

VINICIUS SILVA WERNECK ORLANDO

**IMAGENS MULTIESPECTRAIS ORBITAIS: FERRAMENTA PARA
DISCRIMINAR MANEJOS DE FITONEMATOIDES DO CAFEIEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Agricultura e Informações Geoespaciais da Universidade
Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, como parte
das exigências para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Bruno Sérgio Vieira.

Coorientador

Prof. Dr. George Deroco Martins.

**MONTE CARMELO
MINAS GERAIS - BRASIL
2020**

VINICIUS SILVA WERNECK ORLANDO

**IMAGENS MULTIESPECTRAIS ORBITAIS: FERRAMENTA PARA
DISCRIMINAR MANEJOS DE FITONEMATOIDES DO CAFEIEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Agricultura e Informações Geoespaciais da Universidade
Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, como parte
das exigências para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 17 de dezembro de 2020

Banca examinadora

Prof. Dr. Bruno Sérgio Vieira – Instituto de Ciências Agrárias (UFU)

Prof. Dr. George Deroco Martins – Faculdade de Engenharia Civil (UFU)

Prof. Dr. Everaldo Antônio Lopes – Instituto de Ciências Agrárias (UFV)

Prof. Dr. Bruno Sérgio Vieira
Instituto de Ciências Agrárias (UFU)
(Orientador)

**MONTE CARMELO
MINAS GERAIS - BRASIL
2020**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

O71 2020	<p>Orlando, Vinicius Silva Werneck, 1996- Imagens multiespectrais orbitais: ferramenta para discriminar manejos de fitonematoides do cafeeiro [recurso eletrônico] / Vinicius Silva Werneck Orlando. - 2020.</p> <p>Orientador: Bruno Sérgio Vieira. Coorientador: George Deroco Martins. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Agricultura e Informações Geoespaciais. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.845 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Agronomia. I. Vieira, Bruno Sérgio, 1978-, (Orient.). II. Martins, George Deroco, 1987-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Agricultura e Informações Geoespaciais. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 631</p>
-------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações
 Geoespaciais
 Rodovia LMG 746, Km 01, s/nº, Bloco 1AMC, Sala 1A202, Monte Carmelo-MG, CEP 38.500-000
 Telefone: (34) 3810-1033 - ppgaig@iciag.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agricultura e Informações Geoespaciais				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico				
Data:	17/12/2020	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	12:00
Matrícula do Discente:	31922AIG014				
Nome do Discente:	Vinicius Silva Werneck Orlando				
Título do Trabalho:	Imagens multiespectrais orbitais: ferramenta para discriminar manejos de fitonematoides no cafeeiro				
Área de concentração:	Informações geoespaciais e tecnologias aplicadas à produção agrícola				
Linha de pesquisa:	Desenvolvimento e aplicações de métodos em informações geoespaciais				

Reuniu-se na sala virtual Google Meet (meet.google.com/mkk-gvyc-qdv) a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais, assim composta: Dr. George Deroco Martins (UFU), Dr. Everaldo Antônio Lopes (Universidade Federal de Viçosa/Campus Rio Paranaíba), Dr. Bruno Sérgio Vieira (UFU) – orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Bruno Sérgio Vieira, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Sergio Vieira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 17/12/2020, às 17:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **George Deroco Martins, Professor(a) do Magistério Superior**, em 17/12/2020, às 17:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Everaldo Antônio Lopes, Usuário Externo**, em 17/12/2020, às 17:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2466190** e o código CRC **ABBFC1A6**.

*Dedico
Aos meus pais Pablo e Maria José.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me abençoado, concedido saúde e força de vontade para superar todos os desafios.

Aos meus pais, Pablo e Maria José, pelo altruísmo, dedicação e incentivo a minha educação.

A minha companheira Letícia por toda ternura, apoio em campo e paciência nas horas difíceis.

Ao meu amigo Fernando pela amizade, apoio, e pelos momentos de descontração.

Aos meus amigos Leidiane, Samuel, Pablo, Rafael, Carlos, Rafael, Talita, Alice e ao técnico Valdiney pelo apoio aos levantamentos de campo.

Aos meus colegas da primeira turma da pós-graduação que serão lembrados para sempre pela boa convivência, amizade, ajuda e ensinamentos compartilhados.

Além destes, este trabalho não seria possível sem o estímulo, apoio, dedicação e comprometimento do meu orientador Prof. Dr. Bruno Sérgio Vieira e do meu coorientador Prof. Dr. George Deroco Martins que sempre me orientaram com sabedoria.

Agradeço também a Prof.^a Dra. Gleice Aparecida de Assis por todo apoio em campo e na escrita deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Everaldo Antônio Lopes por gentilmente ter aceitado o convite de também contribuir para este importante trabalho em minha vida.

Aos colaboradores da Fazenda Juliana que ofereceram apoio sempre que necessário, em especial ao Alfredo e ao seu Sebastião, sempre com um sorriso na portaria.

Finalmente, agradeço ao Programa de Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais, aos docentes por todo suporte acadêmico e à Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de realizar o curso de Mestrado. Muito obrigado a todos!

BIOGRAFIA

Vinicius Silva Werneck Orlando nasceu em Nova Friburgo, Rio de Janeiro, Brasil, 1996. Graduado em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Minas Gerais, Brasil em 2019. Seus interesses de pesquisa incluem o desenvolvimento de técnicas de processamento de imagem multiespectral em ambientes agrícolas.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	13
3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA NO ESTADO DA ARTE.....	13
4. JUSTIFICATIVA	15
5. MATERIAL E MÉTODOS	16
5.1 Área de Estudo e condições gerais do experimento	17
5.2 Descrição dos tratamentos	18
5.3 Amostragem de solo para a análise nematológica.....	19
5.4 Avaliação da produtividade das parcelas.....	21
5.5 Avaliação dos parâmetros agronômicos	21
5.6 Aquisição das imagens multiespectrais	21
5.7 Geração dos índices de vegetação	22
5.8 Classificação supervisionada por Árvores Aleatórias	23
5.8.1 <i>Conjunto de classificações: Tratamentos mais nematicidas</i>	24
5.8.2 <i>Conjunto de classificações: Tratamentos mais produtivos</i>	25
5.9 Análise da acurácia das classificações.....	25
6 RESULTADOS	27
6.1 Discriminação dos tratamentos mais nematicidas	27
6.2 Discriminação dos tratamentos produtivos.....	29
7 DISCUSSÃO	30
7.1 Discriminação dos tratamentos nematicidas.....	30
7.2 Discriminação dos tratamentos quanto à produtividade.....	32
8 CONCLUSÕES	33
REFERÊNCIAS	34

ORLANDO, VINICIUS SILVA WERNECK. Imagens multiespectrais orbitais: ferramenta para discriminar manejos de fitonematoides do cafeeiro. 2020, 39p. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Informações Geoespaciais) - Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.845>

RESUMO

O sensoriamento remoto baseado em imagens multiespectrais pode ser uma ferramenta útil para detectar respostas de estresse na vegetação. Neste estudo foi avaliado o potencial da imagem orbital multiespectral em discriminar as estratégias mais eficazes na redução das populações de fitonematoides e no aumento da produtividade do cafeeiro. As plantas foram tratadas com sete isolados de *Bacillus* separadamente (*B. subtilis* isolados B18, B202 e B33; *B. thuringiensis* isolado B22; *B. safensis* isolado B53; *B. amyloliquefaciens* isolado B266; *B. methylotrophicus* isolado B05); produto biológico comercial baseado em *B. subtilis* + *B. licheniformis* (BC); aplicação combinada de abamectina + CB (QBC); nematicida químico comercial fluensulfone (QC); e água foi aplicada como controle negativo. Avaliou-se a população inicial e final de fitonematoides no solo, a produtividade do cafeeiro e outras características agrônomicas. Os dados radiométricos foram obtidos do sensor multiespectral orbital Planet. Os dados foram classificados usando o algoritmo de árvores aleatórias. A população de fitonematoides foi reduzida em 50,45% e 65,12% após a aplicação dos isolados B33 e B266. As plantas tratadas com QBC tiveram o maior rendimento em produtividade. A imagem multiespectral foi mais precisa em discriminar a maioria dos tratamentos nematicidas do que os parâmetros agrônomicos com exatidão global (EG) de 80% versus 75,75%, respectivamente. Os parâmetros agrônomicos foram os estimadores mais confiáveis para a produtividade do cafeeiro (EG = 100%) em comparação com a imagem multiespectral que apresentou EG máximo de 83,63%. Assim, a imagem orbital multiespectral pode discriminar os tratamentos mais eficazes usados para o manejo de fitonematoides no cafeeiro.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Controle Biológico. *Bacillus* spp. Aprendizado de máquina. Árvores aleatórias.

ORLANDO, VINICIUS SILVA WERNECK. Orbital multispectral imaging: tool for discriminating management strategies of nematodes in coffee. 2020, 39p. Dissertation (Master's Degree in Agriculture and Geospatial Information) - Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brazil. Available in: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.845>

ABSTRACT

Remote sensing based on multispectral imaging may be a useful tool to detect vegetation stress responses. In this study, we assessed the potential of orbital multispectral imaging in discriminating the most effective strategies in reducing plant-parasitic nematode populations and in increasing the yield of coffee. The plants were treated with seven *Bacillus* isolates separately (*B. subtilis* isolates B18, B202 and B33; *B. thuringiensis* isolate B22; *B. safensis* isolate B53; *B. amyloliquefaciens* isolate B266; *B. methylotrophicus* isolate B05); commercial biological product based on *B. subtilis* + *B. licheniformis* (BC); combined application of abamectin + CB (QBC); commercial chemical nematicide based on fluensulfone (QC); Water was applied as a negative control. The initial and final nematode population in the soil, coffee yield, and other agronomical traits were assessed. Radiometric data were obtained from the Planet orbital multispectral sensor. The data were classified using the random tree algorithm. The population of plant-parasitic nematodes was reduced by 50.45% and 65.12% after the application of the isolates B33 and B266. Plants treated with QBC had the highest yield. Multispectral imaging was more accurate in discriminating the most nematicidal treatments than the agronomical parameters, with global accuracy (GA) of 80% versus 75.75%, respectively. The agronomic parameters were the most reliable estimators for coffee yield (GA = 100%) in comparison to multispectral imaging, which had a maximum GA of 83.63%. Thus, orbital multispectral imaging can discriminate the most effective treatments used for nematode management in coffee.

Key-words: Remote sensing. Biological control. *Bacillus* spp. Machine learning. Random trees.

1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto da vegetação é uma metodologia não destrutiva, sustentável, menos onerosa e apta ao mapeamento agrícola (ALI et al., 2019). O registro de informações corresponde basicamente aos valores de reflectância da parte aérea das plantas. Em relação à região espectral do visível, estes valores são influenciados por pigmentos geralmente encontrados nos cloroplastos, como é o caso da clorofila (65%), os carotenos (6%) e as xantofilas (29%), variando de espécie para espécie. Já na região do infravermelho-próximo, há maiores valores dos fatores de reflectância em decorrência do espalhamento nas lacunas internas da folha (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

A partir dos sensores remotos é viável analisar os mais diversos parâmetros biofísicos da vegetação (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012; FORMAGGIO; SANCHES, 2017) tal como para o monitoramento de níveis de severidade de infecções de fitonematoides no cafeeiro em campo (MARTINS, 2016; MARTINS; GALO; VIEIRA, 2017). Estima-se que a ação destes fitopatógenos no sistema radicular das plantas reduz cerca de 20% da produção nacional de café (OLIVEIRA; ROSA, 2018).

Os fitonematoides induzem o estresse biótico na planta limitando seu crescimento, interrompendo o metabolismo ou até mesmo provocando a sua mortalidade (HASHIM; TABASSUM; ABD_ALLAH, 2019). No cafeeiro o desenvolvimento e a reprodução dos fitonematoides podem ocorrer durante todo o ano, mas é no verão, época de maior pluviosidade em que há aumento da população de fitonematoides (SALGADO et al., 2011).

Dentre as práticas utilizadas para o manejo dos fitonematoides, os nematicidas químicos possuem aplicação ágil e, em alguns casos, são eficientes, mas podem ser onerosos e insustentáveis para a biota do solo. Já a opção pelo uso de cultivares resistentes aos fitonematoides oferecem poucas cultivares disponíveis ao agricultor (FERRAZ; FREITAS, 2008). A limpeza de equipamentos e o uso de material de plantio isento de nematoides são os principais procedimentos para dificultar a dispersão destes patógenos (FERRAZ et al., 2010). Quanto ao manejo por rotação de culturas, apesar de melhorar as características gerais do solo e diminuir drasticamente as populações de fitonematoides no solo, é opção inviável em culturas perenes como a do cafeeiro.

Uma alternativa é o controle biológico por meio da utilização de rizobactérias como *Bacillus* spp., que tem sido utilizado para interromper o desenvolvimento do ciclo dos fitonematoides não só em cafeeiros (TOLARDO et al., 2019) como também em outras culturas incluindo soja (ARAÚJO; SILVA; ARAÚJO, 2002), feijoeiro (FERNANDES et al.,

2013) e tomateiro (FERNANDES et al., 2014). A avaliação da eficácia de isolados bacterianos visando à diminuição de fitonematoides nas culturas agrícolas pode ser dada por meio de avaliações nematológicas de solo e avaliação de parâmetros agronômicos na parte aérea das plantas.

A partir de informações agronômicas e de sensores é possível automatizar o processamento e a classificação de dados relativos à avaliação da eficiência de manejo de fitonematoides em campo com técnicas de aprendizado de máquina. Neste processo, o operador identifica alguns dos pixels pertencentes às classes desejadas, permitindo que o computador localize os demais pixels pertencentes àquelas classes, baseado em uma regra estatística pré-estabelecida (ZANOTTA; ZORTEA; FERREIRA, 2019). Dentre estes, um algoritmo muito utilizado é o de Árvores Aleatórias. Este seleciona um conjunto aleatório de dados para construir uma árvore de decisão, tendo como resultado as classes que receberam a maioria dos “votos” (KALMEGH, 2015). As árvores de classificação são usadas quando a variável dependente é qualitativa. Neste caso, a classe obtida pelo nó de término nos dados de treinamento é a moda das suas observações.

A hipótese deste trabalho foi que imagens multiespectrais podem ser usadas como ferramentas para identificar tratamentos mais nematocidas e os mais produtivos em condições de campo para a cultura do cafeeiro.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo foi avaliar o potencial de imagens multiespectrais em discriminar diferentes manejos de fitonematoides na cultura do cafeeiro.

Para tal, são apresentados os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o potencial de isolados de *Bacillus* spp. no manejo de fitonematoides do cafeeiro;
- Avaliar o potencial do sensoriamento remoto na distinção da eficácia de isolados do gênero *Bacillus* e produtos comerciais biológicos e químicos no manejo de fitonematoides e na produtividade do cafeeiro.

3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA NO ESTADO DA ARTE

Mazzuchelli, Mazzuchelli e Araújo (2020) avaliaram a aplicação de *Bacillus subtilis* no controle biológico de nematoides em dois genótipos de cana-de-açúcar em comparação com

controle químico convencional. O estudo foi conduzido em área naturalmente infestada com nematoides das galhas (*Meloidogyne* spp.) e causadores de lesões radiculares (*Pratylenchus* spp.). Os resultados apontaram que o controle biológico com *Bacillus subtilis* proporcionou controle efetivo dos nematoides em todos os ciclos de produção da cana-de-açúcar. Além disto, o controle biológico dos nematoides do gênero *Meloidogyne* foram superiores aos do gênero *Pratylenchus*.

Em casa de vegetação, Arita, Silva e Machado (2020) avaliaram a eficácia de quatro substâncias químicas e duas biológicas e um composto organo-mineral no controle de *Meloidogyne paranaensis* em cafeeiros do cultivar Mundo Novo. Os nematicidas biológicos não foram eficazes na redução da população dos nematoides, a aplicação do biológico à base do fungo *Purpureocillium lilacinum* aumentou o desenvolvimento das plantas.

Tolardo et al. (2019) avaliaram a eficiência de agentes biológicos e do controle genético no manejo de *Meloidogyne exigua* no cafeeiro em casa de vegetação, sendo compostos por dois genótipos (Mundo Novo IAC 376-4 e IPR-100) e pelos antagonistas *Bacillus subtilis*, *Bacillus methylophilus*, *Trichoderma asperellum*. Durante 150 dias foram realizadas avaliações mensais da altura de plantas, diâmetro de caule, número de pares de folhas e teores de clorofila. Foram observadas diferenças significativas para os parâmetros agronômicos avaliados em função do tempo. Os autores concluíram que o manejo com os três antagonistas juntos (*B. subtilis*, *B. methylophilus* e *T. asperellum*) possuem a propriedade de igualar ao manejo com a utilização da cultivar resistente (IPR100).

Nas últimas décadas, os sistemas de imagens aéreas com câmeras multiespectrais e hiperespectrais têm sido usados para detectar doenças que causem mudanças morfológicas e fisiológicas nas plantas. Apesar do sucesso do sensoriamento remoto em mapear muitas destas doenças, o maior desafio pode estar na detecção precoce do problema; uma vez que, na maioria dos casos, o dano já pode ter sido causado à produtividade. Entretanto, o manejo em tempo hábil é uma solução empregada para redução de danos já em curso (YANG, 2020).

Pires, Alves e Pozza (2020), por meio dos sensores orbitais Landsat-7/ ETM + e Landsat-8 / OLI-TIRS, exploraram os padrões espectrais, espaciais e temporais dos sensores para o monitoramento da cultura do cafeeiro sobre diferentes sistemas de irrigação e incidência da ferrugem no cafeeiro. Em áreas com altos valores de incidência da ferrugem, houve redução na refletância média das bandas do NIR (do inglês *Near-infrared*; infravermelho próximo) e verde. Nestas áreas, os autores identificaram também o aumento da refletância da banda do vermelho.

Miranda et al. (2020), através de imagens orbitais do satélite Landsat-8 / OLI,

detectaram antracnose no cafeeiro, causada por *Colletotrichum* spp. e que necrosa os grãos e afeta significativamente a produtividade. A precisão geral e o índice de precisão balanceada foram, em média, de 0,55 e 0,45, respectivamente para os algoritmos de aprendizagem de máquina Naive Bayes e Multilayer Perceptron com a correção atmosférica ATCOR.

A interferência negativa no funcionamento normal do sistema radicular das plantas induzida por fitonematoides pode causar diminuições no conteúdo de água, clorofila, níveis de carotenoides e antocianinas nas folhas, o que simultaneamente leva a mudanças da sua refletância do espectro eletromagnético. Assim, o uso de bandas do infravermelho pode ser utilizado para detectar os sintomas da doença antes do desenvolvimento de sintomas visíveis (HILLNHÜTTER et al., 2010).

Martins, Galo e Vieira (2017) utilizaram parâmetros biofísicos e dados de sensoriamento remoto orbital na discriminação e mapeamento de plantas de cafeeiro saudáveis, moderadamente infectadas e severamente infectadas por fitonematoides. Os autores usaram bandas do vermelho, red edge, infravermelho próximo, e o índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation*) e fizeram classificação multiespectral. Foi possível definir a distribuição espacial de plantas de cafeeiro saudáveis, moderadamente infectadas e severamente infectadas, com acurácia geral de 78% e coeficiente Kappa de 0,71.

4. JUSTIFICATIVA

Os desafios para pesquisas no campo das interações entre plantas e fitonematoides vão além das perdas de produtividade agrícola e monetárias. Há uma necessidade de prospecção de estratégias mais eficientes para controlar as populações e infecções de nematoides quando se trata de uma agricultura sustentável (SATO; KADOTA; SHIRASU, 2019).

Os nematicidas químicos podem ser usados no controle dos fitonematoides, mas são capazes de causar impacto prejudicial no ecossistema (MHATRE et al., 2019). Assim, é necessário enfatizar abordagens agrícolas sustentáveis, como o controle biológico à base de bactérias. A bactéria *Bacillus subtilis*, por exemplo, possui ação que auxilia a planta em sua defesa contra o ataque dos fitonematoides e estimula o crescimento das plantas. Como existe potencial para melhorar tais interações benéficas, tem-se a necessidade de se explorar novas pesquisas vinculadas a nematicidas biológicos (HASHEM; TABASSUM; ABD_ALLAH, 2019). Ferraz et al. (2010) ressaltaram a necessidade da prospecção por novos isolados que sejam sustentáveis do ponto de vista ecológico.

Assim, há necessidade, por exemplo, em desenvolver pesquisas e tecnologias para

detecção de nematoses durante estágios iniciais de doenças. Um fator limitante é que o próprio ecossistema do solo é complexo e, portanto, há dificuldade envolvida na previsão da ocorrência de fitonematoides. Enquanto isso, a análise das amostras de solo para determinar se as densidades de fitonematoides excedem ou não o limite de ação é dispendioso e, em alguns casos, por razões técnicas são inviáveis (HILLNHÜTTER et al., 2010).

Neste sentido, é sustentável buscar o uso de técnicas não destrutivas, viáveis e práticas de monitoramento das condições de sanidade das plantas para manejo em tempo hábil. Essas técnicas podem ser impulsionadas pelo desenvolvimento de pesquisas em sensoriamento remoto da vegetação por se tratar de metodologia apta a tal desafio (ALI et al., 2019).

De acordo com Naue et al. (2010), o sensoriamento remoto pode ser utilizado para detectar plantas que são assintomáticas ao olho humano, porém infectadas por fitopatógenos em larga escala, de forma rápida, precisa, confiável e eficiente através de sensores que detectam mudanças no comportamento espectral do vegetal. Deste modo, o sensoriamento remoto tem contribuído para aumentar a produtividade das culturas, demonstrando potencial em aperfeiçoar o estabelecimento de zonas de manejos agrícolas.

Assim, as práticas tradicionais de agricultura estão se transformando em uma perspectiva cada vez mais tecnológica, sendo essenciais pesquisas que introduzam novas tecnologias e técnicas em campo, aumentando o potencial das culturas agrícolas (BOURSIANIS et al., 2020). Assim, em uma região aonde as diferenças não são visíveis a olho nu, seria relevante a detecção remota de diferentes tipos de manejo de fitonematoides na cultura do cafeeiro.

5. MATERIAL E MÉTODOS

As etapas deste trabalho foram definidas, criteriosamente, para avaliação do desempenho de imagens multiespectrais orbitais na discriminação de tratamentos mais nematicidas e mais produtivos. Para tanto, esta pesquisa foi desenvolvida com as seguintes etapas descritas na Figura 1.

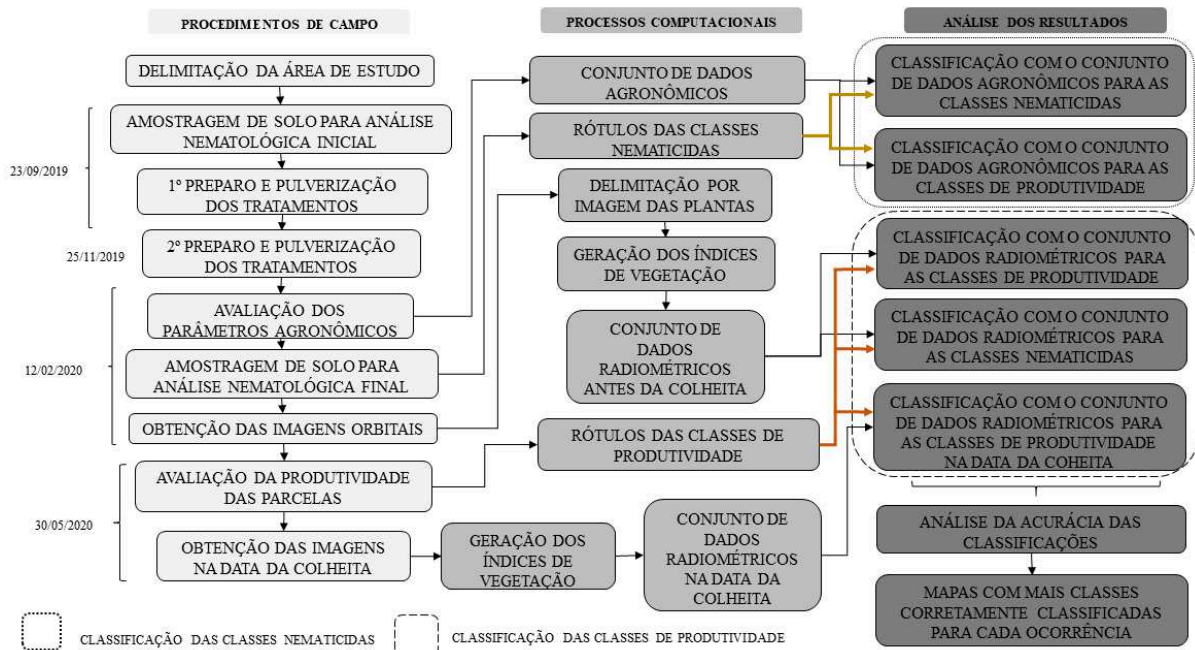


FIGURA 1. Fluxograma das principais etapas deste trabalho

5.1 Área de Estudo e condições gerais do experimento

O estudo foi realizado no município de Monte Carmelo, MG, Brasil (18°41'59" S, 47°33'53" O, 826 m de altitude, clima Aw) (Figura 2) em área de 15113 m² com 55 parcelas cultivadas com *Coffea arabica* L. cultivar Bourbon Amarelo. A lavoura foi estabelecida em 2013, irrigada por gotejamento, com espaçamento de 3,8 m entre linhas e 0,7 m entre plantas. A área foi georreferenciada com um par de receptores GNSS Hiper V com precisão centimétrica. Bandeiras e fitas foram usadas para identificação das plantas e ramos que seriam avaliadas durante todo o experimento.

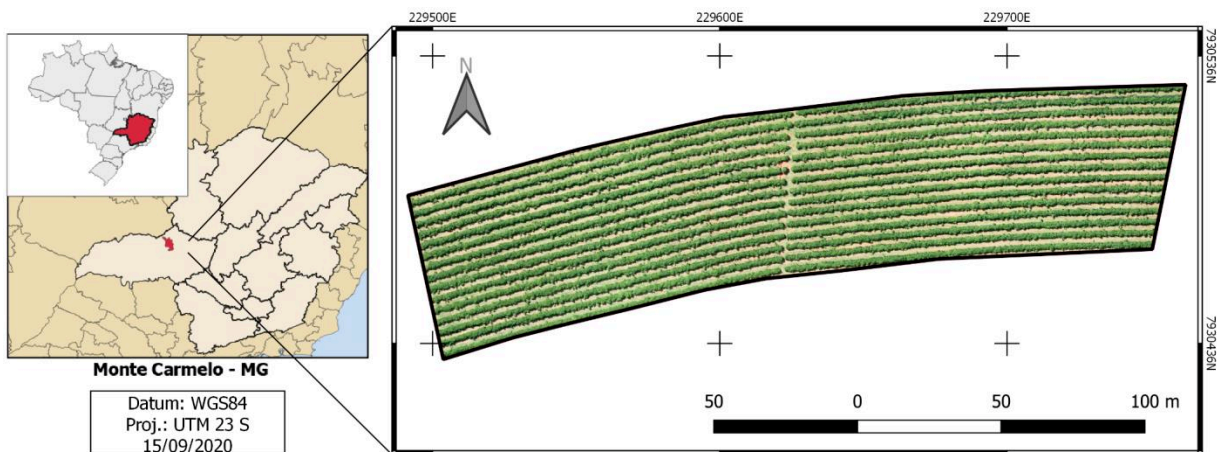


FIGURA 2. Localização do cafezal usado no experimento, localizado em Monte Carmelo – MG, Brasil

Este trabalho foi composto por quatro etapas de campo. Na primeira etapa, realizada na semana do dia 23 de setembro de 2019, foi realizada a coleta de amostras de solo para determinação das populações iniciais de fitonematoides totais por parcela e a primeira aplicação dos tratamentos realizada na primeira semana de outubro. A segunda etapa foi realizada na semana do dia 25 de novembro de 2019 e incluiu a segunda e última aplicação dos tratamentos. Na semana do dia 12 de fevereiro de 2020 foi realizada a terceira etapa, com avaliação de variáveis agrônomicas, obtenção de imagens orbitais e coleta de amostras de solo para determinação das populações finais de fitonematoides por parcela. Por último, avaliou-se produtividade das parcelas e obtenção das imagens orbitais na semana do dia 25 de maio de 2020 (quarta etapa).

5.2 Descrição dos tratamentos

Para o manejo dos fitonematoides, os cafeeiros foram tratados com sete isolados de *Bacillus* separadamente (*B. subtilis*, isolados B18, B202 e B33; *B. thuringiensis* isolado B22; *B. methylotrophicus* isolado B05; *B. safensis* isolado B53; *B. amyloliquefaciens* isolado B266). Os isolados pertencem à coleção do Laboratório de Microbiologia e Fitopatologia da Universidade Federal de Uberlândia/Campus Monte Carmelo e foram aplicados na dose de 4 L ha⁻¹ e com concentração de 1 x 10⁹ UFC mL⁻¹. Além disso, as plantas foram tratadas com um produto biológico comercial à base de *B. subtilis* + *B. licheniformis* (dose de 300 g produto ha⁻¹) (BC); nematicida comercial fluensulfone (dose de 2 L ha⁻¹) (QC); combinação de primeira aplicação com abamectina (dose de 375 mL ha⁻¹) e segunda aplicação com produto comercial à base de *B. subtilis* + *B. licheniformis* (dose de 300 g produto ha⁻¹) (QBC) e como testemunha plantas pulverizadas com água.

Os isolados bacterianos não comerciais foram repicados para placas de Petri contendo meio de cultura 523 sólido (KADO; HESKETT, 1970). As placas foram mantidas em incubadora a 25 °C. Após dois dias, 1 cm³ do meio colonizado foi transferido para erlenmeyers de 250 mL contendo meio de cultura líquido 523. Os erlenmeyers foram colocados sob agitação em agitador orbital a 25± 2 °C e 150 rpm por cinco dias, no escuro.

As suspensões bacterianas foram calibradas de forma indireta com uso de espectrofotômetro de luz ajustado para densidade óptica a 600 nm. Leituras iguais a 1,8 eram equivalentes à concentração de 1 x 10⁹ UFC mL⁻¹. A escolha dessa concentração foi baseada em formulações líquidas de produtos comerciais à base de *Bacillus* spp.

O delineamento utilizado foi em blocos casualizados (DBC) com 11 tratamentos e

cinco repetições (Figura 3), sendo cada parcela experimental composta por 28 plantas, sendo duas plantas em cada extremidade consideradas como bordadura.

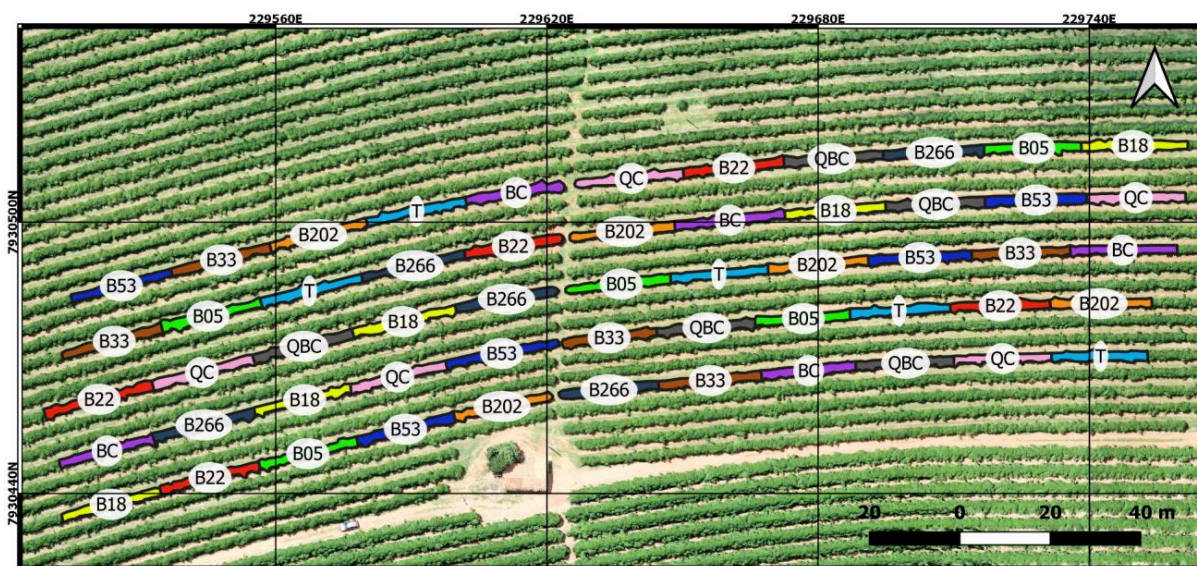


FIGURA 3. Croqui de distribuição dos tratamentos na área de estudo

As aplicações foram realizadas com pulverizador costal, na superfície limpa e em faixa de 50 cm de largura nos dois lados da linha de plantio. Todos os isolados bacterianos e produtos comerciais biológicos e químicos foram aplicados em volume de calda de 500 L ha⁻¹. Para tanto, foi retirada a palhada e da matéria seca, realizada a aplicação do tratamento diretamente na projeção da copa do cafeeiro e, por fim, o material foi retomado ao local de origem.

5.3 Amostragem de solo para a análise nematológica

As coletas de amostras de solo até 20 cm de profundidade foram realizadas nos dias 23 de setembro de 2019 (população inicial) e 12 de fevereiro de 2020 (população final). Uma amostra de 150 cm³ do solo rizosférico da planta central de cada parcela experimental foi enviada para laboratório e os nematoides foram extraídos pelo método de flutuação centrífuga em solução de sacarose (JENKINS, 1964).

A área estava inicialmente infestada com os gêneros *Meloidogyne*, *Pratylenchus*, *Rotylenchulus* e *Mesocriconema*. Para contextualizar de uma forma geral a população inicial desta área, a Figura 4 apresenta mapas gerados por interpolação pelo inverso da distância da distribuição espacial das populações: A- População total de nematoides; gêneros mais significativos: B- População de *Meloidogyne*; C- População de *Pratylenchus*.

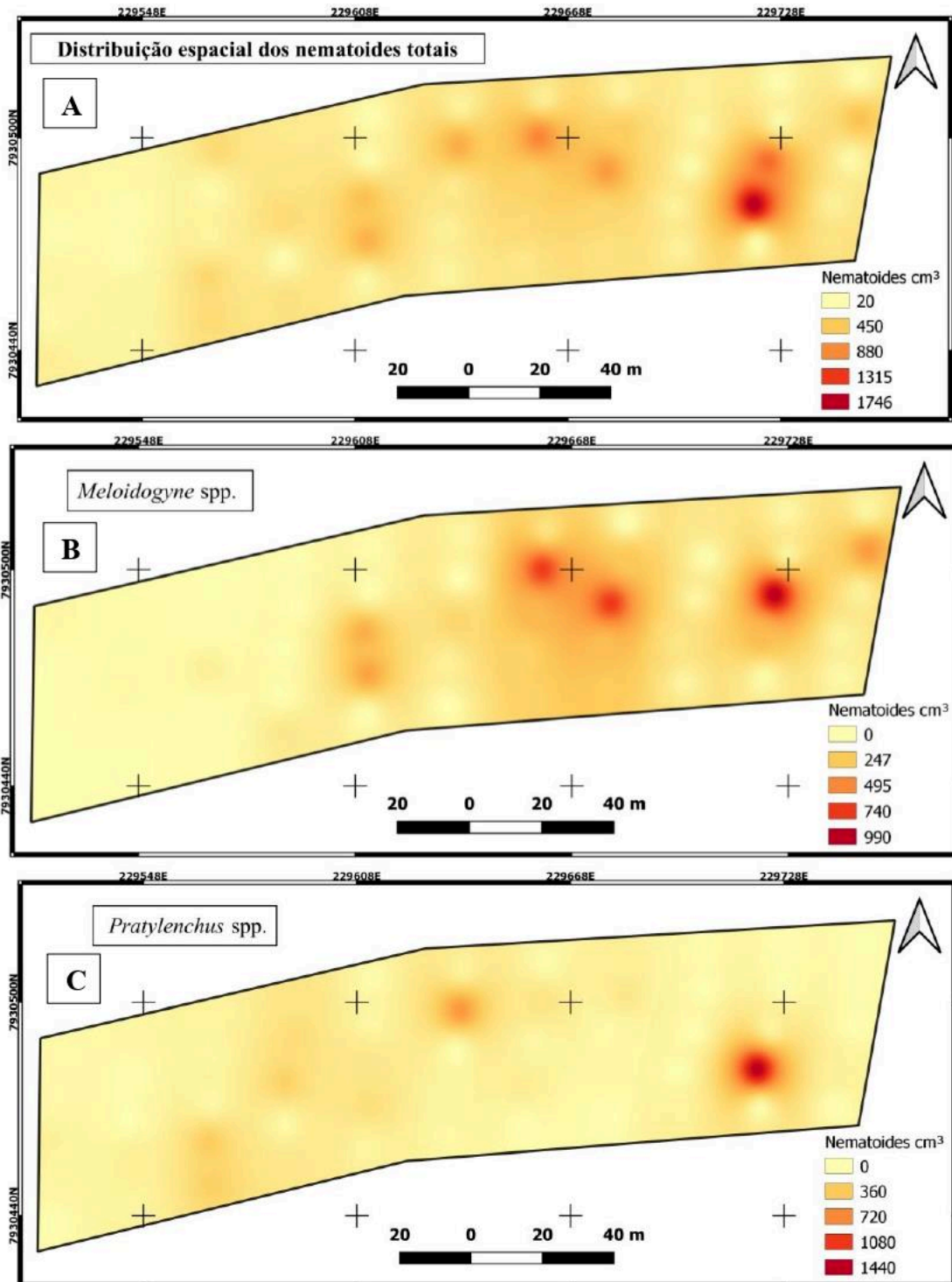


FIGURA 4. (A) Distribuição espacial dos nematoides totais com base nas amostras de 150cm³ de solo (B) Distribuição espacial de *Meloidogyne* spp. (C) Distribuição espacial de *Pratylenchus* spp.

A diferença entre os valores da população final (12 de fevereiro de 2020) e inicial (23 de setembro de 2019) de fitonematoides em cada parcela foi usada para avaliar a eficácia dos tratamentos. Os efeitos foram rotulados em: alta redução de indivíduos ($\geq 50\%$ de redução);

redução moderada de indivíduos (< 50% de redução) e aumento de indivíduos.

5.4 Avaliação da produtividade das parcelas

A colheita em cada parcela útil foi realizada por meio de derriça manual no pano (25 de maio de 2020). O início da colheita foi determinado pelo menor percentual possível de frutos verdes na planta (<10%). Para a estimativa da produtividade real de café beneficiado, foi considerada a relação 500 litros de café colhido na planta para compor uma saca de 60 kg de café beneficiado por hectare.

Os dados de produtividade foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para rotulação das classes de dados. Para tanto, os efeitos foram rotulados em: alta produtividade (a), média produtividade (ab), baixa produtividade (bc) e produtividade muito baixa (c).

5.5 Avaliação dos parâmetros agronômicos

Visando caracterizar cada um dos tratamentos, foram avaliados em campo (12 de fevereiro de 2020) o teor de clorofila total, a altura das plantas, o comprimento dos ramos plagiotrópicos do terço médio, os números de gemas e de ramos totais advindos do caule principal e o diâmetro da copa das três plantas centrais de cada parcela. O teor de clorofila total foi obtido por meio de quatro leituras por planta em ramos plagiotrópicos do terço médio com o Clorofilômetro ClorofiLOG CFL 1030, capaz de captar em 3 faixas de comprimento de luz: duas dentro do canal do vermelho, próximos aos picos de cada tipo de clorofila (635 nm e 660 nm) e um outro no canal do infravermelho próximo (880 nm) (FALKER, 2008). A altura das plantas foi avaliada com uso de mira topográfica e o comprimento de ramos com mira antropométrica. Em cada uma das 55 parcelas foram avaliadas três plantas, totalizando 165 plantas avaliadas.

5.6 Aquisição das imagens multiespectrais

Imagens orbitais do sensor Planet foram obtidas visando comparar o potencial dos parâmetros agronômicos com as imagens multiespectrais. As imagens foram disponibilizadas em repositório (disponíveis em www.planet.com) com as correções atmosféricas e geométricas implementadas, ou seja, os pixels são apresentados em reflectância de superfície e ortorretificados.

Como a terceira etapa de campo ocorreu dois meses antes da colheita (12 de fevereiro de 2020), foi realizada uma avaliação com o conjunto de dados radiométricos para a data de colheita (25 de maio de 2020), a fim de entender se a data de aquisição de dados afeta os resultados.

5.7 Geração dos índices de vegetação

Para melhor caracterizar radiometricamente cada um dos tratamentos foram calculados índices espectrais de vegetação. Os índices de vegetação são formulações matemáticas utilizadas como técnica de processamento de imagens para analisar o comportamento espectral de reflectância da vegetação, potencializando a discriminação de alvos agrícolas.

Os índices de vegetação: NDVI, CVI, GNDVI, MPRI, VARI, SR, TGI, ARVI, SIPI (Tabela 1) foram usados por serem comumente adotados em sensoriamento remoto agrícola e da vegetação (FORMAGGIO; SANCHES, 2017), sendo passíveis de serem implementados em metodologias com as resoluções espectrais desta investigação.

TABELA 1. Índices de vegetação relacionados a parâmetros agrícolas mensuráveis e de interesse neste trabalho.

Índice de vegetação	Fórmula	Referência
NDVI	$\frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$	Rouse et al. (1974)
CVI	$NIR * \frac{R}{G^2}$	Vincini, Frazzi e D'alessio (2008)
GNDVI	$\frac{(NIR - G)}{(NIR + G)}$	Gitelson, Kaufman e Merzlyak (1996)
MPRI	$\frac{(G - R)}{(G + R)}$	Yang, Willis e Mueller (2008)
VARI	$\frac{(G - R)}{(G + R - B)}$	Gitelson et al. (2002)
SR	$\frac{(R)}{(NIR)}$	Jordan (1969)
TGI	$G - (0,39 * R) - (0,61 * B)$	Hunt et al. (2011)
ARVI	$\frac{(NIR - (2 * R) + B)}{(NIR + (2 * R) + B)}$	Kaufman e Tanre (1992)
SIPI	$\frac{(NIR - B)}{(NIR - R)}$	Zarco-Tejada (2000)

NDVI (*Normalized Difference Vegetation*); CVI (*Chlorophyll. Vegetation Index*); GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*); MPRI (*Modified Photochemical Reflectance Index*); VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*); SR (*Simple Ratio*); TGI (*Green Triangular Index*); ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*); SIPI (*Structure Insensitive Pigment Index*).

A letra R significa banda referente ao comprimento de onda do vermelho (590 – 670nm); G significa banda referente ao comprimento de onda do verde (500 – 590nm); B significa banda referente ao comprimento de onda do azul (455 – 515nm); NIR significa banda referente ao comprimento de onda do infravermelho próximo (780 – 860nm).

Rouse et al. (1974) detectaram que o índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) está correlacionado com a biomassa vegetal acima do solo em pastagens. Vincini, Frazzi e D’Alessio (2008) verificaram que o CVI (*Chlorophyll. Vegetation Index*) com dados multiespectrais pode ser utilizado como estimador de clorofila foliar.

Gitelson, Kaufman e Merzlyak (1996) relataram que o índice GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*) pode ser mais sensível à concentração de clorofila A do que o NDVI. Linhares, Rocha e Amaral (2013) validaram o índice MPRI (*Modified Photochemical Reflectance Index*) como indicador de vigor vegetativo.

Gitelson et al. (2002) verificaram que, mesmo utilizando somente bandas do espectro visível, o índice VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*) é sensível a estimativa de vigor vegetativo. Jordan (1969), com o índice SR (*Simple Ratio*) observou que quanto mais folhas estiverem presentes no dossel, maior será a proporção, uma vez que a vegetação absorve mais o comprimento do vermelho do que do infravermelho próximo, inferindo a simples razão.

Hunt et al. (2011) validaram o índice TGI (*Green Triangular Index*) como alternativa de baixo custo para estimar o teor de clorofila foliar por sensoriamento remoto. Kaufman e Tanre (1992) verificaram que o índice ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*) possui dinâmica semelhante ao NDVI, mas pode ser até quatro vezes menos sensível aos efeitos atmosféricos. Zarco-Tejada (2000), constatou a relação do índice SIPI (*Structure Insensitive Pigment Index*) com os pigmentos foliares carotenoide e clorofila A.

5.8 Classificação supervisionada por Árvores Aleatórias

Para avaliar o potencial das imagens em discriminar os tratamentos mais nematocidas e mais produtivos, foram testados demais algoritmos não paramétricos, sendo observada uma maior assertividade para os classificadores supervisionados de imagens do tipo árvores de decisão. A classificação por Árvores Aleatórias pode ser ligeiramente melhor se comparado à classificação por Florestas Aleatórias (MISHRA; RATHA, 2016), deste modo foi utilizado o algoritmo Árvores Aleatórias para este estudo.

As acurácias das classificações foram testadas por meio do processo de validação

cruzada dos dados, isto é, os dados foram divididos aleatoriamente em dez conjuntos de tamanhos aproximados, visando o menor viés da técnica, conforme exposto em Kuhn e Johnson (2013) e Dash (2013). Após testes com valores empíricos, foi atribuído o valor zero para a profundidade máxima da árvore aleatória tornando-a ilimitada. O *KValue* também foi fixado em zero, definindo-se o número de atributos escolhidos aleatoriamente em $\log_2(\text{valor dos preditores}) + 1$. Por este método um modelo foi ajustado usando todas as amostras, com exceção do primeiro subconjunto, de modo que no final todos os dados foram treinados e testados. Para tanto, este processo foi realizado no software Weka por meio do algoritmo de Árvores Aleatórias.

A extração dos valores radiométricos das bandas e índices das três plantas de cada parcela foram feitos por meio da ferramenta ROI (*Region Of Interest*) do software Envi 5.0 (*Exelis Visual Information Solutions, Boulder, Colorado*), com 165 valores radiométricos (plantas analisadas) para cada avaliação.

A mineração de dados foi realizada previamente para selecionar os melhores conjuntos de dados para cada classificação. Esses conjuntos são detalhados a seguir.

5.8.1 Conjunto de classificações: Tratamentos mais nematocidas

As classes de informações geradas para os tratamentos mais efetivos foram: alta redução de indivíduos ($\geq 50\%$ da amplitude de redução), redução moderada de indivíduos ($< 50\%$ da amplitude de redução) e aumento de indivíduos.

A primeira classificação buscou utilizar o conjunto dos parâmetros agronômicos avaliados em campo (12 de fevereiro de 2020) com a finalidade de que estes dados proporcionassem a ideal discriminação das classes de redução dos nematoides. O conjunto de dados agronômicos foi composto por: teor de clorofila total; altura das plantas; comprimento de dois dos ramos plagiotrópicos do terço médio; os números de gemas dos dois ramos do terço plagiotrópico; número de ramos totais advindos do caule principal; diâmetro da copa; número de indivíduos por 150 cm³ de nematoides totais e número de indivíduos do gênero *Meloidogyne*.

A segunda classificação foi realizada com o objetivo de verificar o potencial de discriminação do conjunto de dados radiométricos das imagens orbitais (12 de fevereiro de 2020) em relação à primeira classificação com parâmetros agronômicos para as classes nematocidas. Os dados radiométricos de entrada foram compostos pelas: bandas B (455 – 515nm), G (500 – 590nm), R (590 – 670nm), NIR (780 – 860nm) e os índices de vegetação:

NDVI, CVI, GNDVI, MPRI, VARI, SR, TGI, ARVI, SIPI.

5.8.2 Conjunto de classificações: Tratamentos mais produtivos

As classes de informações geradas para a produtividade foram: alta produtividade (a), média produtividade (ab), baixa produtividade (bc) e produtividade muito baixa (c).

A primeira classificação buscou utilizar o conjunto dos parâmetros agronômicos avaliados em campo (12 de fevereiro de 2020) com a finalidade de que estes dados proporcionassem a ideal discriminação das classes de redução de produtividade. O conjunto de dados agronômicos foi composto por: teor de clorofila total; altura das plantas; comprimento de dois dos ramos plagiotrópicos do terço médio; os números de gemas dos dois ramos do terço plagiotrópico; número de ramos totais advindos do caule principal; diâmetro da copa; número de indivíduos por 150 cm³ de nematoides totais e número de indivíduos do gênero *Meloidogyne*.

A segunda classificação foi realizada com o objetivo de verificar o potencial de discriminação do conjunto de dados radiométricos das imagens orbitais (12 de fevereiro de 2020) em relação à primeira classificação com parâmetros agronômicos para as classes de produtividade. Os dados radiométricos de entrada foram compostos pelas: bandas B (455 – 515nm), G (500 – 590nm), R (590 – 670nm), NIR (780 – 860nm) e os índices de vegetação: NDVI, CVI, GNDVI, MPRI, VARI, SR, TGI, ARVI, SIPI.

A terceira classificação foi realizada com os dados radiométricos das imagens orbitais na data da colheita (25 de maio de 2020) com o objetivo de verificar se os dados mais próximos à data da colheita obtiveram mais classes corretamente classificadas, se comparado a segunda classificação com os dados desta etapa. Os dados radiométricos de entrada foram compostos pelas: bandas B (455 – 515nm), G (500 – 590nm), R (590 – 670nm), NIR (780 – 860nm) e os índices de vegetação: NDVI, CVI, GNDVI, MPRI, VARI, SR, TGI, ARVI, SIPI.

5.9 Análise da acurácia das classificações

Para selecionar o conjunto de dados de entrada mais apto a realizar as classificações dos tratamentos mais efetivos e mais produtivos, analisou-se a acurácia das classificações em cada avaliação. A matriz de confusão é uma metodologia amplamente utilizada para avaliar a confiabilidade da classificação (SARTORI; GALO; IMAI, 2009; MARTINS; GALO; VIEIRA, 2017). O modelo de classificação prevê a classe de cada instância de dados,

atribuindo a cada amostra seu rótulo previsto. O índice de Exatidão Global utiliza somente os elementos que expressam a concordância real (diagonal principal da matriz) e é calculado em porcentagem, enquanto que o coeficiente Kappa leva em consideração todos os elementos da matriz de confusão no seu cálculo. Ambos os índices foram calculados pelo software Weka.

Conforme Landis e Koch (1977), a estatística Kappa, vista na Eq. (1), pode ser avaliada em diferentes níveis de desempenho ou força conforme o seu intervalo de valores. Para Kappa menor que 0 tem-se desempenho insignificante; entre o intervalo de 0 e 0,2, tem-se desempenho fraco; entre o intervalo de 0,21 e 0,4, observa-se desempenho razoável; entre 0,41 e 0,6 tem-se desempenho moderado; entre 0,61 e 0,8 tem-se desempenho forte e entre 0,81 e 1 tem-se desempenho quase perfeito.

$$Kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (1)$$

Onde: P_o = proporção observada de concordâncias (soma das respostas concordantes dividida pelo total); P_e = proporção esperada de concordâncias (soma dos valores esperados das respostas concordantes dividida pelo total).

Por meio do software Weka foram analisados os erros de comissão e omissão das matrizes de confusão das classificações. O primeiro erro visto na Eq. (2), corresponde aos pixels pertencentes a outras classes de referência que o classificador colocou na classe de interesse. O segundo erro disposto na Eq. (3), corresponde aos pixels pertencentes à classe de referência que o classificador não conseguiu reconhecer (KUHN; JOHNSON, 2013).

$$E_{co} = \frac{X_{+i} - X_{ii}}{X_{+i}} \quad (2)$$

Onde: E_c = erro de comissão; X_{+i} = soma da coluna i da matriz confusão; X_{ii} = valor da diagonal daquela coluna i.

$$E_o = \frac{X_{i+} - X_{ii}}{X_{i+}} \quad (3)$$

Onde: E_o = erro de omissão; X_{i+} = soma da linha i da matriz confusão; X_{ii} = valor da diagonal daquela linha i.

As representações visuais do potencial de discriminação: do sensor, dos tratamentos nematicidas e dos tratamentos mais produtivos foram feitas com software Qgis 3.12.2 (QGIS Development Team 2009). Para os mapas, foi utilizada como referência uma imagem de aerolevanteamento de um sensor aéreo convencional por se tratar de maior resolução espacial. Para representar as classes, foi empregada a cor azul para as classes correspondentes ao croqui, enquanto que as classificações erradas foram representadas pela cor vermelha.

6 RESULTADOS

6.1 Discriminação dos tratamentos mais nematocidas

O isolado B33 resultou em maior redução de fitonematoides totais, seguido dos isolados B266 e 202 (Tabela 2). O biológico comercial (BC) e o químico + biológico comercial (QBC) também compuseram a classe $\geq 50\%$ da amplitude de redução, relativa à alta redução de nematoides. A aplicação de *B. subtilis* isolado B18 e *B. safensis* isolado B53 resultaram na classe $< 50\%$ da amplitude de redução, similar a aplicação de água na parcela testemunha. O tratamento com *B. thuringiensis* isolado B22, *B. methylotrophicus* isolado B05 e o nematocida químico fluensulfone aumentaram as populações de nematoides em até 30,68%.

TABELA 2. Efeito de tratamentos químicos e biológicos sobre a população de fitonematoides totais, expresso pela diferença entre a população final e inicial.

Tratamento	Média	% redução (-) ou aumento (+) NPP*	Classe
<i>Bacillus subtilis</i> isolado B33	0.35	- 65.12	
<i>B. amyloliquefaciens</i> isolado B266	0.50	- 50.45	$\geq 50\%$ de redução
<i>B. subtilis</i> isolado B202	0.51	- 48.95	
<i>B. subtilis</i> + <i>B. licheniformis</i> (BC)	0.64	- 36.36	
Abamectina + <i>B. subtilis</i> + <i>B. licheniformis</i> (QBC)	0.66	- 34.12	
Testemunha (controle)	0.78	- 21.81	$< 50\%$ de redução
<i>B. subtilis</i> isolado B18	0.79	- 20.89	
<i>B. safensis</i> isolado B53	0.94	- 5.96	
<i>B. thuringiensis</i> isolado B22	1.22	+ 22.24	aumento de indivíduos
<i>B. methylotrophicus</i> isolado B05	1.28	+ 27.94	
Fluensulfone (QC)	1.31	+ 30.68	

Com base na redução máxima da população de nematoides igual a 65,12%, os valores foram classificados da seguinte forma: $\geq 50\%$ da amplitude de redução (alta redução de indivíduos); $< 50\%$ da amplitude de redução (redução moderada de indivíduos); aumento de indivíduos.

* Expresso como a diferença percentual entre as populações final e inicial de nematoides parasitas de plantas em cada tratamento.

Após a classificação do efeito dos tratamentos em nematoides pelo algoritmo árvore aleatória para a 3ª avaliação, os valores de exatidão global em porcentagem e índice Kappa foram de 80 e 0,68 para sensor multiespectral orbital e de 75,75 e 0,61 para os parâmetros agronômicos, respectivamente.

Com isto, a Tabela 3 apresenta a matriz de confusão computada para o conjunto de dados do sensor multiespectral orbital na 3ª avaliação. O maior erro de omissão (26,6%) e

comissão (23,2%) foi observado na classe de aumento de indivíduos, indicando menor potencial em discriminar esta classe. O melhor resultado da classificação foi observado para a classe $\geq 50\%$ de redução, com menor erro de omissão (14,6%) e comissão (17,9%), mostrando que o melhor resultado das classificações foi para as classes mais nematocidas. A partir da Figura 5 é possível observar que a região ao leste do mapa e, com maior número de indivíduos totais como já observado na Figura 4, foi a região com o maior acerto das classificações.

TABELA 3. Matriz de confusão computada para 3ª avaliação com o conjunto de dados radiométrico.

Classes	$\geq 50\%$ de redução	$< 50\%$ de redução	aumento de indivíduos	Σ	E _o (%)
$\geq 50\%$ de redução	64	5	6	75	14,6
$< 50\%$ de redução	6	35	4	45	22,2
aumento de indivíduos	8	4	33	45	26,6
Σ	78	44	43	165	
E _{co} (%)	17,9	20,4	23,2		

E_o (%) é o erro de omissão em porcentagem; E_{co} (%) é o erro de comissão em porcentagem;



Legenda

- Classes classificadas com acerto
- Classes classificadas com erro

Datum: WGS84
Proj.: UTM 23S
15/09/2020

FIGURA 5. Mapa com a representação da discriminação das classes de tratamentos nematocidas conforme o algoritmo árvores Aleatórias. Em que a classe 1 representa os tratamentos com alta redução do número de nematoides ($\geq 50\%$ de redução); a classe 2 representa os tratamentos por redução moderada de indivíduos ($< 50\%$ de redução); a classe 3 representa os tratamentos com aumento no número de indivíduos.

6.2 Discriminação dos tratamentos produtivos

A maior produtividade de café beneficiado foi obtida com uso do tratamento composto por QBC, diferenciando-se dos tratamentos B22, B05, B202, B33, BC, QC e da testemunha (Tabela 4). Verifica-se potencial da utilização do controle biológico no incremento da produtividade em áreas infestadas com fitonematoides, destacando-se os isolados B18, B53 e B266, os quais não diferiram significativamente do tratamento QBC na produtividade do cafeeiro. Além disto, o BC e o QC possuíram produtividade média próxima as das parcelas da testemunha, enquanto que o tratamento B05 possuiu menor média de produtividade.

TABELA 4. Produtividade média (sacas ha⁻¹) em função dos diferentes manejos de nematoides e as respectivas classes.

Tratamento	Produtividade*	Classe
Abamectina + <i>B. subtilis</i> + <i>B. licheniformis</i> (QBC)	28,3 a	a
<i>B. safensis</i> isolado B53	20,5 ab	ab
<i>B. subtilis</i> isolado B18	19,4 ab	ab
<i>B. amyloliquefaciens</i> isolado B266	18,4 ab	ab
Fluensulfone (QC)	15,2 bc	bc
Testemunha (controle)	14,1 bc	bc
<i>B. subtilis</i> + <i>B. licheniformis</i> (BC)	13,2 bc	bc
<i>B. subtilis</i> isolado B202	12,5 bc	bc
<i>B. thuringiensis</i> isolado B22	11,2 bc	bc
<i>Bacillus subtilis</i> isolado B33	8,9 bc	bc
<i>B. methylotrophicus</i> isolado B05	5,2 c	c

*Médias seguidas pela mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste LSD a 5% de probabilidade.

Os efeitos foram classificados em: alta produtividade (a), média produtividade (ab), baixa produtividade (bc) e produtividade muito baixa (c).

Os valores de exatidão global em porcentagem e índice Kappa para a terceira avaliação foram de 81,54 e 0,70 para sensor multiespectral orbital e de 100 e 1 para os parâmetros agrônômicos, respectivamente. Já para a data da colheita, os valores de exatidão global em porcentagem e índice Kappa do sensor multiespectral orbital foram de 83,63 e 0,73, respectivamente.

Baseando-se no aumento da Exatidão Global e do índice Kappa, foi computada a matriz de confusão (Tabela 5) para os dados radiométricos na data da colheita. Os melhores resultados desta classificação foram encontrados para a classe bc com o menor erro de omissão (11,1%) e comissão (12%). A classe mais produtiva possuiu maior erro de omissão e comissão em porcentagem (26,7% e 38,8% respectivamente), demonstrando que a classificação foi pior para discriminar a classe mais produtiva. A partir da representação das

classificações em campo (Figura 6) é possível observar que as três fileiras mais ao norte, possuíram mais classes classificadas com acerto, se comparado às duas fileiras mais ao sul.

TABELA 5. Matriz de confusão computada a partir do conjunto de dados do sensor multiespectral orbital para as classes de produtividade média na data da colheita.

Classes	a	ab	bc	c	Σ	E _o (%)
a	11	1	3	0	15	26,7
ab	4	34	6	1	45	24,4
bc	3	6	80	1	90	11,1
c	0	0	2	13	15	13,3
Σ	18	41	91	15	165	
E _{co} (%)	38,8	17	12	13,3		

E_o (%) é o erro de omissão em porcentagem; E_{co} (%) é o erro de comissão em porcentagem; Os efeitos foram classificados em: alta produtividade (a), média produtividade (ab), baixa produtividade (bc) e produtividade muito baixa (c).



Legenda

- Classes classificadas com acerto
- Classes classificadas com erro

Datum: WGS84
Proj.: UTM 23S
15/09/2020

FIGURA 6. Mapa com a representação da discriminação das classes de produtividade média conforme o algoritmo árvores Aleatórias. São representadas as classes de alta produtividade (a), média produtividade (ab), baixa produtividade (bc) e produtividade muito baixa (c).

7 DISCUSSÃO

7.1 Discriminação dos tratamentos nematocidas

As imagens possuem maior potencial em discriminar os tratamentos mais nematocidas

do que os parâmetros agronômicos.

Visando mapear a distribuição espacial dos nematoides em cafeeiros, Martins, Galo e Vieira (2017), também verificaram um maior potencial nos dados multiespectrais, do sensor orbital RapidEye, do que em dados biofísicos. Os resultados foram apontados como satisfatórios, apontando acurácia global de 78% e coeficiente de Kappa de 0,71.

Além disso, quanto maior a capacidade nematicida, maior a discriminação pelos sensores. Destacam-se os isolados bacterianos B33 e B266 pelos maiores percentuais de redução de fitonematoides (indivíduos) totais.

Groover (2020) avaliou a capacidade nematicida das rizobactérias promotoras de crescimento de plantas em reduzir a população de nematoides em gramados. Em estufa, sete dos onze tratamentos biológicos à base de rizobactérias reduziram significativamente a densidade populacional de *M. incognita* em comparação com a testemunha, verificando ainda tratamentos com potencial para promoção do crescimento radicular.

A utilização de bactérias do gênero *Bacillus* tem sido empregada no manejo de fitonematoides, apresentando diferentes modos de ação (BRUZOS; GRAYSTON, 2019). Um dos mecanismos de ação de isolados de *B. subtilis* sobre fitonematoides está relacionado ao efeito da colonização da bactéria na rizosfera das plantas e na alteração da composição dos exsudatos radiculares dos hospedeiros e a consequente desorientação do nematoide (ARAÚJO; SILVA; ARAÚJO, 2002; SINGH; SARMA; KESWANI, 2017).

Os isolados pertencentes a essas espécies podem também produzir metabólitos tóxicos aos fitonematoides podendo interferir no ciclo reprodutivo dos fitonematoides, principalmente na oviposição e eclosão de juvenis. Por exemplo, o peptídeo plantazolicina, produto do gene RBAM_007470, foi identificado como o fator nematicida da cepa de *B. amyloliquefaciens* FZB42 (LIU et al., 2013).

Da mesma forma, metabólitos produzidos por *B. subtilis*, uracila, 9H-purina e dihidrouracila, mostraram atividade *in vitro* contra *M. exigua* (OLIVEIRA et al., 2014). Além disso, essas bactérias podem promover o crescimento de plantas. Os voláteis 3-hidroxi-2-butanona (acetoína) e 2,3-butanodiol, produzido por *B. subtilis* GB03 e *B. amyloliquefaciens* IN937A, estimularam o crescimento de plantas de *Arabidopsis thaliana*, regulando a homeostase de auxina (RYU et al., 2003).

Assim, trabalhos que vinculam imagens e modelos baseados em aprendizagem de máquina apresentam um método adicional e viável para complementar não somente o diagnóstico de doenças de plantas (MOHANTY; HUGHES; SALATHÉ, 2016), mas também possui a possibilidade de discriminar áreas e adotar zonas de manejo nas propriedades rurais

em função da variabilidade espacial de fitopatógenos encontrada, tal como observado neste estudo.

7.2 Discriminação dos tratamentos quanto à produtividade

O tratamento mais produtivo (QBC) não foi o mais nematicida (B33). Destaca-se o isolado B266, que não diferiu significativamente do QBC para produtividade e proporcionou um nível de redução de 50,45% dos fitonematoides totais, sendo inferior apenas ao isolado B33.

É possível inferir que o tratamento bc foi o mais discriminável pelo sensor. O tratamento B33, por se tratar da aplicação de um isolado bacteriano, não só reduziu o número de indivíduos, mas também promoveu o vigor das plantas, como observado em Hashem, Tabassum e Abd_allah (2019) e Mhatre et al. (2019). Logo, espera-se de plantas de cafeeiro que vegetam muito, no ano de baixa produção, uma menor produtividade.

Devido à bienalidade do cafeeiro, os valores baixos de produtividade são justificados porque o mesmo se encontrava num ano de baixa produção. É sabido ainda que a cultivar Bourbon Amarelo é mais suscetível a pragas e doenças do que outras cultivares, além de apresentar sinais de depauperamento após safras altas.

Os parâmetros agronômicos foram os mais confiáveis estimadores para a produtividade, alcançando a qualificação ideal para o índice Kappa e Exatidão Global. Entretanto, destaca-se uma ligação forte para os resultados do sensoriamento remoto e que devem ser considerados uma vez que a obtenção destes dados é uma metodologia não destrutiva mais rápida e menos onerosa ao produtor. Além disto, a aquisição dos dados de sensoriamento remoto mais próximo a data da colheita foi mais correlacionada com as classes de produtividade.

Assim, conforme visto em Hillnhütter et al. (2010), o manejo de fitonematoides depende muitas vezes de aplicações de nematicidas químicos em toda área de produção, mesmo quando apenas uma pequena parte do campo está infestada. Essa indistinção da variabilidade espacial do patógeno e pulverizações de forma generalizadas em áreas infestadas implica em maiores quantidades de aplicações de nematicidas e conseqüentemente maiores custos ao produtor. Isso comprova a necessidade de investigações por sensoriamento remoto visando o gerenciamento específico de locais infestados por fitonematoides, ou seja, a definição de zonas de manejo nas propriedades agrícolas cafeeira, visando reduções nas populações desses patógenos de forma localizada e sustentável e, objetivando

consequentemente ganhos de produtividade.

8 CONCLUSÕES

Imagens multiespectrais orbitais são capazes de discriminar variações espectrais de plantas de cafeeiro infectadas por fitonematoides em resposta a estratégias que visam reduzir populações desses patógenos no solo, especialmente tratamentos com maior efeito nematicida.

Plantas com baixas produções também podem ser remotamente detectadas por imagens multiespectrais orbitais, permitindo que cafeicultores possam fazer ajustes necessários no manejo da cultura. Assim, imagens multiespectrais e modelos baseados em aprendizagem de máquina são abordagens adicionais e viáveis para a detecção de plantas infectadas por nematoides e a discriminação de zonas de manejo do cafeeiro.

REFERÊNCIAS

- ALI, M. M.; BACHIK N. A.; MUHADI N. A.; NORIZAN T.; YUSOF T. Non-destructive techniques of detecting plant diseases: A review. *Physiol. Physiological and Molecular Plant Pathology*. v. 108, p. 101426, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2019.101426>
Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0885576519300888?via%3Dihub>>
Acesso em: 15 dez. 2020.
- ARAÚJO, F. F.; SILVA J. F. V.; ARAÚJO, A. S. F. de; Influência de *Bacillus subtilis* na eclosão, orientação e infecção de *Heterodera glycines* em soja. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 32, n. 2, p. 197-203, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000200003> Disponível em:
<https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782002000200003&lng=pt&tlng=pt> Acesso em: 15 dez. 2020.
- ARITA, L.Y.; DA SILVA, S.A.; MACHADO, A.C.Z. Efficacy of chemical and biological nematicides in the management of *Meloidogyne paranaensis* in *Coffea arabica*. *Crop Protection*, v.131, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105099> Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261219420300326?via%3Dihub>>
Acesso em: 15 dez. 2020.
- BOURSIANIS, A. D.; PAPADOPOULOU, M. S.; DIAMANTOULAKIS, P.; LIOPATSAKALIDI, A.; BAROUCHAS, P.; SALAHAS, G.; KARAGIANNIDIS, G.; WAN, S.; GOUDOS, S.K.; Internet of Things (IoT) and Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Smart Farming: A Comprehensive Review. *Internet of Things*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100187> Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2542660520300238?via%3Dihub>>
Acesso em: 15 dez. 2020.
- DASH, R. K. Selection Of The Best Classifier From Different Datasets Using WEKA. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. vol. 2, 3 eds. 2013. Disponível em: <<https://www.ijert.org/selection-of-the-best-classifier-from-different-datasets-using-weka>> Acesso em: 10 dez. 2020.
- FALKER, Automação agrícola. **Manual do equipamento ClorofiLOG/CFL 1030**. Porto Alegre, 2008. 33p. Disponível em: <<https://www.falker.com.br/download.php>>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- FERNANDES, R. H.; LOPES E. A.; VIEIRA B. S.; BONTEMPO A. F.; Controle de *Meloidogyne javanica* na Cultura do Feijoeiro com Isolados de *Bacillus* spp. *Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas* 7:76-81. 2013. Disponível em: <<http://www.periodicoeletronicos.ufma.br/index.php/ccaatropica/article/view/899>> Acesso em: 15 dez. 2020.
- FERNANDES, R. H.; VIEIRA, B. S.; FUGA, C. A. G.; LOPES, E. A. *Pochonia chlamydosporia* e *Bacillus subtilis* no controle de *Meloidogyne incognita* e *M. javanica* em mudas de tomateiro. *Bioscience Journal*, v. 30, n. 1, 2014. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/18025>> Acesso em: 15 dez. 2020.

FERRAZ, S.; FREITAS, L. G. **O controle de fitonematóides por plantas antagonistas e produtos naturais.** 17p. 2008.

FERRAZ, S.; FREITAS, L. G. de; LOPES, E. A.; DIAS-ARIEIRA C. R. **Manejo Sustentável de Fitonematoides.** Viçosa: Ed. UFV, 2010. 306p.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensoriamento Remoto em agricultura.** São Paulo: Oficina de textos, 2017. 288p.

GITELSON, A.A.; KAUFMAN, Y.J.; MERZLYAK, M.N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, v.58 n.3, p.289–298, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7) Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425796000727?via%3Dihub>> Acesso em: 15 dez. 2020.

GITELSON, A.A.; KAUFMAN, Y.J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, v.80 n.1, p.76–87, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9) Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425701002899?via%3Dihub>> Acesso em: 15 dez. 2020.

GOUTTE, C. GAUSSIÉ, E. A Probabilistic Interpretation of Precision, Recall and F-Score, with Implication for Evaluation. In: Losada D.E., Fernández-Luna J.M. (eds) *Advances in Information Retrieval*. ECIR 2005. Lecture Notes in Computer Science, vol 3408. Springer, Berlin, Heidelberg. 2005. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-31865-1_25 Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-31865-1_25> Acesso em: 15 dez. 2020.

GROOVER, W. L. **Integrated management strategies for plant-parasitic nematodes on warm-season turfgrass using plant growth-promoting rhizobacteria, chemical nematicides, and remote sensing technology.** Faculty of Auburn University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. May 2, Alabama. 2020. Disponível em: <> Acesso em: 15 set. 2020.

HASHEM, A.; TABASSUM, B.; ABD-ALLAH, E. F. Bacillus subtilis: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. *Saudi journal of biological sciences*, vol. 26, ed. 6, 1291-1297, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.05.004> Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X19300890?via%3Dihub>> Acesso em: 15 dez. 2020.

HILLNHÜTTER, C.; SCHWEIZER, A.; KÜHNHOLD, V.; SIKORA, R.A. Remote sensing for the detection of soil-borne plant parasitic nematodes and fungal pathogens. In: Oerke, E.-C., Gerhards, R., Menz, G., Sikora, R.A. (Eds.), *Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity*. Springer, Netherlands, 2010. DOI: [10.1007/978-90-481-9277-9](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9). Disponível em: <<https://link.springer.com/book/10.1007/978-90-481-9277-9>> Acesso em: 15 set. 2020.

HUNT JR, E. R.; DAUGHTRY, C. S. T.; EITEL, J. U.; LONG, D. S. Remote sensing leaf

chlorophyll content using a visible band index. *Agronomy journal*, v. 103, n. 4, p. 1090-1099, 2011. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0395> Disponível em: <<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj2010.0395>> Acesso em: 15 set. 2020.

JENKINS, W.R. A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. *Plant Disease Report* 48:692, 1964. Disponível em: <<http://garfield.library.upenn.edu/classics1980/A1980KJ72900001.pdf>> Acesso em: 20 dez. 2020.

JORDAN, C. F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, v. 50, n. 4, p. 663-666, 1969. DOI: <https://doi.org/10.2307/1936256> Disponível em: <<https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2307/1936256>> Acesso em: 23 set. 2020.

KADO, C.I.; HESKETT, M.G. Selective media for isolation of Agrobacterium, Corynebacterium, Erwinia, Pseudomonas and Xanthomonas. *Phytopathology* 60:969-979. 1970. DOI: [10.1094/Phyto-60-969](https://doi.org/10.1094/Phyto-60-969) . Disponível em: <https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1970Articles/Phyto60n06_969.PDF> Acesso em: 12 set. 2020.

KAUFMAN, Y.J.; TANRE, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 261-270, 1992. DOI: [10.1109/36.134076](https://doi.org/10.1109/36.134076) Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/134076>> Acesso em: 15 set. 2020.

KALMEGH, S. Analysis of weka data mining algorithm reptree, simple cart and randomtree for classification of indian news. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, v. 2, n. 2, p. 438-446, 2015. Disponível em: <http://ijiset.com/vol2/v2s2/IJISSET_V2_I2_63.pdf> Acesso em: 15 set. 2020.

KUHN, M.; JOHNSON, K. *Applied predictive modeling*. New York: Springer. Vol.26, 600p. 2013.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*. *International Biometric Society*, vol. 33, No. 1 p.159-174. 1977. DOI: <https://doi.org/10.2307/2529310> Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/2529310?seq=1>> Acesso em: 12 set. 2020.

LINHARES, M. M. A.; ROCHA, N. C. C.; AMARAL, B. A. S. Análise do índice MPRI como indicador vegetativo através da correlação do mesmo com o índice NDVI. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 16, p. 8254-8260. 2013. Disponível em: <<http://marte2.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.29.00.32.25/doc/p1190.pdf>> Acesso em: 12 out. 2020.

LIU, Z.; BUDIHARJO, A.; WANG, P.; SHI, H.; FANG, J.; BORRIS, R et al. *The highly modified microcin peptide plantazolicin is associated with nematicidal activity of Bacillus amyloliquefaciens FZB42*. *Appl Microbiol Biotechnol* 97:10081–10090. 2013. DOI: [10.1007/s00253-013-5247-5](https://doi.org/10.1007/s00253-013-5247-5) Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24085393/>> Acesso em: 12 set. 2020.

MARTINS, G. D. **Inferência dos níveis de infecção por nematoides na cultura cafeeira a partir de dados de sensoriamento remoto adquiridos em multiescala.** 121 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/148760/martins_gd_dr_prud.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 17 out. 2020.

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 J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 10(12), 5395–5403, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2737618> Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8016326>> Acesso em: 17 out. 2020.

MAZZUCHELLI, R. D. C. L.; MAZZUCHELLI, E. H. L.; DE ARAUJO, F. F. *Efficiency of Bacillus subtilis for Root-Knot and Lesion Nematodes Management in Sugarcane.* *Biological Control*, 104185. 2020. Disponível em: <<https://pubag.nal.usda.gov/catalog/6804934>> Acesso em: 7 out. 2020.

MHATRE, P. H.; KARTHIK, C.; KADIRVELU, K.; DIVYA, K. L.; VENKATASALAM, E. P.; SRINIVASAN, S.; SHANMUGANATHAN, R.; SARANYA, C.; SHANMUGANATHAN, R. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A potential alternative tool for nematodes bio-control. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 17: 119-128, 2019. Disponível em: <<https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201900023114>> Acesso em: 1 out. 2020.

MISHRA, A.K., RATHA, B.K. Study of Random Tree and Random Forest Data Mining Algorithms for Microarray Data Analysis. *International Journal on Advanced Electrical and Computer Engineering*, v.3, pp. 5-7. 2016. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Study-of-Random-Tree-and-Random-Forest-Data-Mining-Mishra-Ratha/173c9872946718df7a3e6fe29c3822f2f8631149>> Acesso em: 10 nov. 2020.

MIRANDA, J. da R., ALVES, M. de C., POZZA, E. A., SANTOS NETO, H. 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, p. 101983, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101983> Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243419306853>> Acesso em: 17 out. 2020.

MOHANTY, S.P.; HUGHES, D.P.; SALATHÉ, M. Using Deep Learning for Image-Based Plant Disease Detection. *Front. Plant Science*. 7:1419. DOI: [10.3389/fpls.2016.01419](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01419). 2016. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2016.01419/full>> Acesso em: 17 out. 2020.

NAUE, C. R.; MARQUES, M. W.; LIMA, N. B.; GALVÍNCIO, J. D. Sensoriamento remoto como ferramenta aos estudos de doenças de plantas agrícolas: uma revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física (RBGF)*. Nº 03. p.190-195. 2010. DOI: [10.26848/rbfg.v3i3.232675](https://doi.org/10.26848/rbfg.v3i3.232675) Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/322345193_Sensoriamento_remoto_como_ferram>

[enta aos estudos de doenças de plantas agrícolas uma revisão Remote Sensing as a Tool for the Study of Plant Diseases on Agriculture a Revision](#)> Acesso em: 17 set. 2020.

OLIVEIRA, D.F.; SANTOS JUNIOR, H.M.; NUNES, A.S. et al. Purification and identification of metabolites produced by *Bacillus cereus* and *B. subtilis* active against *Meloidogyne exigua*, and their in silico interaction with a putative phosphoribosyltransferase from *M. incognita*. *An Acad Bras Cienc* 86:525–538. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201402412> Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/aabc/v86n2/0001-3765-aabc-0001-3765201402412.pdf>> Acesso em: 17 out. 2020.

OLIVEIRA, C. M. G. de.; ROSA, J. M. O. **Boletim Técnico Nematoides Parasitos do Cafeeiro**. São Paulo: Instituto Biológico. 2018. 28p. Disponível em: http://www.biologico.agricultura.sp.gov.br/uploads/files/pdf/Boletins/cape/nematoides_parasitos_cafeeiro.pdf> Acesso em: 17 out. 2020.

PIRES, M. S. de O.; ALVES, M. de C.; POZZA, E. A. Multispectral radiometric characterization of coffee rust epidemic in different irrigation management systems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 86, p. 102016, 2020. DOI: [10.1016/j.jag.2019.102016](https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102016) Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340353539_Multispectral_radiometric_characterization_of_coffee_rust_epidemic_in_different_irrigation_management_systems> Acesso em: 17 out. 2020.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2. Ed. Atualizada e Ampliada – São Paulo: Oficina de textos, 2012.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: *Third ERTS Symposium, Proceedings*, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, v. 1, p. 309-317, 1973. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19740022614>> Acesso em: 17 out. 2020.

RYU, C.M.; FARAG, M.A.; HU, C.H.; REDDY, M.S.; WEI H.X.; PARE, P.W. et al. Bacterial volatiles promote growth in Arabidopsis. *Proceedings of the national academy of sciences of the united states of america* 100:4927–4932. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0730845100> Disponível em: <https://www.pnas.org/content/100/8/4927>> Acesso em: 17 out. 2020.

SALGADO, S. M. DE L.; CARNEIRO, R. M. D. G.; PINHO, R. S. C. de. **Aspectos técnicos dos nematoides parasitas do cafeeiro**. Belo Horizonte: EPAMIG, 60 p. 2011. Disponível em: http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/boletins_tecnicos/bt_aspectos_tecnicos_nematoides.pdf> Acesso em: 17 out. 2020.

SARTORI L. R.; GALO, M. de L. B. T.; IMAI, N. N. Mapeamento de plantas daninhas em cultura de café a partir de imagens multiespectrais de escalas grandes usando redes neurais artificiais. *Revista Brasileira de Cartografia*. n. 61/02, 165-175, 2009. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44846>> Acesso em: 17 out. 2020.

- SATO, K.; KADOTA, Y.; SHIRASU, K. Plant Immune Responses to Parasitic Nematodes. *Frontiers in Plant Science*. vol. 10, 1165. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01165> Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.01165/full>> Acesso em: 17 out. 2020.
- SINGH, H.B.; SARMA, B.K.; KESWANI C. *Advances in PGPR*. CABI, Wallingford. 2017. DOI: [10.1079/9781786390325.0398](https://doi.org/10.1079/9781786390325.0398) Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/315824762_PGPR_A_Good_Step_to_Control_Several_of_Plant_Pathogens> Acesso em: 17 out. 2020.
- TOLARDO, A. L.; ALVES, G. C. S.; SILVA, G. F. da; PEREIRA, W. J.; SILVA, D. Z. da; SILVA, S. A. S. Biological control: isolated and in mixtures and genetic control of *Meloidogyne exigua* in coffee. *Coffee Science*, Lavras, v. 14, n. 2, p. 147 - 156, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.25186/cs.v14i2> Disponível em: <http://dx.doi.org/10.25186/cs.v14i2> > Acesso em: 04 jan. 2020.
- VINCINI, M.; FRAZZI, E.; D'ALESSIO, P. A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. *Precision Agriculture*, v. 9, n. 5, p. 303-319, 2008. DOI: [10.1007/s11119-008-9075-z](https://doi.org/10.1007/s11119-008-9075-z) Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/225681715_A_broad-band_leaf_chlorophyll_vegetation_index_at_the_canopy_scale> Acesso em: 17 out. 2020.
- WITTEN, I. H.; FRANK, E. *Data mining: practical machine learning tools and techniques*. Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier. 2nd ed. 525p. 2005. Disponível em: <https://www.elsevier.com/books/data-mining-practical-machine-learning-tools-and-techniques/witten/978-0-12-374856-0>> Acesso em: 17 out. 2020.
- YANG, Z.; WILLIS, P.; MUELLER, R. Impact of band-ratio enhanced AWIFS image to crop classification accuracy. *Proc. Pecora*. Vol. 17. No. 1. 2008. Disponível em: <https://www.asprs.org/a/publications/proceedings/pecora17/0041.pdf>> Acesso em: 17 out. 2020.
- YANG, C. Remote sensing and precision agriculture technologies for crop disease detection and management with a practical application example. *Engineering*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.10.015> 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809918310415>> Acesso em: 17 out. 2020.
- ZANOTTA, D.; ZORTEA, M.; FERREIRA, M. P. **Processamento de imagens de satélite**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 320p.
- ZARCO-TEJADA, P. J. **Hyperspectral remote sensing of closed forest canopies: Estimation of chlorophyll fluorescence and pigment content**. A thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Supervisor: Prof. John R. Miller. Toronto, ON, Canada: York University, p.224, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/241257435_Hyperspectral_remote_sensing_of_closed_forest_canopies_Estimation_of_chlorophyll_fluorescence_and_pigment_content> Acesso em: 17 out. 2020.