em múltiplas escalas. Um desafio importante é a dificuldade enfrentada pelos produtores na coleta adequada de informações em campo, que exige um número considerável de amostras, distribuição apropriada dos pontos de amostragem e procedimentos não tendenciosos para estimar com precisão a população do inseto (Souza *et al.*, 1998; Pantoja-gomez, *et al.* 2019). Esta pesquisa, portanto, propõe-se a fornecer subsídios iniciais, como a caracterização das assinaturas espectrais distintivas entre plantas saudias e infestadas pelo BMC e a identificação das bandas espectrais mais sensíveis à infestação, que poderão orientar o estabelecimento de metodologias de monitoramento mais eficientes, evidenciando sua relevância e potencial de contribuição para avanços na área.

O presente estudo se alinha aos objetivos de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU), contribuindo para o avanço da agricultura digital e sustentável. Além disso, está inserido em um contexto mais amplo da ciência nacional, tendo sido incluído no projeto Capes-Print (Da Agricultura de Precisão para a Agricultura de Prescrição: inserção da Unesp no contexto da Agricultura Digital e da Bioeconomia). Adicionalmente, o projeto está inserido no Projeto Temático da Fundação de Amparo à

Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) denominado "Sensoriamento remoto de alta resolução para agricultura digital" (Processo N. 2021/06029-7).

1.2 Hipótese

Considerando que as infestações de BMC provocam alterações fisiológicas nas plantas que modificam seu comportamento espectral, esta pesquisa propõe-se a investigar se o sensoriamento remoto em múltiplas escalas tem potencial para detectar e discriminar áreas infestadas pela praga.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o potencial do sensoriamento remoto na detecção e monitoramento do BMC, a partir da caracterização da resposta espectral de folhas e plantas infestadas, em múltiplas escalas de observação. Os objetivos específicos são:

- Analisar o potencial do monitoramento orbital do BMC ao longo do ciclo fenológico do cafeeiro, considerando a influência de fatores ambientais e agronômicos;
- Avaliar a relação entre dados espectrais e a manifestação dos sintomas resposta do BMC em nível de dossel, investigando a correspondência espectral entre sensores hiperespectrais e multiespectrais na detecção da praga;
- Identificar os intervalos espectrais mais sensíveis à infestação do BMC em nível foliar, para diferentes intensidades de dano.

CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 Conclusões

Esta investigação confirma a hipótese de que o sensoriamento remoto em múltiplas escalas tem potencial para detectar e discriminar infestações do BMC, considerando que as abordagens de verificação em campo devem ser compatíveis com o nível de aquisição dos dados. Neste sentido, embora os dados hiperespectrais tenham definido respostas espectrais diferenciadas para folhas sadias e sintomáticas, a percepção dos diferentes níveis de infestação se torna mais sutil nas menores escalas. Entretanto, a análise das três escalas de observação (orbital, dossel e foliar) revela aspectos complementares para a compreensão do comportamento espectral da manifestação do BMC.

No nível orbital, o foco está no aspecto temporal e na influência dos ciclos fenológicos do cafeeiro na detecção da praga. Nesta escala, os padrões de NDVI respondem predominantemente aos fatores climatológicos e ao ciclo fenológico da cultura, sobrepondo-se aos efeitos da infestação. Essa característica indica que a detecção do BMC se torna mais complexa em escalas menores, principalmente devido à influência de variáveis ambientais, da dinâmica do ciclo fenológico da cultura cafeeira e do protocolo de avaliação agrônômica por talhão. Por outro lado, nos níveis de dossel e foliar, é possível caracterizar as regiões espectrais para detecção da infestação da praga.

No nível de dossel, tanto a análise derivativa dos espectros quanto o modelo de aprendizado de máquina confirmaram a importância de regiões específicas do espectro. A análise derivativa identificou as regiões de 690-710 nm e 725-755 nm (*red edge*) como as mais sensíveis para detecção dos talhões mais e menos infestados. Paralelamente, o modelo de aprendizado de máquina de melhor desempenho, definiu como regiões espectrais mais contributivas os intervalos de 595-605 nm (vermelho), 698-703 nm e 762-785 nm (*red edge*). No nível de obtenção de dados aéreos, evidencia-se também a complexidade da relação entre dados hiperespectrais do dossel e o número de minas. Esta dificuldade surge principalmente porque a variável agrônômica nem sempre expressa um sintoma resposta individual da planta, sendo tradicionalmente utilizada por agrônomos para tomada de decisão em talhões, onde o elemento amostral é composto por várias plantas.

No nível foliar, a pesquisa permite a discriminação de três níveis distintos de sintoma de infestação, a partir de um ajuste na variável agrônômica que quantifica os efeitos de lesões

das minas e da clorose na área da folha. A região em torno de 700 nm (*red edge*) foi a mais relevante para discriminar os níveis de sintomas, com diferenças significativas entre folhas saudáveis e sintomáticas. A região próxima a 600 nm (visível) apresenta importância complementar devido ao amarelecimento das folhas, sintoma observado em níveis de infestação mais severos. Assim, a convergência de resultados entre as escalas foliar e de dossel é particularmente evidenciada nas regiões de 600 nm e 700 nm, que aparecem como relevantes em ambos os níveis de análise. Considerando que, nesta escala maior, o NIR não se mostrou eficiente para diferenciar as infestações, índices que utilizam a região do *red edge*, como o NDRE (*Normalized Difference Red Edge*), poderiam ser mais adequados que o NDVI para a detecção dos sintomas do BMC nos outros níveis.

Por fim, esta pesquisa demonstra que a integração de diferentes escalas de observação fornece um entendimento mais completo da resposta espectral do BMC, desde padrões de infestação em escala orbital até alterações biofísicas em nível foliar. Representa, portanto, um avanço na compreensão da manifestação multiescala da praga, a partir de um estudo base que investiga o comportamento espectral dos sintomas associados ao BMC.

7.2 Recomendações e Perspectivas Futuras

A principal recomendação é o desenvolvimento de protocolos que considerem as regiões espectrais identificadas nesta investigação (600 nm e 700 nm) para aquisição de dados ao nível aéreo. Além disso, é recomendado a aquisição completa de dados em diferentes estágios fenológicos do cafeeiro, a fim de ajustar um modelo robusto que permita o monitoramento do BMC.

Adicionalmente, recomenda-se o desenvolvimento de variáveis agronômicas que se relacionem melhor com os sintomas da planta em resposta ao ataque do BMC. Esta pesquisa demonstrou que o número de minas, embora seja um indicador tradicional usado no manejo da praga, é uma variável que não pode ser diretamente associada ao comportamento espectral dos dosséis. Portanto, é fundamental investigar métricas e abordagens alternativas que possam quantificar de forma mais representativa o impacto estrutural do BMC nas plantas de café, como por exemplos indicadores de estresse fisiológico. O sensoriamento remoto pode servir de apoio para melhorar a amostragem e a qualidade do que é amostrado em campo, otimizando os protocolos de monitoramento da praga.

Estas abordagens, combinadas com a análise de viabilidade econômica e operacional das técnicas de sensoriamento remoto em campo, possuem potencial para contribuir com o monitoramento sustentável do BMC em áreas de produção comercial.

REFERÊNCIAS

- ALI, I.; GREIFENEDER, F.; STAMENKOVIC, J.; NEUMANN, M.; NOTARNICOLA, C. **Review of machine learning approaches for biomass and soil moisture retrievals from remote sensing data.** *Remote Sensing*, p. 16398–16421, 2015.
- ALI, M. M.; BACHIK, N. A.; MUHADI, N. A.; NORIZAN, T.; YUSOF, T. **Non-destructive techniques of detecting plant diseases: A review.** *Physiological and Molecular Plant Pathology*, v. 108, n. 14, p. 12, 2019. Elsevier Ltd.
- ALMEIDA, J. D. DE; MOTTA, I. DE O.; VIDAL, L. DE A.; BÍLIO, J. F.; PUPE, J. M.; VEIGA, A. D.; CARVALHO, C. H. S. DE; LOPES, R. B.; ROCHA, T. L.; SILVA, L. P. DA; PIJOL-LUZ, J. R. P.; FREIRE, E. V. S. A. **Bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella*): uma revisão sobre o inseto e perspectivas para o manejo da praga.** 1a ed. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2020.
- ALVES, J. D. **Morfologia do Cafeeiro.** In: CARVALHO, C. H. S. (Org.); *Cultivares de Café*. p. 247, 2007.
- ARTECA, R. N. **Plant growth substances: principles and applications.** 1996.
- ASSIS, G. A.; ASSIS, F. A.; SCALCO, M. S. **Leaf miner incidence in coffee plants under different drip irrigation regimes and planting densities.** n. 1, p. 157–162, 2012.
- BARBOSA, P. M. DA S.; PERALTA, P. P.; DUPIM, L. C. DE O. **Composição de marcas e denominação de origem: reflexões sobre o caso do café da região do Cerrado Mineiro do Brasil.** In: PEREIRA, G. M.; SEQUEIRA, C. (Orgs.); *Marcas e Denominações de Origem: História e Identidade*. p. 201–210, 2023. Porto: FLUP-CITCEM.
- BREIMAN, L. Random forests. *Machine Learning*, v. 45, p. 5-32, 2001.
- BRUCE, P.; BRUCE, A.; GEDECK, P. **Practical Statistics for Data Scientists.** 2. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2020.
- CAIXETA, E. T.; FRANZIN, M. L.; ZAMBOLIM, L.; VENZON, M.; CARVALHO, C. H. S. D.; OLIVEIRA, A. C. B. D.; RESENDE, M. D. V. D. **Manejo integrado de pragas e doenças do café arábica.** Brasília, DF: Embrapa Café, 35 p. (Embrapa Café. Circular técnica, 8), 2024.
- CAMARGO, A. P. As oito fases fenológicas da frutificação do cafeeiro. CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS. *Anais...* p. 41–42, Poços de Caldas: Instituto Brasileiro do Café. 1998.
- CAMARGO, Â. P. DE; CAMARGO, M. B. P. DE. **Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil.** *Bragantia*, v. 60, n. 1, p. 65–68, 2001.
- CARNEIRO, A. L. C.; SILVA, L. DE B.; FAULIN, M. S. A. R. **Artificial intelligence for detection and quantification of rust and leaf miner in coffee crop.** 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.11241>. Acesso em: 15 set. 2022.

- CARVALHO, C. H. S. de; BARTELEGA, L.; SERA, G. H.; MATIELLO, J. B.; ALMEIDA, S. R. de; SANTINATO, F.; HOTZ, A. L. **Catálogo de cultivares de café arábica**. Brasília, DF: Embrapa Café, 2022. 115 p.: il. color.; 22 cm x 16 cm. (Documentos / Embrapa Café, ISSN 1678-1694; 16).
- CHEMURA, A.; MUTANGA, O.; DUBE, T. **Separability of coffee leaf rust infection levels with machine learning methods at Sentinel-2 MSI spectral resolutions**. *Precision Agriculture*, v. 18, n. 5, p. 859–881, 2016. Springer US.
- CHEMURA, A.; MUTANGA, O.; ODINDI, J. **Empirical Modeling of Leaf Chlorophyll Content in Coffee (*Coffea Arabica*) Plantations With Sentinel-2 MSI Data: Effects of Spectral Settings, Spatial Resolution, and Crop Canopy Cover**. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 10, n. 12, 2017.
- CONAB. **CONAB: Acompanhamento da safra brasileira**, 1o levantamento. 2022.
- COSTA, J. N. M.; TEIXEIRA, C. A. D.; JÚNIOR, J. R. V.; ROCHA, R. B.; FERNANDES, C. DE F. **Informações para facilitar a identificação das diferentes fases do bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella*) em campo**. Embrapa, Comunicado Técnico 384, v. 1, n. 1, p. 4, 2012.
- CURRAN, P. J.; DUNGAN, J. L.; MACLER, B. A.; PLUMMER, S. E. **The effect of a red leaf pigment on the relationship between red edge and chlorophyll concentration**. *Remote Sensing of Environment*, v. 35, n. 1, p. 69–76, 1991. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/003442579190066F>. Acesso em: 5 out. 2022.
- DRUCKER, H.; BURGESS, C. J.; KAUFMAN, L.; SMOLA, A. J.; VAPNIK, V. **Support vector regression machines**. *Advances in Neural Information Processing Systems*, v. 9, p. 155–161, 1997.
- FERNANDES, F. L.; MANTOVANI, E. C.; BONFIM NETO, H.; NUNES, V. DE V. **Efeitos de variáveis ambientais, irrigação e vespas predadoras sobre *Leucoptera coffeella* (Guérin-Méneville) (Lepidoptera: Lyonetiidae) no cafeeiro**. *Neotropical Entomology*, v. 38, n. 3, p. 410–417, 2009.
- FISHER, A.; RUDIN, C.; DOMINICI, F. **All models are wrong, but many are useful: learning a variable's importance by studying an entire class of prediction models simultaneously**. *Journal of Machine Learning Research*, v. 20, n. 177, p. 1–81, 2019.
- FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensoriamento Remoto em Agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 288 p.
- FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, S. L. Coffee. In: **Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products**. 17. ed. Academic Press, 2019. p. 413–438.
- GÉRON, A. **Mãos à Obra: Aprendizado de Máquina com Scikit-Learn & TensorFlow: Conceitos, Ferramentas e Técnicas Para a Construção de Sistemas Inteligentes**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2019. 576 p.
- GUERREIRO FILHO, O. **Coffee leaf miner resistance**. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v. 18, n. 1, p. 109–117, 2006.

GUIMARÃES, P. T. G.; GARCIA, A. W. R.; ALVAREZ, V. H.; PREZOTTI, L. C.; VIANA, A. S.; MIGUEL, A. E.; MALAVOLTA, E.; CORRÊA, J. B.; LOPES, A. S.; NOGUEIRA, F. D.; MONTEIRO, A. V. C.; OLIVEIRA, J. A. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª Aproximação.** In: **Comissão de fertilidade do solo do estado de minas gerais – CFSEMG.** Editores: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. Viçosa, MG, 1999. p. 289–302. 359 p.

HAIM, P. G.; ZOFFOLI, B. C.; ZONTA, E.; ARAÚJO, A. P. **Diagnose nutricional de nitrogênio em folhas de feijoeiro pela análise digital de imagens.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 47, n. 10, p. 1546–1549, 2012.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; LEEUWEN, W. VAN. **A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS.** Remote Sensing of Environment, v. 59, p. 440–451, 1997.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** Information Systems Journal, v. 21, p. 587, 2009.

JORGE, L. A. C.; SILVA, D. J. C. B. AFSOFT - Software para análise foliar. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO - ConBAP, 2010, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: SBEA. 1 CD-ROM, 2010. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/85370/1/Proci-10.00227.pdf>. Acesso em: 15 set. 2023.

KATSUHAMA, N.; IMAI, M.; NARUSE, N.; TAKAHASHI, Y. **Discrimination of areas infected with coffee leaf rust using a vegetation index.** Remote Sensing Letters, v. 9, n. 12, p. 1186–1194, 2018.

KIDDER, S. Q.; HAAR, T. H. VONDER. **Satellite meteorology: an introduction.** 1995.

LIU, W. H.; DAI, X. H.; XU, J. S. **Revisión de las influencias de los insectos minadores de folhas em suas plantas huésped.** Collectanea Botanica, v. 34, p. 005, 2015.

MAHLEIN, A.-K.; STEINER, U.; DEHNE, H.-W.; OERKE, E.-C. **Spectral signatures of sugar beet leaves for the detection and differentiation of diseases.** Precision Agriculture, v. 11, n. 4, p. 413–431, 2010.

MANSO, G. L.; KNIDEL, H.; KROHLING, R. A.; VENTURA, J. A. **A smartphone application to detection and classification of coffee leaf miner and coffee leaf rust.** arXiv:1904.00742. p. 36, 2019.

MARIN, D. B.; FERRAZ, G. A. E. S.; SANTANA, L. S.; BARBOSA, B. D. S.; BARATA, R. A. P.; OSCO, L. P.; RAMOS, A. P. M.; GUIMARÃES, P. H. S. **Detecting coffee leaf rust with UAV-based vegetation indices and decision tree machine learning models.** Computers and Electronics in Agriculture, v. 190, p. 106476, 2021. Elsevier.

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, Pós-graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/f185a319-53c3-4127-9313-58cffae2a7ca>. Acesso em: 15 set. 2022.

- MARTINS, G. D.; GALO, M. L. B. T.; VIEIRA, B. S. **Detecting and mapping root-knot nematode infection in coffee crop using remote sensing measurements.** IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, v. 10, n. 12, p. 5395–5403, 2017.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. DE; BAPTISTA, G. M. DE M. **Reflectância dos materiais terrestres.** São Paulo: Oficina de textos, 2019.
- MIRANDA, J. DA R.; ALVES, M. DE C.; POZZA, E. A. **Detection of coffee berry necrosis by digital image processing of Landsat 8 OLI satellite imagery.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 85, n. 2019, 2020.
- MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. DO; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão.** 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2015.
- ORLANDO, V. S. W.; MARTINS, G. D.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; MARRA, A. B.; PEREIRA, F. V.; GALO, M. L. B. T. **Potential of multispectral images taken by sensors embedded in UAVs for monitoring the coffee crop irrigation.** ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. X-1/W1-2023, p. 91–96, 2023.
- ORLANDO, V. S. W.; GALO, M. L. B. T.; MARTINS, G. D.; LINGUA, A. M.; ASSIS, G. A.; BELCORE, E. **Hyperspectral Characterization of Coffee Leaf Miner (*Leucoptera coffeella*) (Lepidoptera: Lyonetiidae) Infestation Levels: A Detailed Analysis.** Agriculture, v. 14, n. 12, p. 2173, 2024a.
- ORLANDO, V. S. W.; GALO, M. DE L. B. T.; MARTINS, G. D.; LINGUA, A. M.; ANDALÓ, V. **UAV imaging for spectral characterization of Coffee Leaf Miner (*Leucoptera coffeella*) infestation in the Cerrado Mineiro region.** ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. X-3–2024, p. 285–291, 2024b.
- OSCO, L. P.; RAMOS, A. P. M.; PINHEIRO, M. M. F.; MORIYA, É. A. S.; IMAI, N. N.; ESTRABIS, N.; IANCZYK, F.; ARAÚJO, F. F.; LIESENBERG, V.; JORGE, L. A. C.; LI, J.; MA, L.; GONÇALVES, W. N.; MARCATO JUNIOR, J.; CRESTE, J. E. **A Machine Learning Framework to Predict Nutrient Content in Valencia-Orange Leaf Hyperspectral Measurements.** Remote Sensing, v. 12, n. 6, p. 906, 2020.
- PANTOJA-GOMEZ, L. M.; CORRÊA, A. S.; DE OLIVEIRA, L. O.; GUEDES, R. N. C. **Common origin of Brazilian and Colombian populations of the neotropical coffee leaf miner, *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae).** Journal of Economic Entomology, v. 112(2), p. 934–931, 2019.
- PEREIRA, F. V.; MARTINS, G. D.; VIEIRA, B. S.; DE ASSIS, G. A.; ORLANDO, V. S. W. **Multispectral images for monitoring the physiological parameters of coffee plants under different treatments against nematodes.** Precision Agriculture, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11119-022-09922-2>. Acesso em: 14 nov. 2022.
- PIERRE, L. S. R. **Níveis populacionais de *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae) e *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) e a ocorrência de seus**

parasitoides em sistemas de produção de café orgânico e convencional. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011. ESALQ/USP.

PINTO, J.; POWELL, S.; PETERSON, R.; ROSALEN, D.; FERNANDES, O. **Detection of defoliation injury in peanut with hyperspectral proximal remote sensing.** Remote Sensing, v. 12, n. 22, p. 3828, 2020.

PLANET LABS, INC. **Planet Imagery Product Specifications.** San Francisco, CA, USA, 2021.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação.** 2o ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

PORTO, L. R.; BERVEGLIERI, A.; IMAI, N. N. Calibração radiométrica em imagens multiespectrais aéreas utilizando linha empírica e placa colorimétrica. **Anais... do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.** p. 2993–2997, 2023. São José dos Campos: INPE. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2023/trabalhos/calibracao-radiometrica-em-imagens-multiespectrais-aereas-utilizando-linha-empir?lang=pt-br>. Acesso em: 22 fev. 2024.

RAMOS, A. P. M.; GOMES, F. D. G.; PINHEIRO, M. M. F.; FURUYA, D. E. G.; GONCALVEZ, W. N.; JUNIOR, J. M.; MICHEREFF, M. F. F.; BLASSIOLI-MORAE, M. C.; BORGES, M.; ALAUMANN, R. A.; DE CASTRO JORGE, L. A.; OSCO, L. P. **Detecting the attack of the fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in cotton plants with machine learning and spectral measurements.** Precision Agriculture, v. 23, n. 2, p. 470–491, 2022.

REZENDE, C. I. P.; ASSIS, G. A.; MARTINS, G. D.; CARVALHO, F. J.; FRANCO, M. H. R.; ARAÚJO, N. O. **Multispectral images for discrimination of sources and doses of fertilizer in coffee plants.** Revista Ceres, v. 70, n. 3, p. 289–302, maio-jun. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-737X202370030006>. Acesso em: 22 fev. 2024.

ROUSE, R. W. H.; HAAS, J. A. W.; SHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.** Texas, 1974.

ROUSSEUW, P. J. **Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis.** Journal of Computational and Applied Mathematics, v. 20, n. C, p. 53–65, 1987. North-Holland. Acesso em: 20/11/2023.

RUFINO, J. L. DOS S. **Programa Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento do Café: antecedentes, criação e evolução.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006.

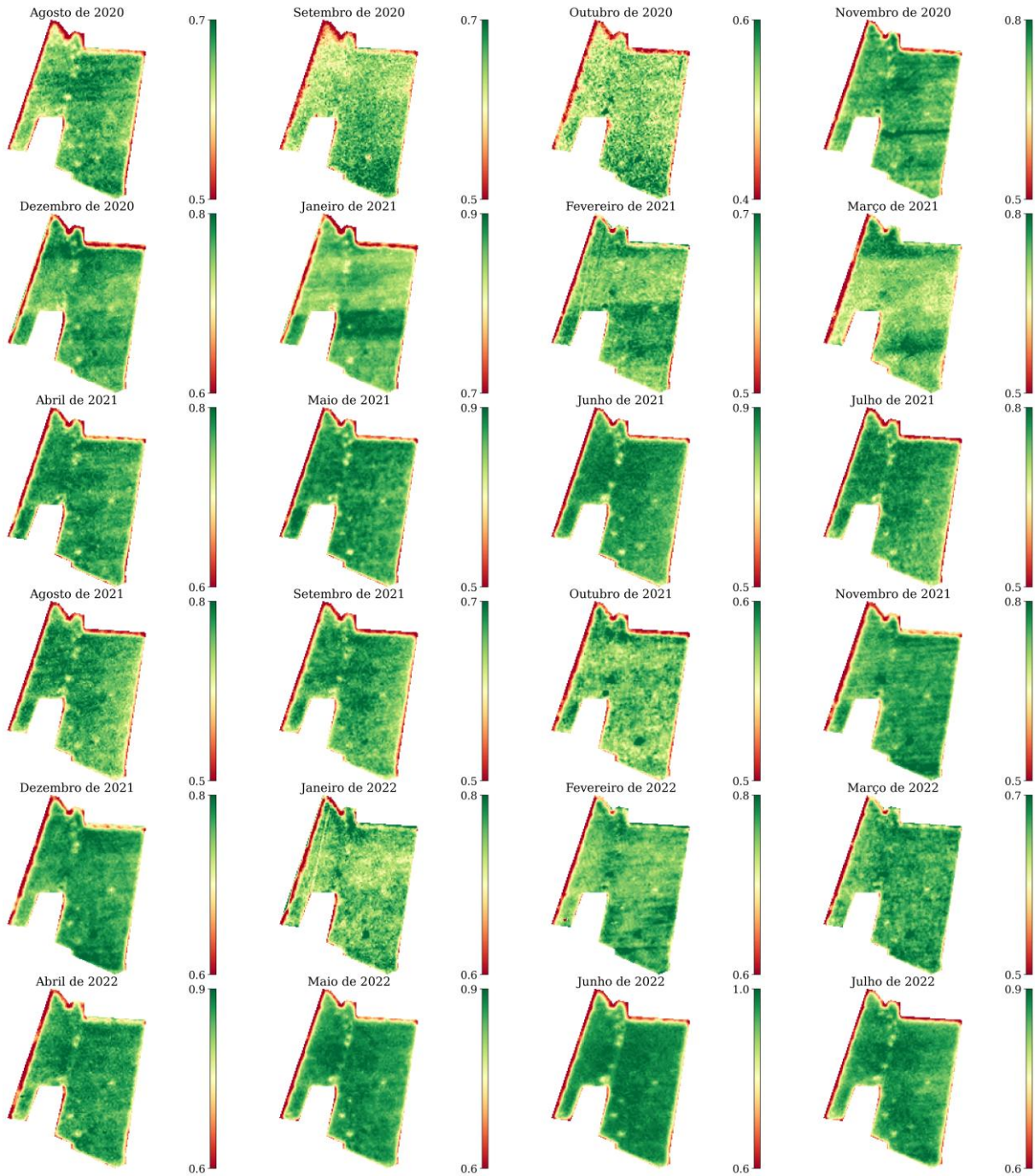
SANTOS, L. M. DOS; FERRAZ, G. A. E S.; MARIN, D. B.; ARAÚJO, G.; CARVALHO, M. A.; DIAS, J. E. L.; ALECRIM, A. O.; SILVA, M. L. O. **Vegetation Indices Applied to Suborbital Multispectral Images of Healthy Coffee and Coffee Infested with Coffee Leaf Miner.** AgriEngineering, v. 4, n. 1, p. 311–319, 2022.

SILVA, E. A.; DAMATTA, F. M.; DUCATTI, C.; REGAZZI, A. J.; BARROS, R. S. **Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis of Arabica coffee trees.** Field Crops Research, v. 89, n. 2–3, p. 349–357, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.02.010>. Acesso em: 5 jan. 2024.

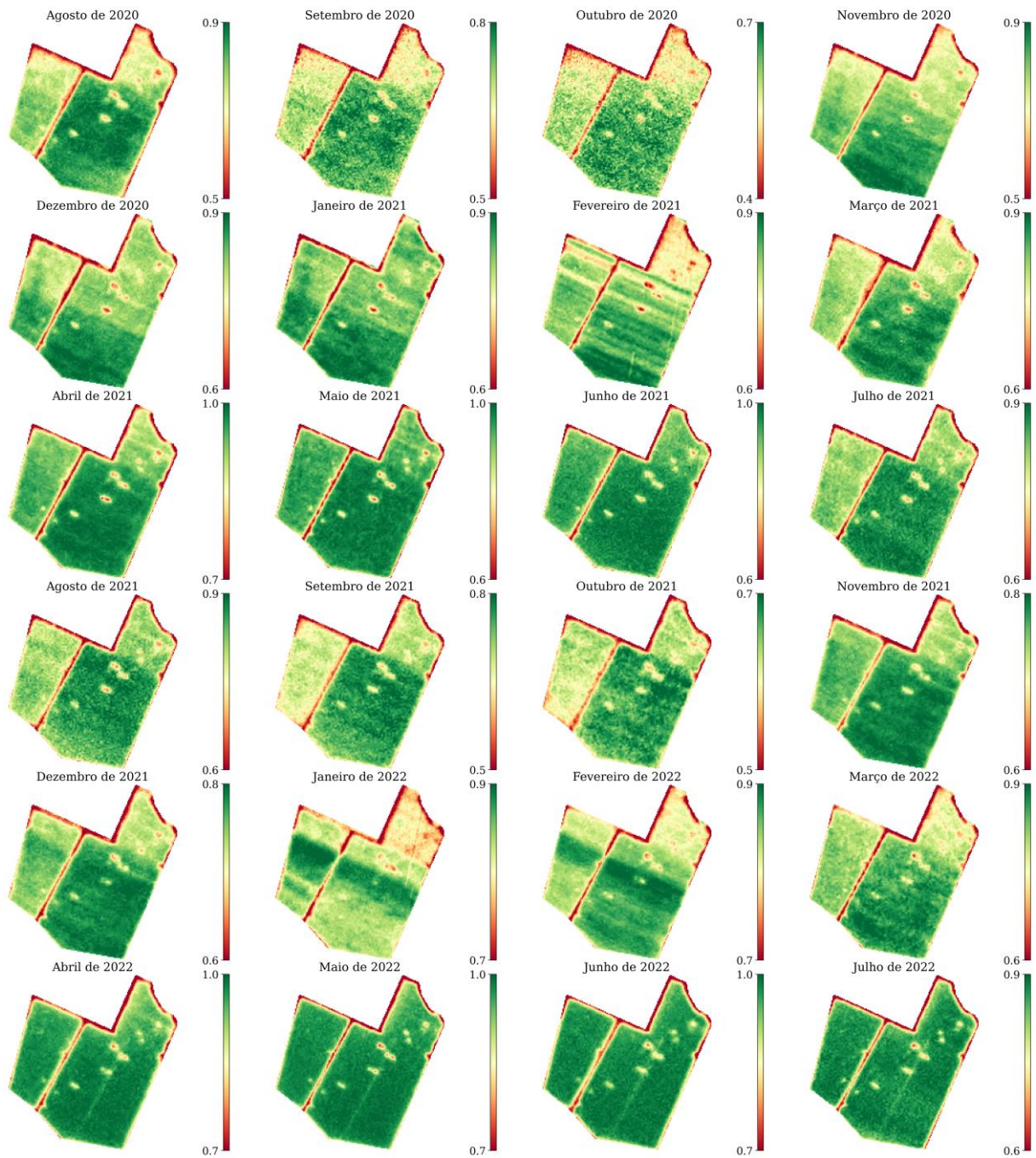
- SISHODIA, R. P.; RAY, R. L.; SINGH, S. K. **Applications of remote sensing in precision agriculture: A review.** *Remote Sensing*, v. 12, n. 19, p. 1–31, 2020.
- SMITH, G. M.; MILTON, E. J. **The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance.** *International Journal of Remote Sensing*, 20(13), 2653-2662, 1999.
- SOUZA, J. C.; REIS, P. R.; RIGITANO, R. L. O. **Bicho-mineiro do cafeeiro: biologia, danos e manejo integrado.** 2o ed. Belo Horizonte: EPAMIG, 1998.
- TSAI, F.; PHILPOT, W. **Derivative Analysis of Hyperspectral Data.** *Remote Sensing of Environment*, v. 66, n. 1, p. 41–51, 1998.
- VILELA, E. F.; FERREIRA, W. P. M.; CASTRO, G. D. M. DE; RIBEIRO DE FARIA, A. L.; LEITE, D. H.; LIMA, I. A.; MACHADO DE MATOS, C. S.; SILVA, R. A.; VENZON, M. **New Spectral Index and Machine Learning Models for Detecting Coffee Leaf Miner Infestation Using Sentinel-2 Multispectral Imagery.** *Agriculture*, v. 13, n. 2, p. 388, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/2/388>. Acesso em: 5 jan. 2024.
- WEISS, M.; JACOB, F.; DUVEILLER, G. **Remote sensing for agricultural applications: A meta-review.** *Remote Sensing of Environment*, v. 236, p. 111402, 2020. Elsevier.
- YANG, C. **Remote Sensing and Precision Agriculture Technologies for Crop Disease Detection and Management with a Practical Application Example.** *Engineering*, v. 6, n. 5, p. 528–532, 2020. Elsevier. Acesso em: 11/4/2022.
- ZAMPIROLI, R.; ALVARENGA, C. B. DE; ANDALÓ, V.; RINALDI, P. C.; ASSIS, G. A. DE. Application technology for chemically controlling coffee leaf miner in the cerrado of Minas Gerais State. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 60, n. 3, p. 256–262, 2017.

APÊNDICE I – Evolução temporal do NDVI nas imagens Planet para cada um dos 5 talhões avaliados na área de produção comercial

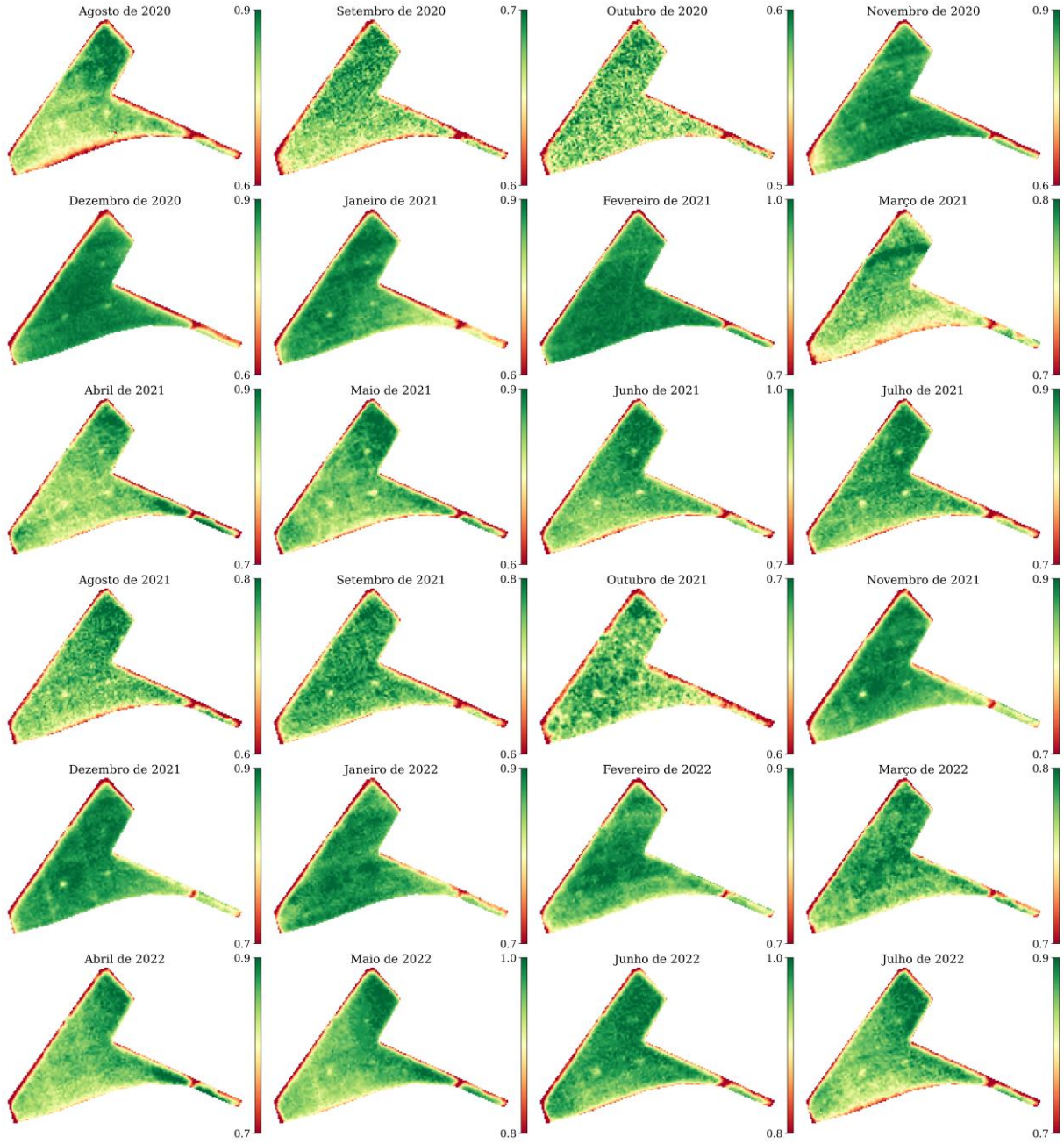
Talhão 1 (Imagens NDVI Planet)



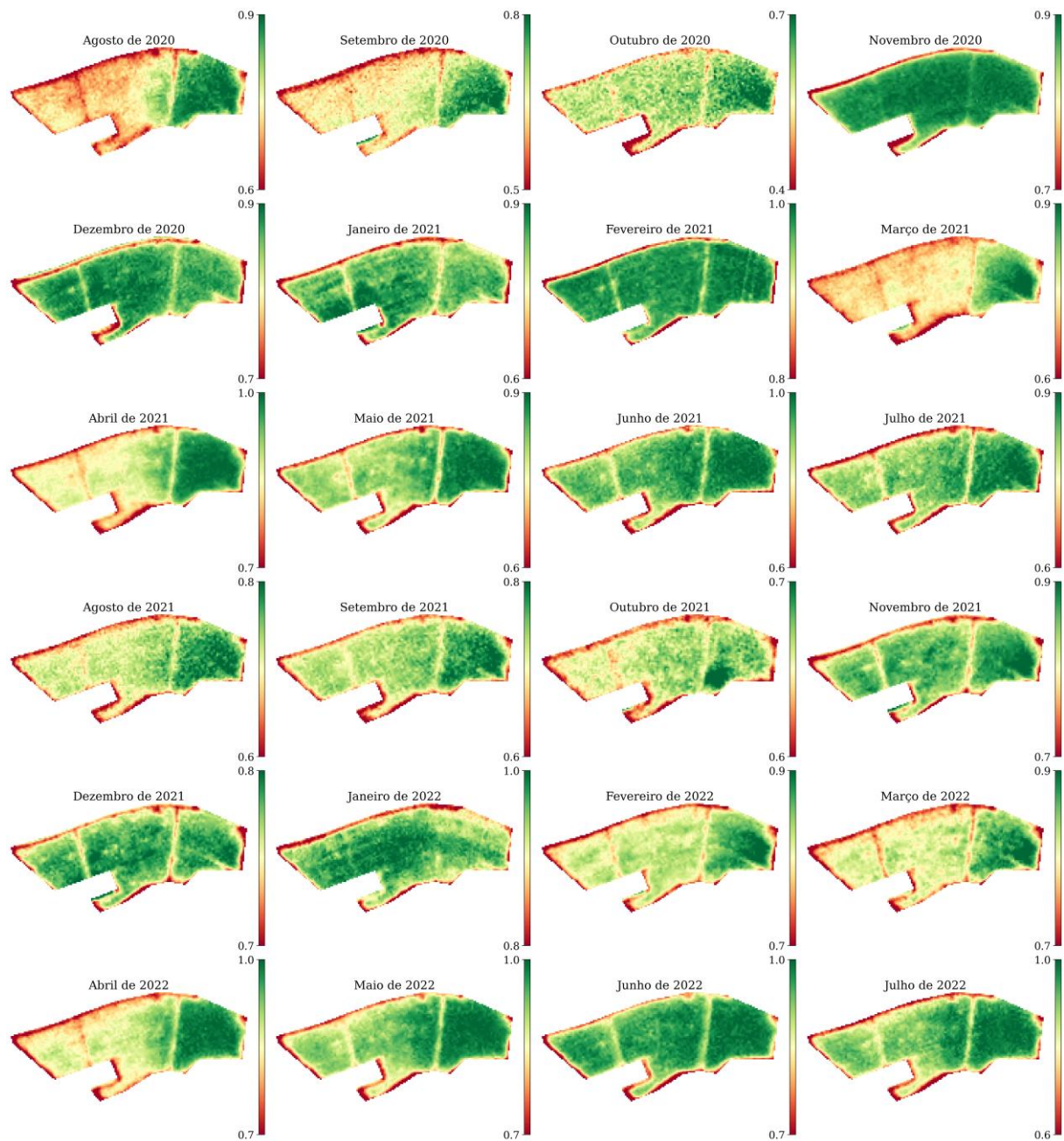
Talhão 2 (Imagens NDVI Planet)



Talhão 4 (Imagens NDVI Planet)

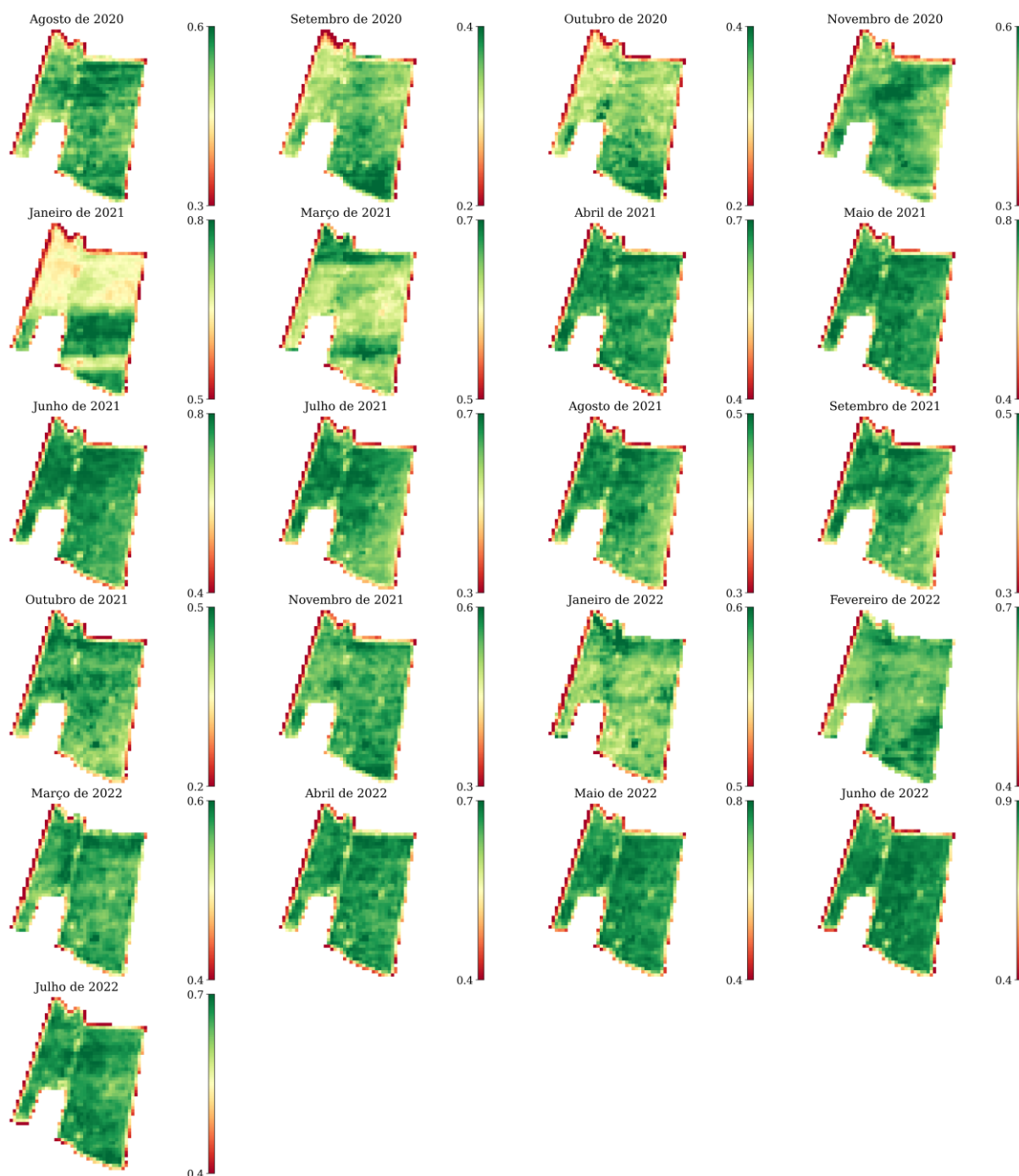


Talhão 5 (Imagens NDVI Planet)

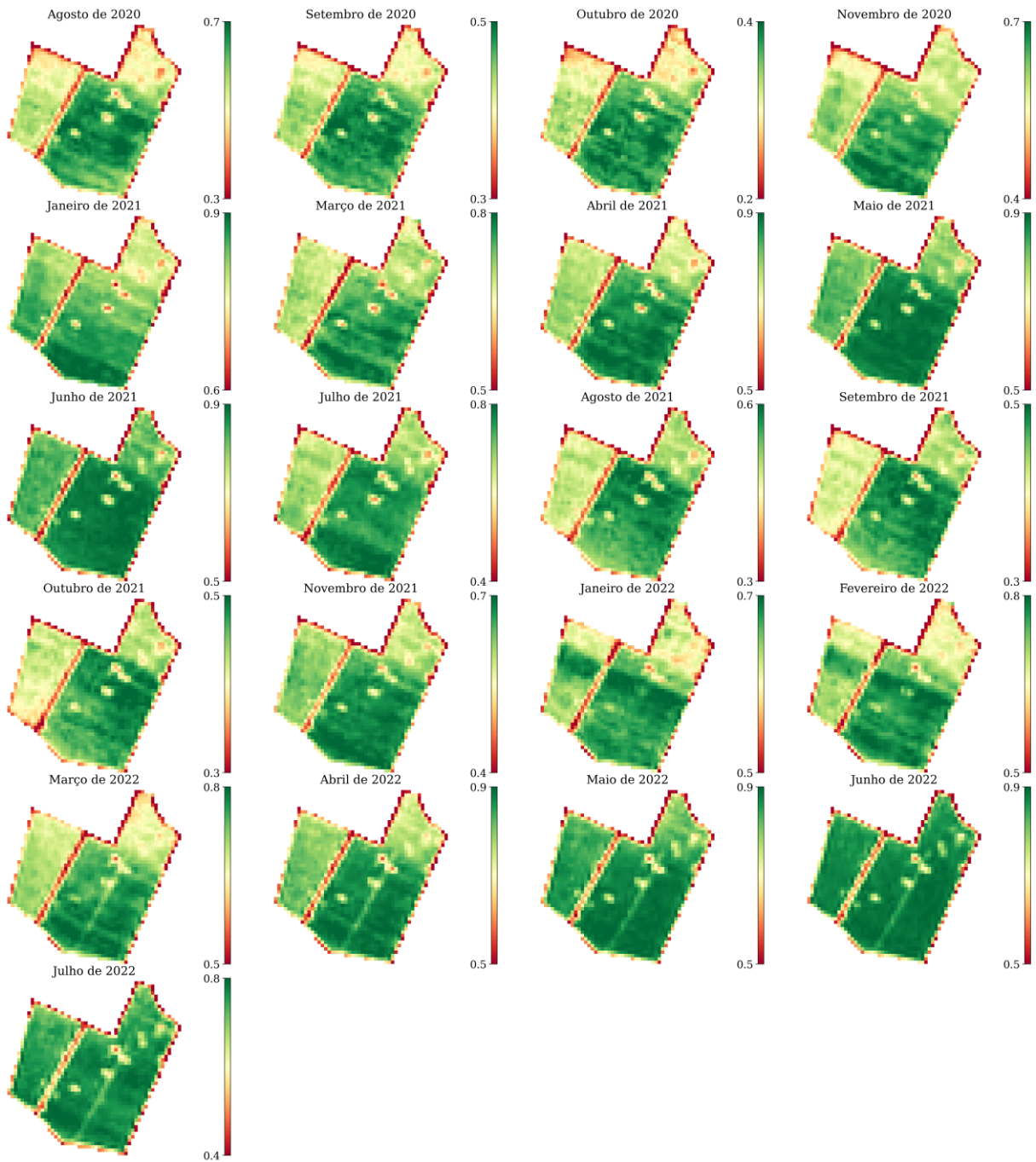


APÊNDICE II – Evolução temporal do NDVI nas imagens Sentinel-2A para cada um dos 5 talhões avaliados na área de produção comercial

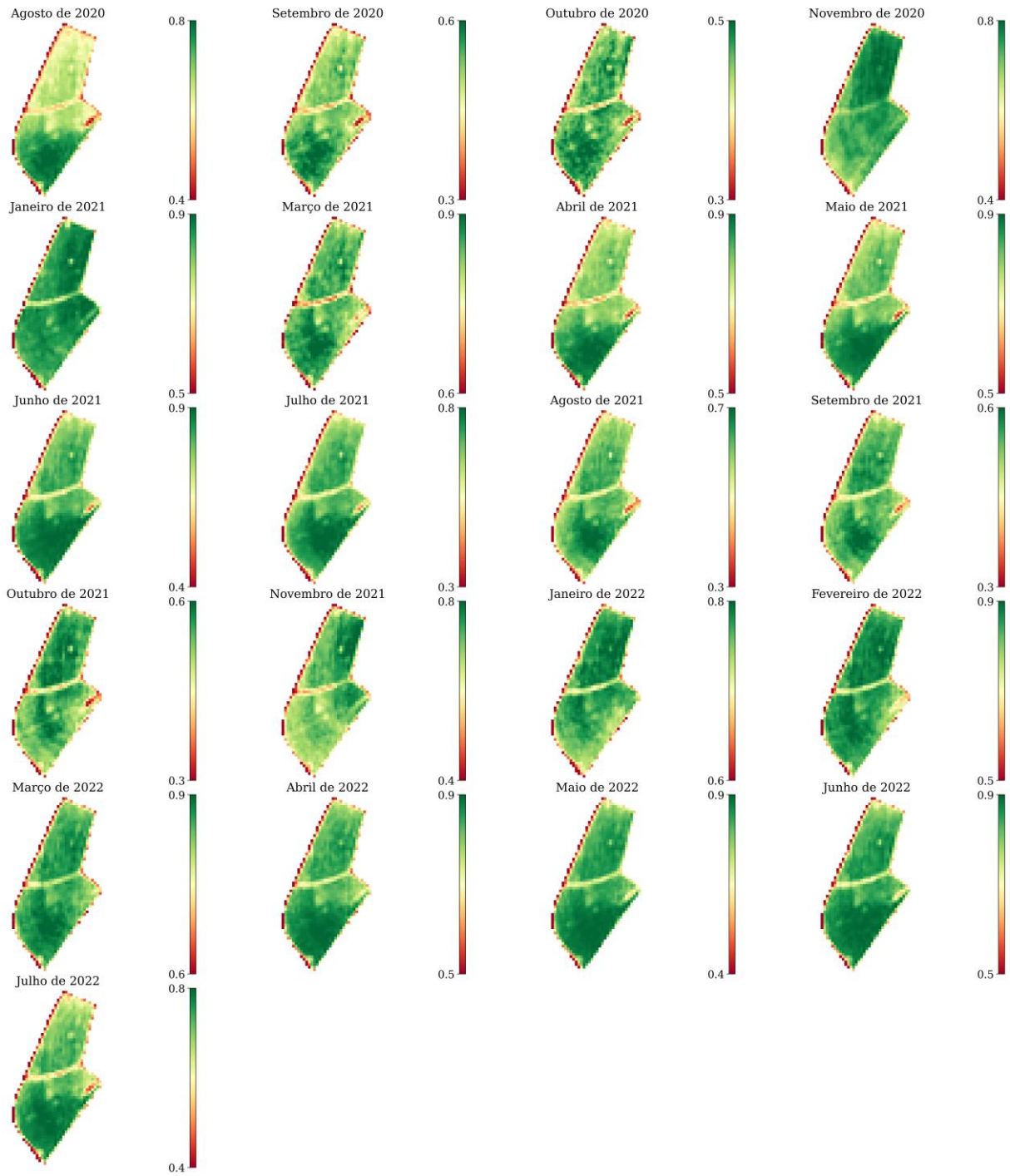
Talhão 1 (Imagens NDVI Sentinel)



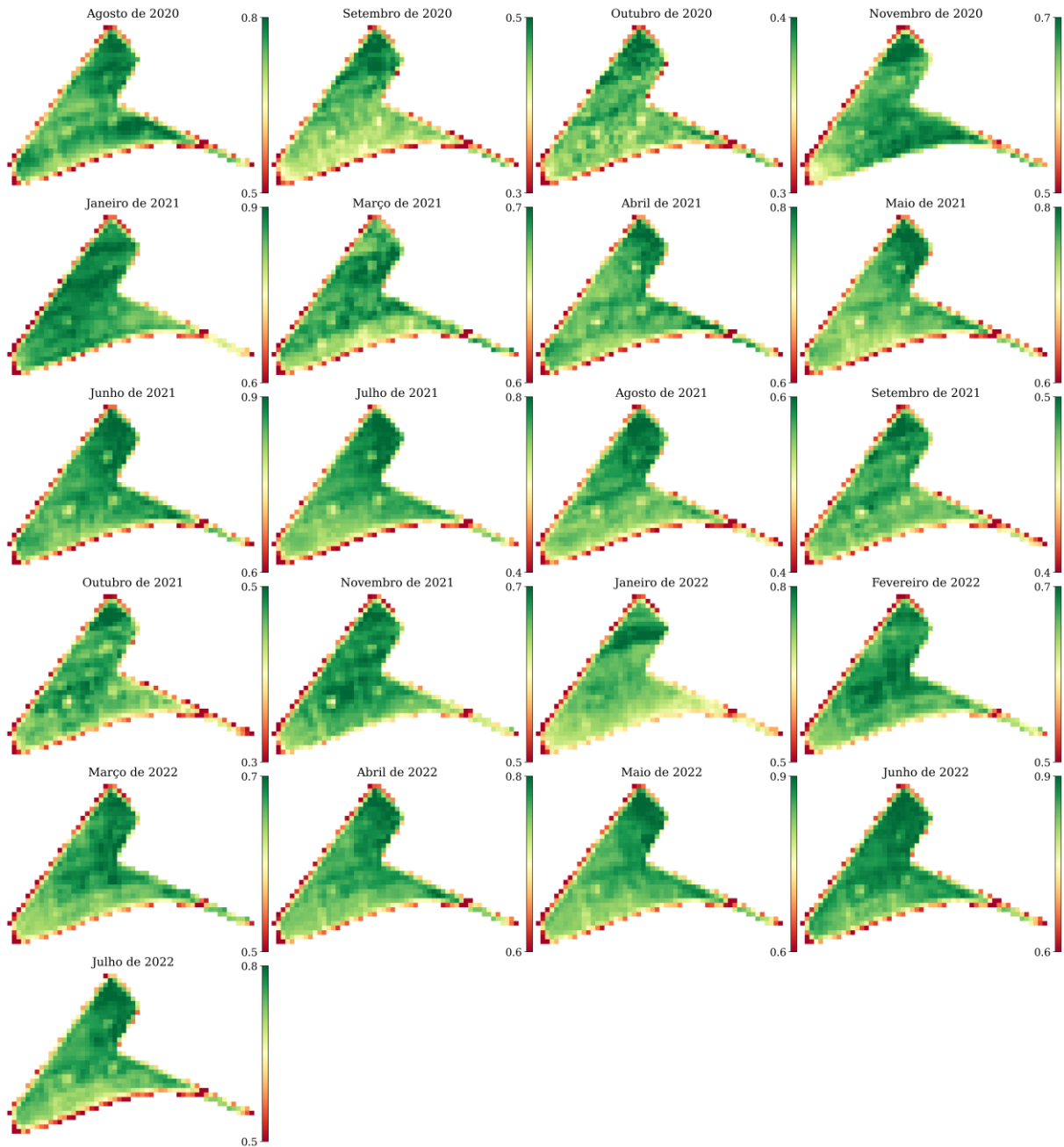
Talhão 2 (Imagens NDVI Sentinel)



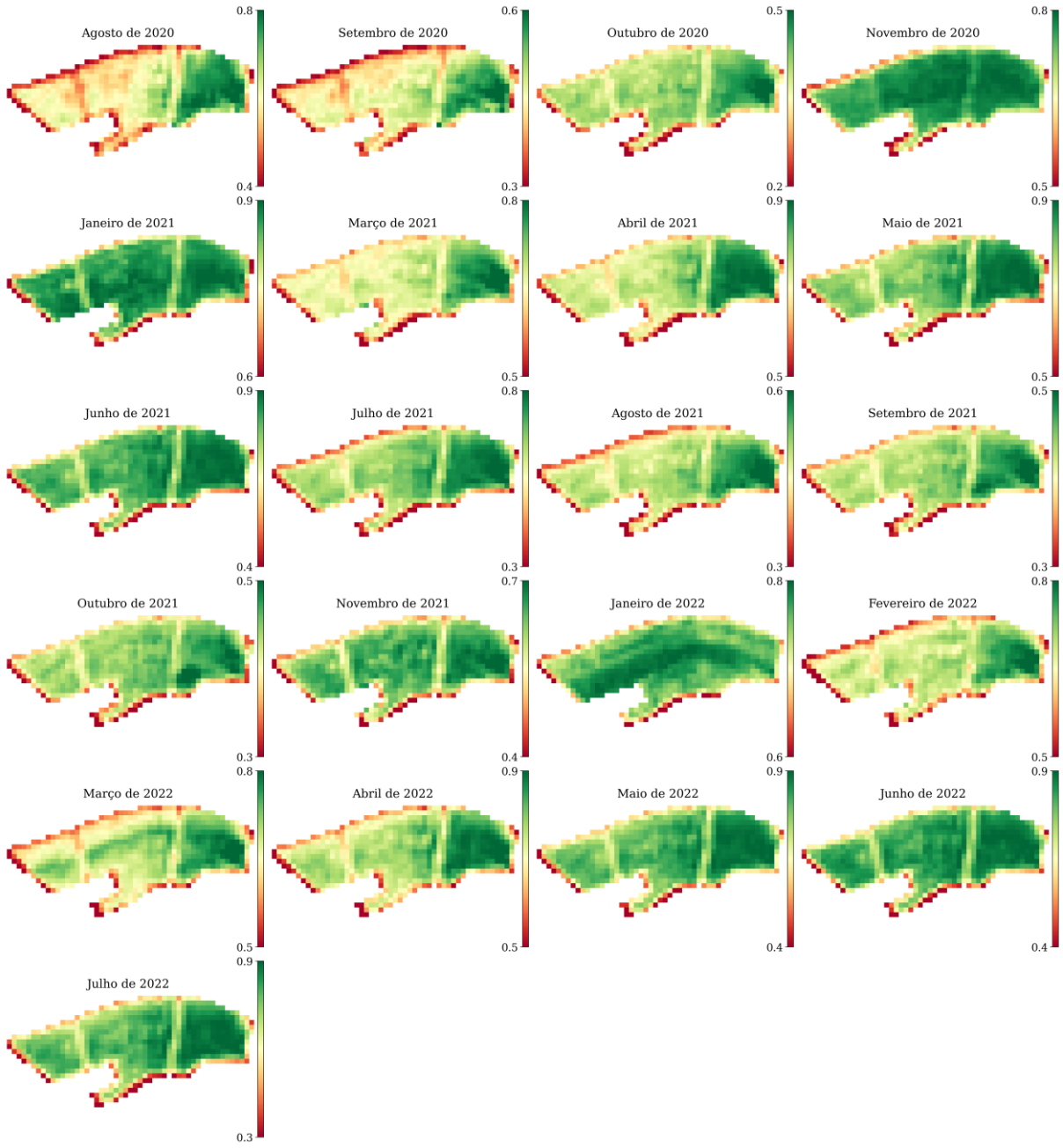
Talhão 3 (Imagens NDVI Sentinel)



Talhão 4 (Imagens NDVI Sentinel)



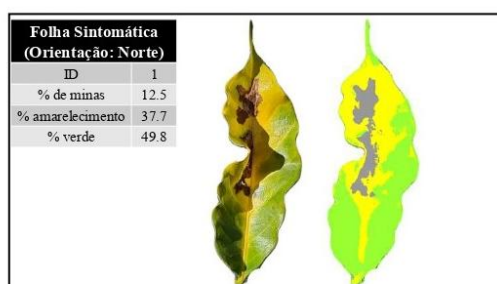
Talhão 5 (Imagens NDVI Sentinel)



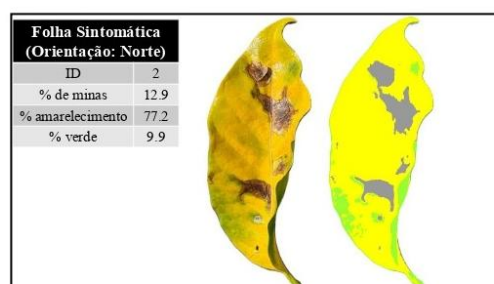
APÊNDICE III – Hiperparâmetros otimizados dos modelos com melhor desempenho para cada cenário

<i>Cenário</i>		<i>Modelo</i>	<i>Hiperparâmetros</i>
Hiperespectral	Talhão 1	XGB	subsample=0,6; n_estimators=210; max_depth=9; learning_rate=0,01; colsample_bytree=0,6
	Talhão 2	SVR-Linear	epsilon=0,05; C=0,1
	Talhão 2	SVR-RBF	gamma='auto'; epsilon=0,1; C=2
Multiespectral	Talhão 1 e 2	RF	n_estimators=210; min_samples_split=11; min_samples_leaf=6; max_depth=19

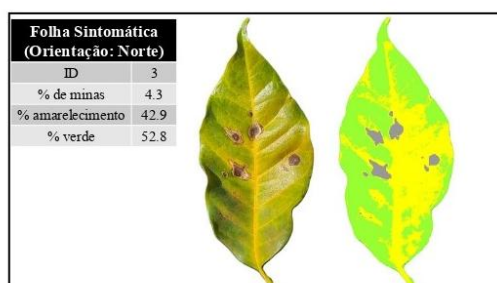
APÊNDICE IV – Resultado da classificação das folhas no software AFSoft



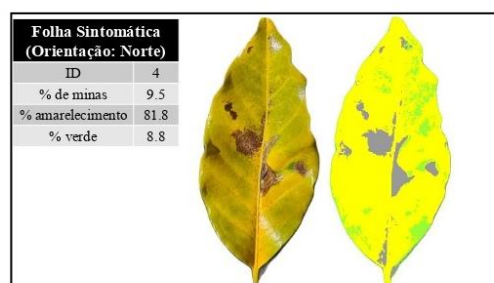
1



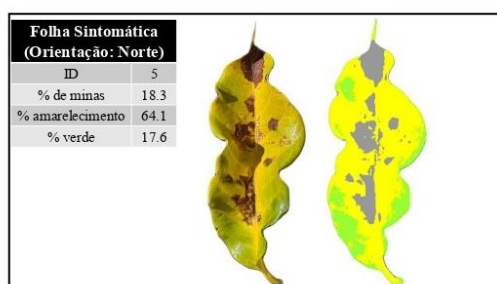
2



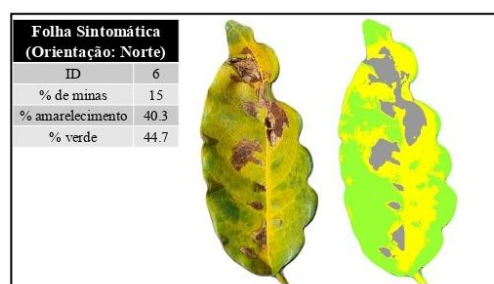
3



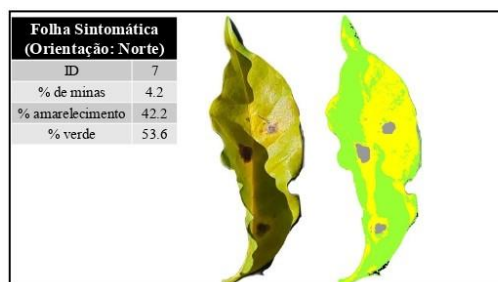
4



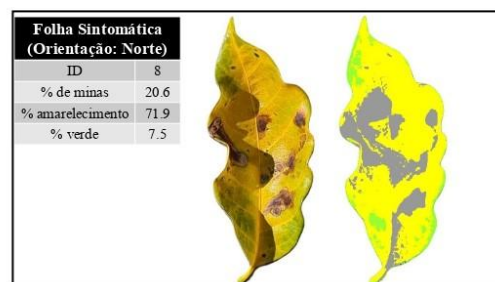
5



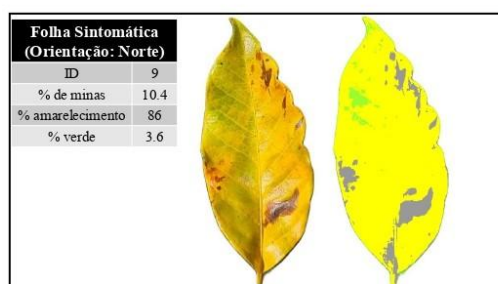
6



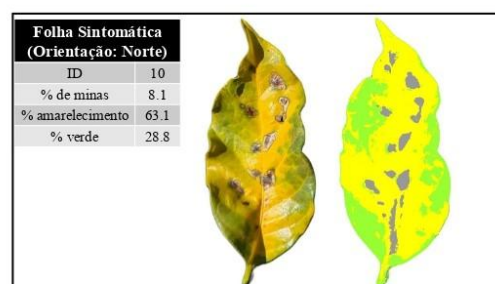
7



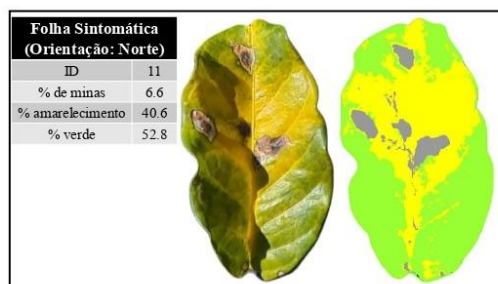
8



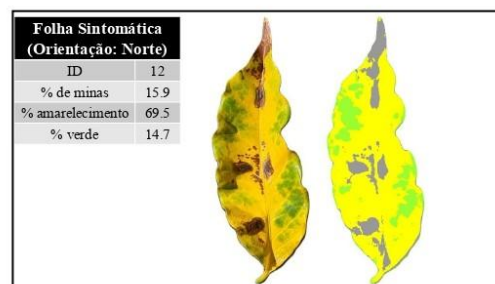
9



10

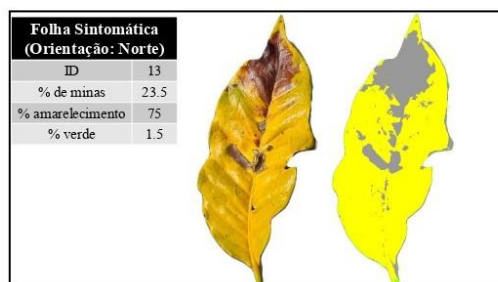


11

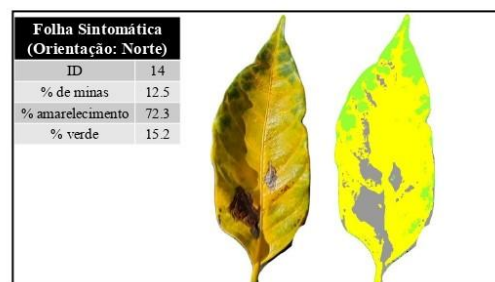


12

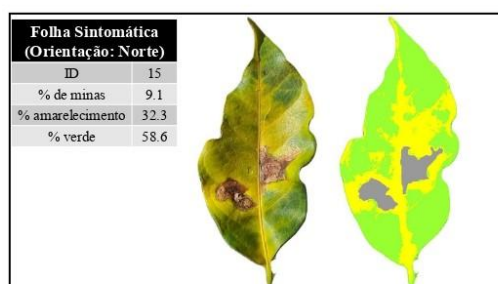
***Folha número 8:** Após identificar a classificação incorreta da porcentagem de minas, uma nova classificação foi realizada considerando somente a porcentagem de área verde e de minas. Calculou-se a média das duas classificações e, com base nisso, optou-se por reduzir a porcentagem de minas e aumentar a porcentagem de áreas amarelecidas. Em decorrência dessas mudanças, os valores apresentados na figura já foram ajustados.



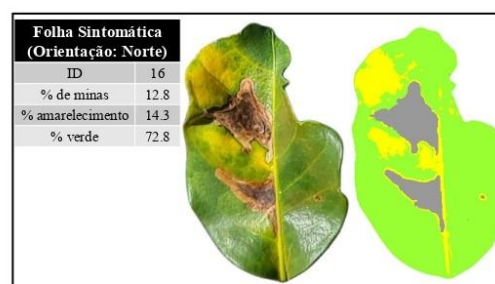
13



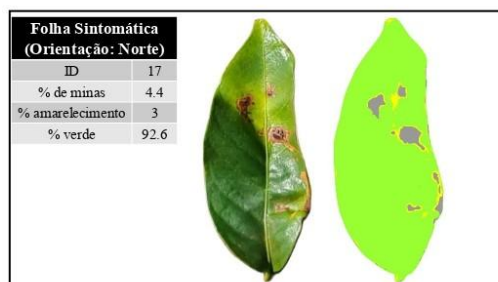
14



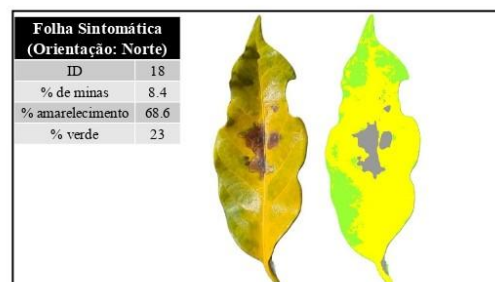
15



16

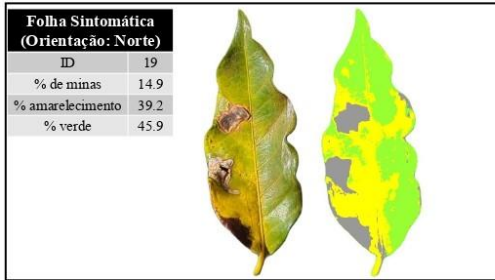


17

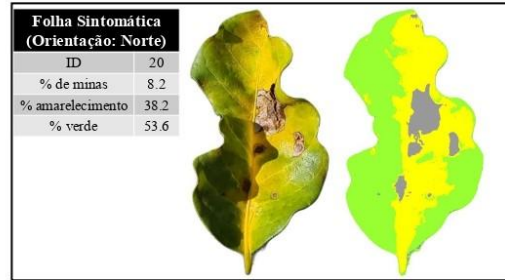


18

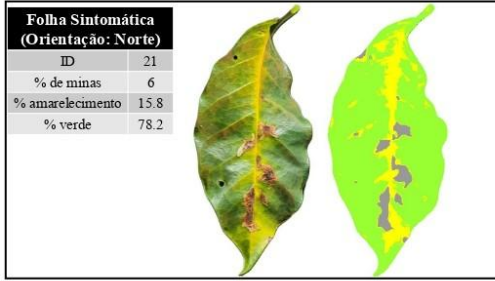
***Folha número 14:** Após identificar a classificação incorreta da porcentagem de minas, uma nova classificação foi realizada considerando somente a porcentagem de área verde e de minas. Calculou-se a média das duas classificações e, com base nisso, optou-se por reduzir a porcentagem de minas e aumentar a porcentagem de áreas amarelecidas. Em decorrência dessas mudanças, os valores apresentados na figura já foram ajustados.



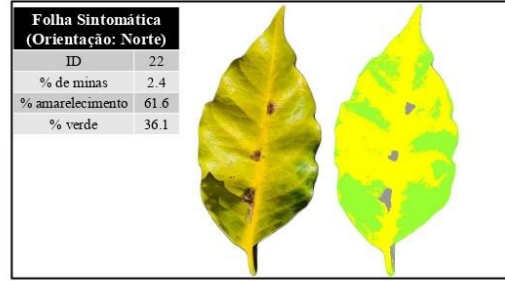
19



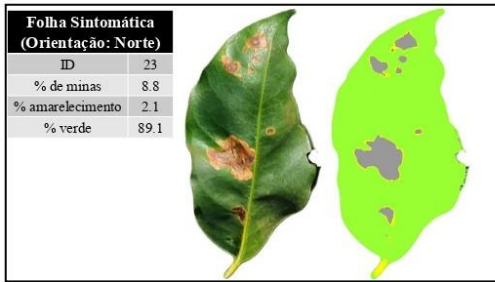
20



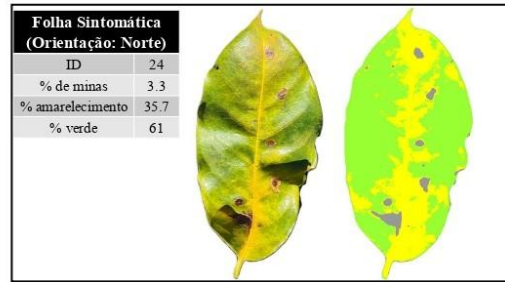
21



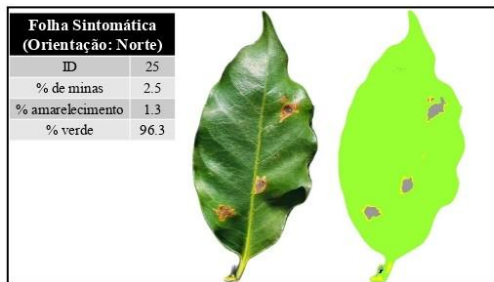
22



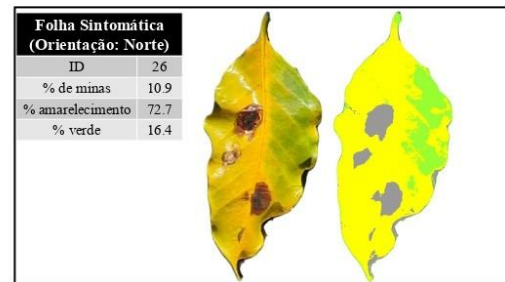
23



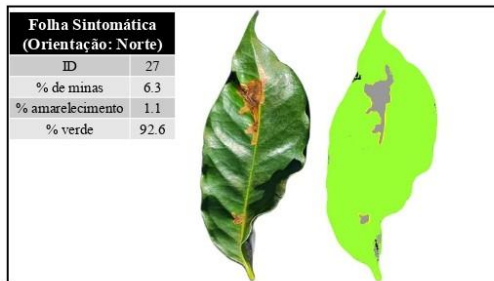
24



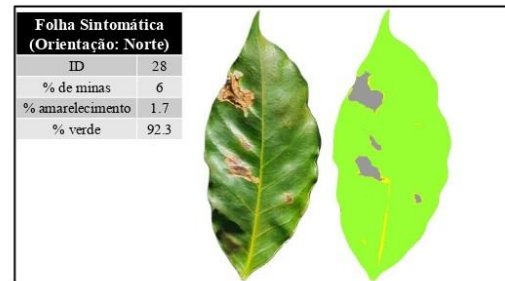
25



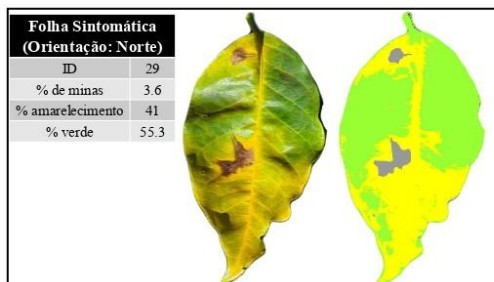
26



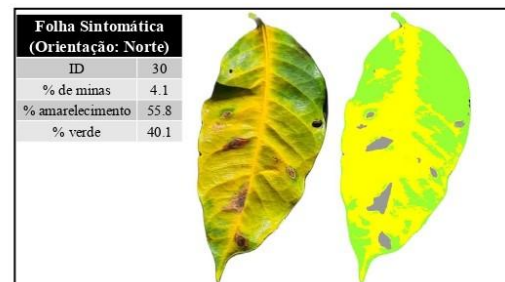
27



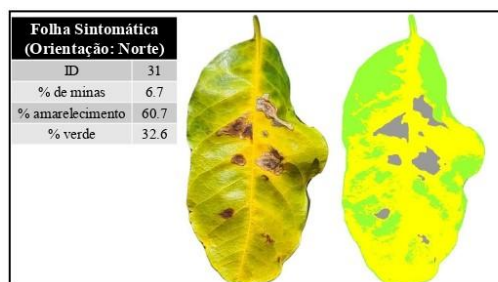
28



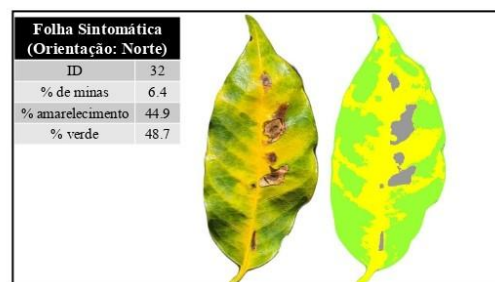
29



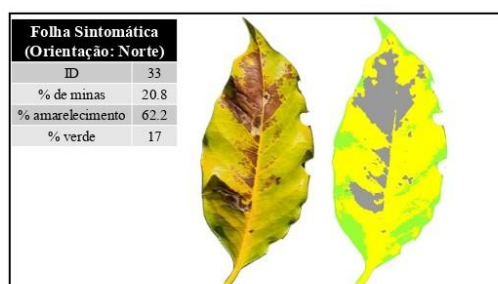
30



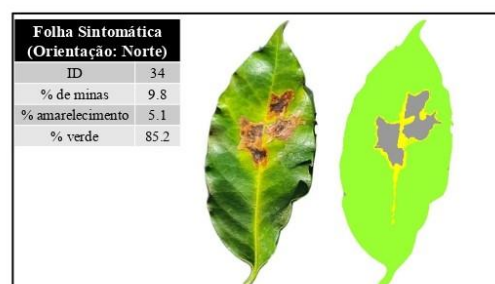
31



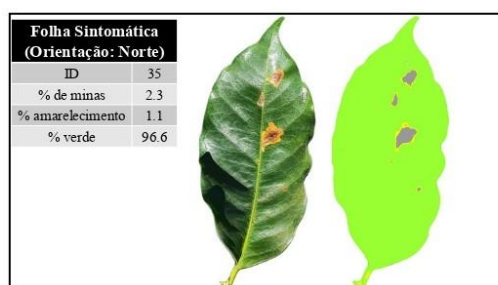
32



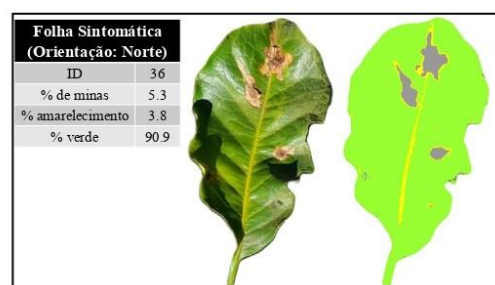
33



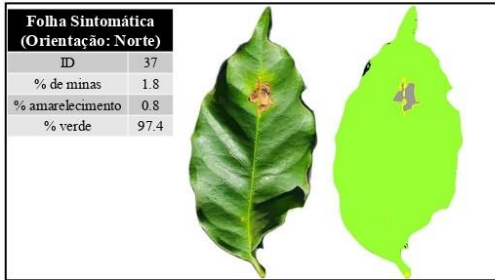
34



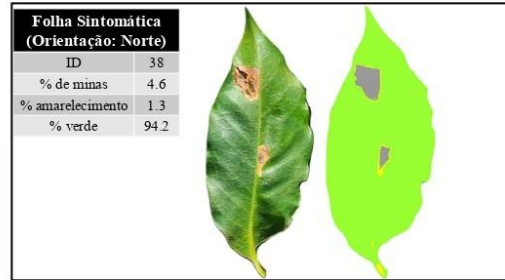
35



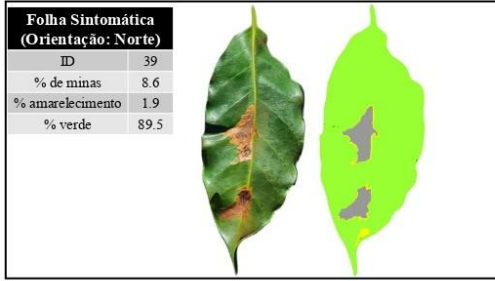
36



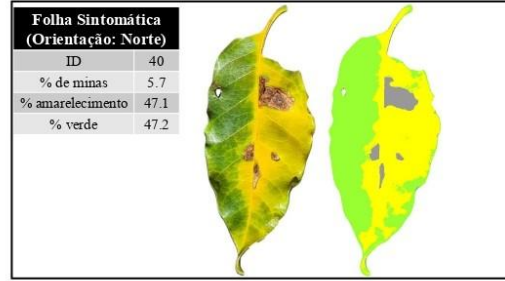
37



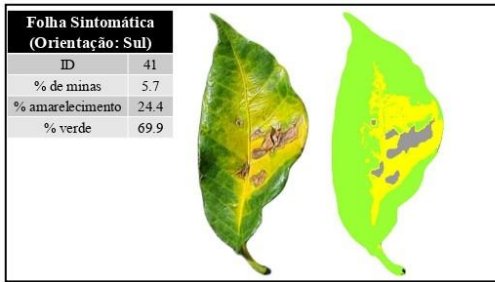
38



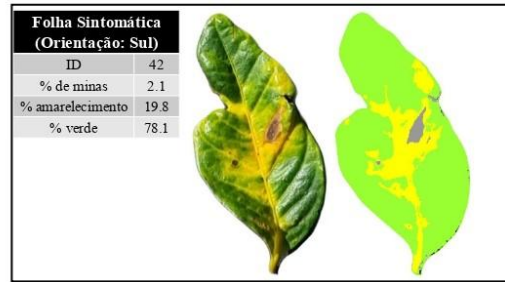
39



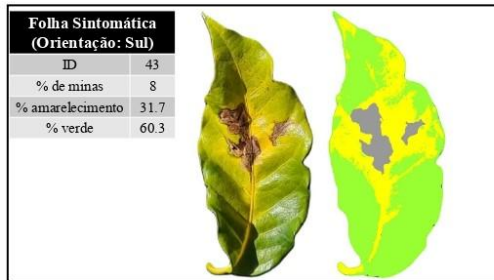
40



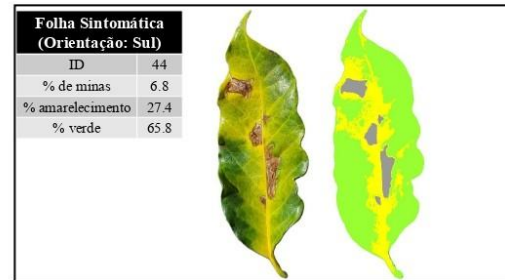
41



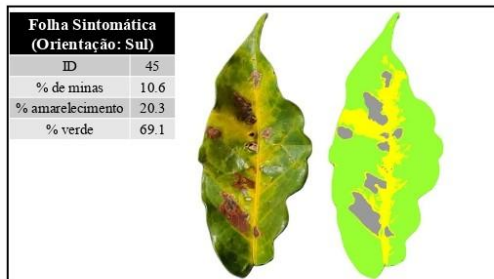
42



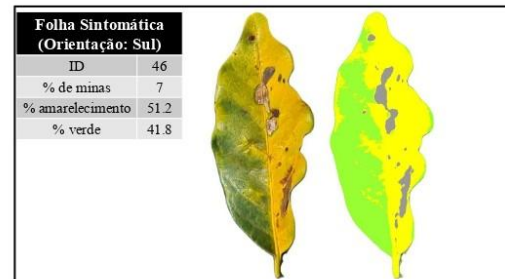
43



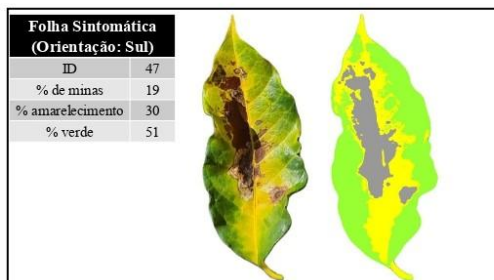
44



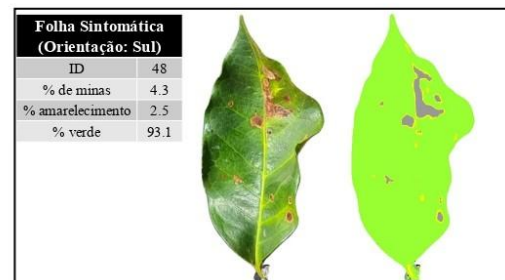
45



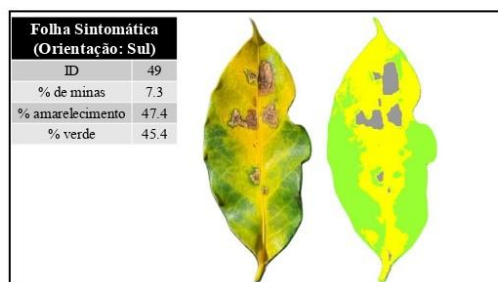
46



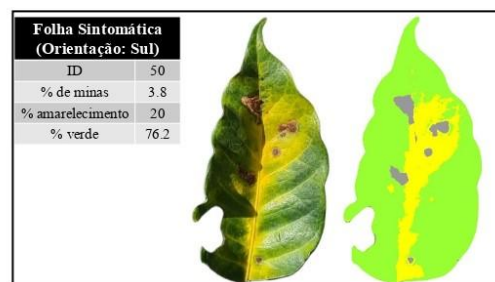
47



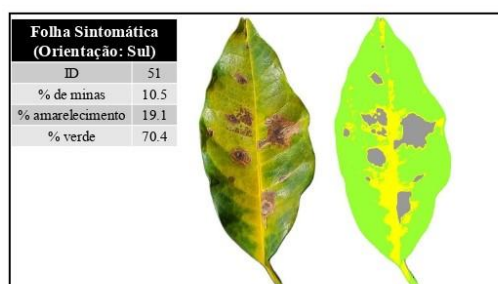
48



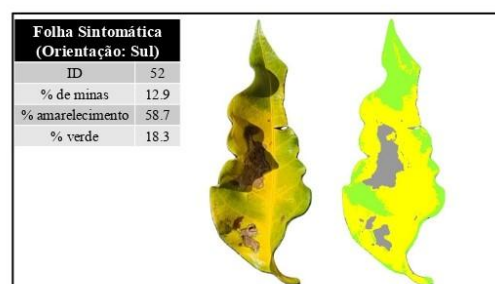
49



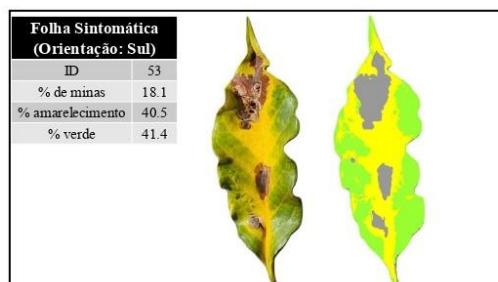
50



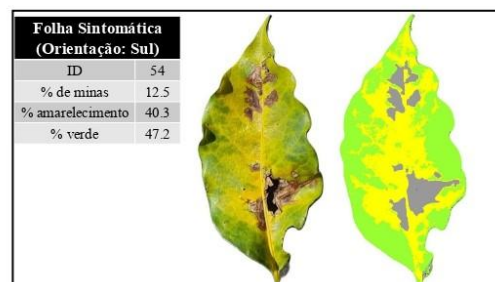
51



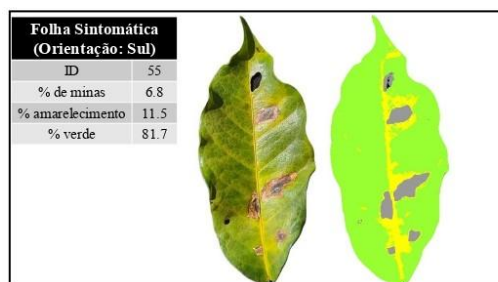
52



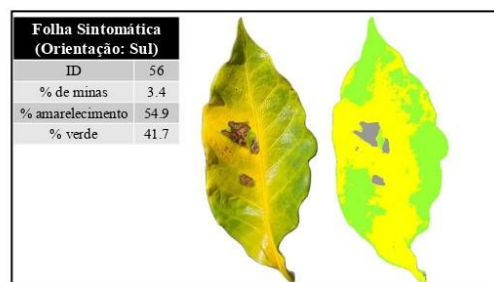
53



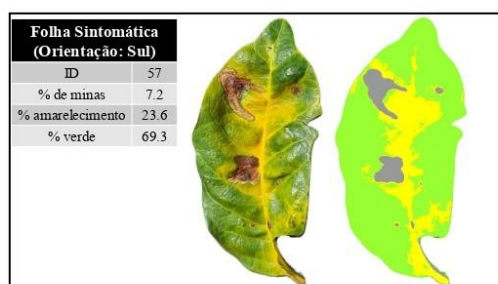
54



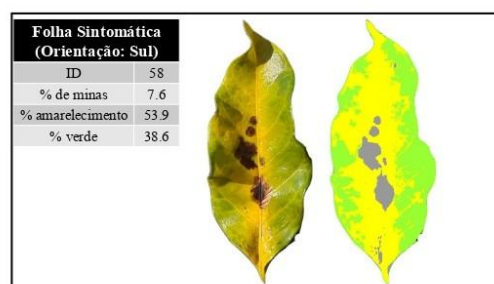
55



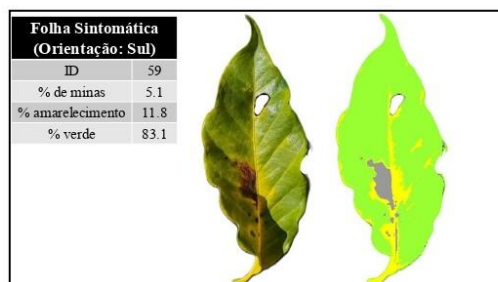
56



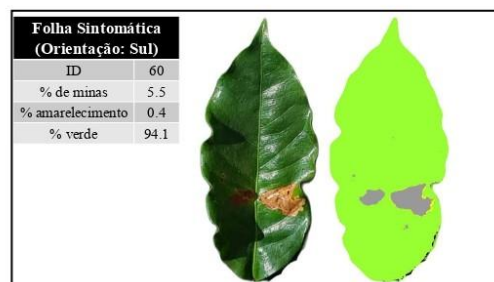
57



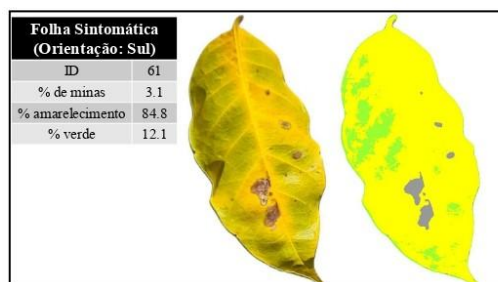
58



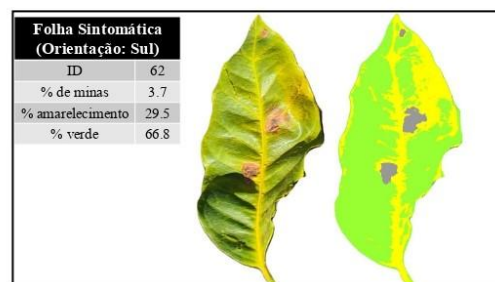
59



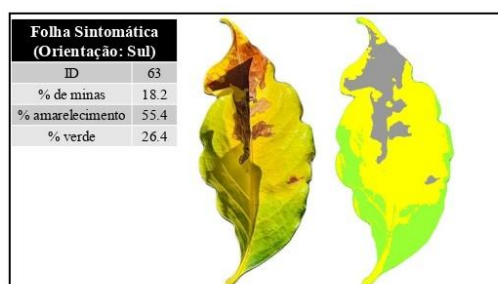
60



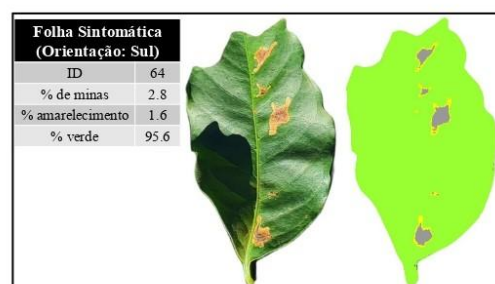
61



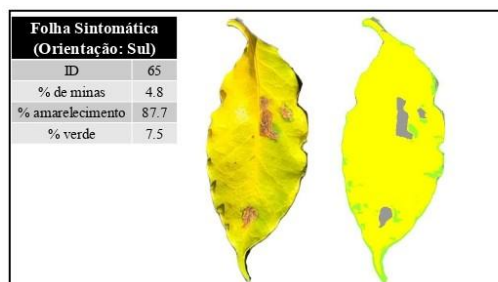
62



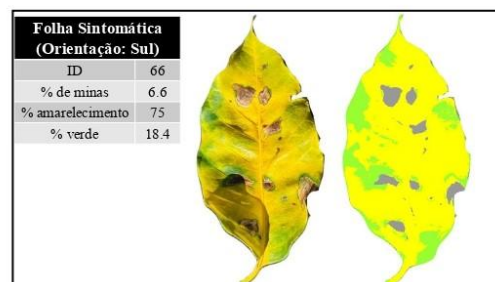
63



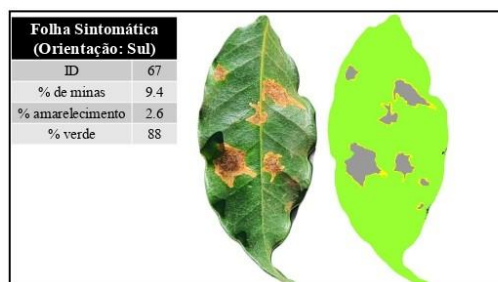
64



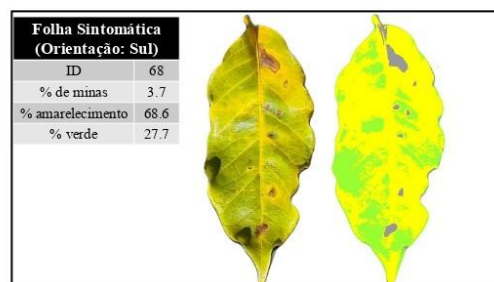
65



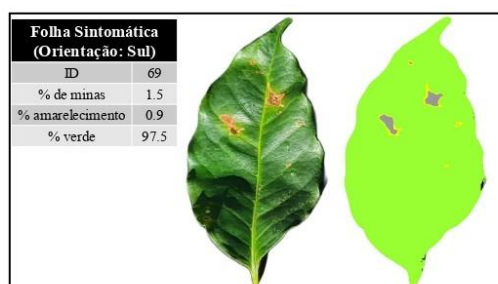
66



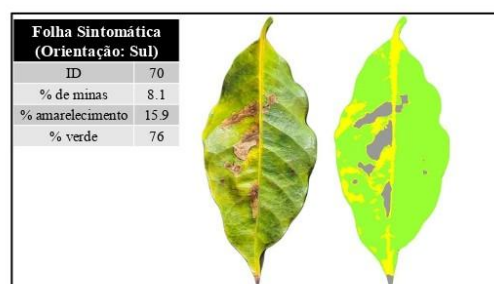
67



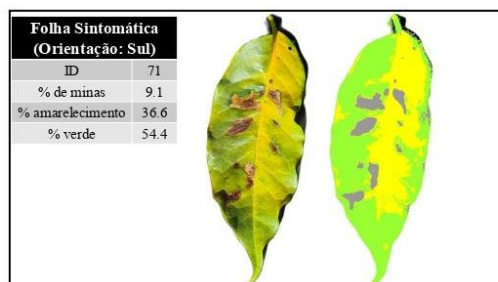
68



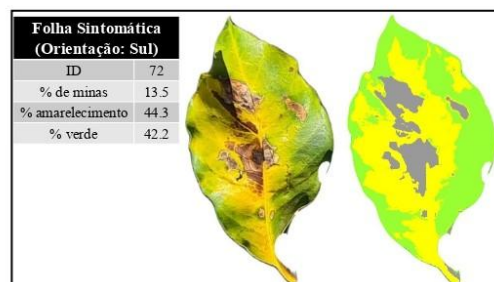
69



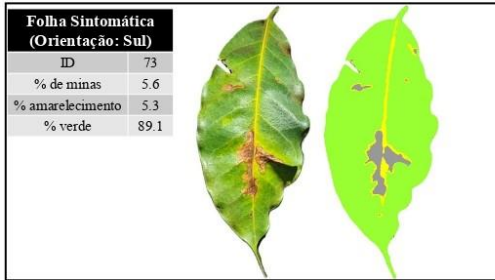
70



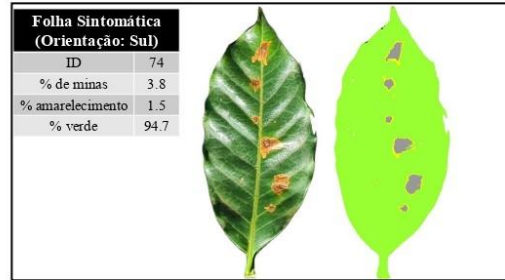
71



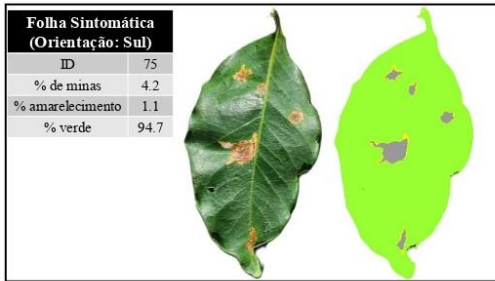
72



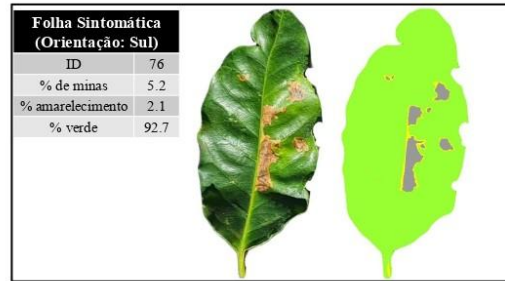
73



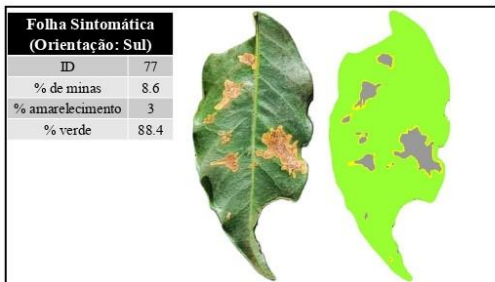
74



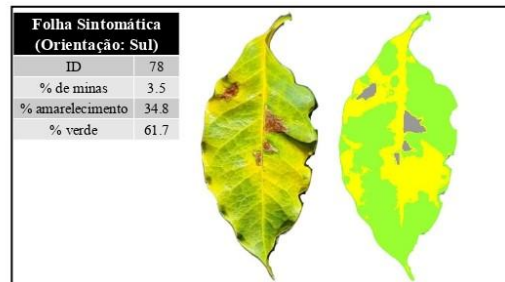
75



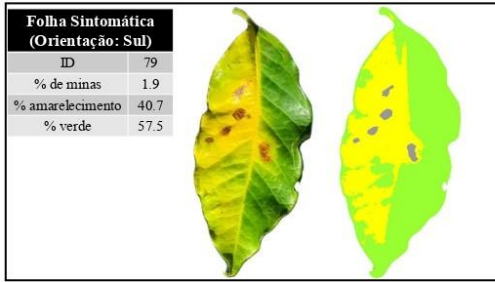
76



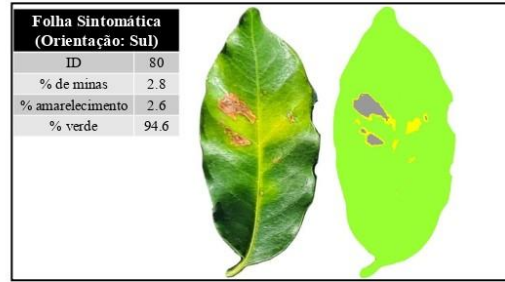
77



78



79



80

DADOS CURRICULARES

Vinicius Silva Werneck Orlando

Nascimento: 15/09/1996

Nacionalidade: Brasileiro

Citação: ORLANDO, V. S. W.; ORLANDO, VINICIUS SILVA WERNECK; ORLANDO, Vinicius S. W.

Curriculum Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1012635221566619>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0847-9864>

FORMAÇÃO ACADÊMICA

2015/2019: Graduação em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica

Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus Monte Carmelo, MG, Brasil.

Título: "Avaliação do potencial de imagens multiespectrais tomadas por ARP no monitoramento do manejo da irrigação da cultura do café"

2019/2021: Mestrado em Agricultura e Informações Geoespaciais

Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus Monte Carmelo, MG, Brasil.

Título: "Imagens multiespectrais orbitais: ferramenta para discriminar manejos de fitonematoides do cafeeiro"

2021/2025: Doutorado em Ciências Cartográficas

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Campus de Presidente Prudente, SP, Brasil.

Título: "Detecção dos sintomas de infestação do bicho-mineiro do cafeeiro (*Leucoptera coffeella*) por meio de sensoriamento remoto multiescala"

2023/2024: Mobilidade para o Politecnico di Torino (PoliTo), Torino, Itália.