



UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

GEORGE DEROCO MARTINS

**INFERÊNCIA DOS NÍVEIS DE INFECÇÃO POR
NEMATÓIDES NA CULTURA CAFEIEIRA A PARTIR
DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO
ADQUIRIDOS EM MULTIESCALA**



PRESIDENTE PRUDENTE

2016

GEORGE DEROCO MARTINS

**INFERÊNCIA DOS NÍVEIS DE INFECÇÃO POR
NEMATOIDES NA CULTURA CAFEIEIRA A PARTIR
DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO
ADQUIRIDOS EM MULTIESCALA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Campus de Presidente Prudente, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências Cartográficas. Área de concentração em aquisição, análise e representação de informações espaciais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo

Co-orientador: Prof. Dr. Bruno Sérgio Vieira

PRESIDENTE PRUDENTE

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

M343i Martins, George Deroco.
Inferência dos níveis de infecção por nematoides na cultura cafeeira a partir de dados de sensoriamento remoto adquiridos em multiescala. - Presidente Prudente : [s.n], 2016
121 f. : il.

Orientadora: Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Cultura cafeeira. 2. Nematoides. 3. Dados hiperespectrais e multiespectrais. 4. Detecção de doenças. 5. Mapeamento. 6. Agricultura de precisão. I. Galo, Maria de Lourdes Bueno Trindade. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: INFERÊNCIA DOS NÍVEIS DE INFECÇÃO POR NEMATÓIDES NA CULTURA CAFEIEIRA A PARTIR DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO ADQUIRIDOS EM MULTIESCALA

AUTOR: GEORGE DEROCO MARTINS

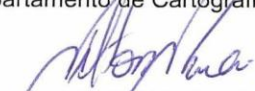
ORIENTADORA: MARIA DE LOURDES BUENO TRINDADE GALO

COORIENTADOR: BRUNO SÉRGIO VIEIRA

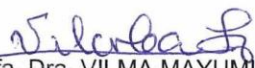
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: AQUISIÇÃO, ANÁLISE E REPRESENTAÇÃO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS pela Comissão Examinadora:



Profa. Dra. MARIA DE LOURDES BUENO TRINDADE GALO
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente



Prof. Dr. NILTON NOBUHIRO IMAI
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente



Profa. Dra. VILMA MAYUMI TACHIBANA
Departamento de Estatística / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente



Prof. Dr. RUBENS AUGUSTO CAMARGO LAMPARELLI
Faculdade de Engenharia Agrícola / Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. HELIO RICARDO SILVA
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Presidente Prudente, 19 de dezembro de 2016

*Aos meus pais, Roberto e Cleide,
irmão, João, e namorada, Franciele.*

AGRADECIMENTOS

A realização desta tese somente foi possível devido ao apoio de diversas instituições e profissionais.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) e à Universidade Estadual Paulista (UNESP) pela infraestrutura fornecida.

A CAPES e a Pró-Reitoria de Recursos Humanos da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelas bolsas concedidas.

A Cooperativa Regional de Cafeicultores em Guaxupé (Cooxupé) de Monte Camelo-MG pelo suporte e apoio levantamento radiométricos realizados em campo.

A minha orientadora Profa. Dra. Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo, pelo exemplo de profissionalismo, dedicação e comprometimento. Obrigado pela amizade, confiança e por tantos ensinamentos.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Bruno Sérgio Vieira do Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), pela atenção e por agregar conceitos essenciais para realização desta tese.

Aos membros da banca examinadora: Prof. Dra. Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo (UNESP), Prof. Dr. Nilton Nobuhiro Imai (UNESP), Profa. Dra. Vilma Mayumi Tachibana (UNESP), Prof. Dr. Hélio Ricardo Silva (UNESP) e Prof. Dr. Rubens Augusto Camargo Lamparelli (UNICAMP), tanto pela participação quanto pelas valiosas discussões e sugestões.

Aos professores do departamento de Cartografia da UNESP por todo ensinamento transmitido ao longo da minha formação acadêmica e científica.

Aos amigos do PPGCC e da UFU pelas frequentes discussões que contribuíram diretamente para o desenvolvimento da pesquisa. Em especial a Érika Akemi Saito Morya por todas as dicas que enriqueceram este trabalho.

Agradecimentos, também, ao diretor da Faculdade de Engenharia Civil da UFU por ter me concedido, em diversas ocasiões, períodos de contínuos de afastamento, os quais foram essenciais para que eu pudesse retornar a Presidente Prudente e dedicar-me integralmente a esta pesquisa.

.

RESUMO

Os nematoides são importantes fitoparasitas que se constituem em um problema sério para o cultivo do café no Brasil. Como a ocorrência de nematoides no sistema radicular do cafeeiro causa desequilíbrios nutricionais na planta que provocam variações na resposta espectral da folha e define uma configuração espacial característica às áreas infectadas, o objetivo desta pesquisa avaliar o potencial de dados de sensoriamento remoto adquiridos em multiescala para discriminar e mapear o café sadio, em estágio inicial de infecção e severamente infectado. A pesquisa foi desenvolvida em três áreas experimentais, localizadas no sul do estado de Minas Gerais, nas quais foi certificada a ocorrência de nematoides e realizadas medições de variáveis biofísicas e dados hiperespectrais na folha e sobre o dossel da planta. Os dados hiperespectrais também foram utilizados em simulação de bandas dos sensores do RapidEye e OLI/Landsat 8 para identificar as faixas espectrais mais sensíveis para a discriminação de patógenos em plantas de café. Nenhum dos parâmetros biofísicos avaliados discriminou eficientemente as folhas de plantas sadias e infectadas, mas a simulação de bandas indicou que os intervalos espectrais do vermelho, vermelho limítrofe e infravermelho próximos do RapidEye foram complementares para a discriminação de plantas de café sadio e dos dois níveis de infecção. Essas bandas, mais uma imagem NDVI, foram utilizadas na classificação das áreas infectadas por nematoides, a qual definiu a distribuição espacial de café sadio e dos dois níveis de infecção, com uma acurácia global de 78% e coeficiente kappa de 0,71. A classificação não supervisionada da imagem multiespectral OLI/Landsat 8 também definiu as três condições, porém com baixa confiabilidade (coeficiente kappa igual a 0,41). Por outro lado, uma inferência espacial quantitativa da concentração de nematoides/cm³ no solo, a partir de um modelo empírico baseado na imagem RapidEye, apresentou um erro consideravelmente alto (21,89%).

Palavras-chave: cultura cafeeira, nematoides, dados hiperespectrais e multiespectrais, detecção de doenças, mapeamento, agricultura de precisão.

ABSTRACT

Nematodes are important phytoparasites that constitute a serious issue for coffee cultivation in Brazil. Because root infection by nematodes induces spectral variation in leaves and defines a unique spatial configuration in the cultivation field, the aim of this study is to evaluate the potential of remote sensing data acquired in multiscale to discriminate and map healthy, early infected and severely infected coffee plants. This study was carried out in three experimental areas, located in the in southern Minas Gerais State, in which the occurrence of nematodes was certified and biophysical and hyperspectral measurements of the leaves and on the canopy were made. Hyperspectral data were also used to simulate the bands of the RapidEye and OLI/Landsat 8 sensors to identify the most sensitive spectral ranges for pathogen discrimination in coffee plants. None of the biophysical parameters efficiently discriminated the leaves of healthy and infected plants, but the band simulations indicated that red, red edge and near infrared spectral ranges were complementary to the discrimination of healthy coffee plants and the two levels of infection. These bands, plus an (NDVI) image, were used for a multispectral classification of healthy and nematode-infected areas. The multispectral classification defined the spatial distribution of healthy, early infected and two levels of infection, with an overall accuracy of 78% and kappa coefficient of 0.71. The unsupervised classification of the multispectral image OLI/Landsat 8 also defined the three conditions, but with low reliability (kappa coefficient equal to 0.41). In contrast, a quantitative spatial inference of the soil nematode concentration/cm³, from an empirical model based on the RapidEye image, presented a considerably high error (21.89%).

Keywords: coffee culture, nematodes, hyperspectral and multispectral data, disease detection, mapping, precision agriculture

SUMÁRIO

1. CARACTERIZAÇÃO PROBLEMA	13
1.1 Introdução	13
1.2 Hipótese e objetivos	15
1.3 Sensoriamento remoto na detecção de doenças em culturas agrícolas.....	16
1.4 Contribuição da pesquisa no âmbito da Agricultura de Precisão	19
1.5 Estrutura da Tese	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1 Nematoides na cultura cafeeira.....	22
2.2 Parâmetros agronômicos.....	24
2.2.1 Índice de área foliar	25
2.2.2 Teor relativo de clorofila	27
2.2.3 Biomassa.....	28
2.3 Interação da radiação eletromagnética com a vegetação.....	28
2.4 Radiometria de laboratório e campo.....	30
2.5 Calibração radiométrica e correção atmosférica de imagens multiespectrais	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 Delineamento experimental	39
3.2 Materiais	41
3.2.1 Equipamentos de laboratório	41
3.2.2 Imagens multiespectrais	43
3.2.3 Softwares para processamento de dados e das imagens	44
4. EXPERIMENTO 1: ANÁLISE DE DADOS BIOFÍSICOS E HIPERESPECTRAIS MEDIDOS EM CONDIÇÕES CONTROLADAS E DA DETECÇÃO DE NÍVEIS DE INFECCÃO EM IMAGENS RAPIDEYE	45
4.1 Área experimental 1.....	45
4.2 Desenvolvimento metodológico	46
4.2.1 Aquisição de dados biofísicos e hiperespectrais.....	48
4.2.2 Processamento dos dados biofísicos e hiperespectrais.....	49
4.2.3 Processamento e análise da imagem multiespectral RapidEye	53
4.3 Resultados e discussões	55
4.3.1 Características biofísicas de folhas saudáveis e infectadas por nematoides	55
4.3.2 Caracterização espectral de folhas saudáveis e infectadas por nematoides	59
4.3.3 Classificação das curvas espectrais pelo mapeamento por ângulo espectral.....	61
4.3.4 Relação entre índices hiperespectrais e os dados biofísicos.....	62
4.3.5 Discriminação entre o café saudável e infectado a partir de dados hiperespectrais simulados e bandas espectrais RapidEye.....	66
4.3.6 Dispersão espacial de nematoides na área experimental 1	70

5. EXPERIMENTO 2: ANÁLISE DE DADOS HIPERESPECTRAIS ADQUIRIDOS SOBRE O DOSSEL E DA DETECÇÃO DE NÍVEIS DE INFECCÃO EM IMAGENS OLI/LANDSAT 8.....	74
5.1 Área experimental 2.....	74
5.2 Desenvolvimento metodológico	76
5.2.1 Aquisição de dados hiperespectrais <i>in situ</i>	76
5.2.2 Processamento dos dados hiperespectrais	78
5.2.3 Aquisição e pré-processamento da imagem	78
5.2.4 Classificação da imagem e análise da acurácia do mapeamento.....	79
5.3 Resultados e discussões	80
5.3.1 Caracterização espectral do café sadia e infectado por nematoides por meio de dados coletados <i>in situ</i>	80
5.3.2 Discriminação de níveis de infecção por nematoides a partir de dados simulados e bandas espectrais OLI/Landsat 8.....	82
5.3.3 Classificação da imagem e análise da acurácia do mapeamento.....	85
6. EXPERIMENTO 3: ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE NEMATOIDES/CM³ NO SOLO E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL EM CULTURAS CAFEEIRAS A PARTIR DE MODELOS EMPÍRICOS OBTIDOS POR IMAGENS MULTIESPECTRAIS RAPIDEYE.....	90
6.1 Desenvolvimento metodológico	91
6.1.1 Área de estudos.....	91
6.1.2 Aquisição e processamento de imagem multiespectral	93
6.1.3 Definição dos modelos empíricos para estimativa da concentração de nematoides/cm ³	93
6.2 Resultados e discussões	96
6.2.1 Análise nematológica	96
6.2.2 Correlação entre a concentração de nematoides/cm ³ no solo e a reflectância de superfície das bandas originais e os índices derivados do sensor RapidEye.....	96
6.2.3 Análise dos modelos empíricos de estimativa da concentração de nematoides/cm ³	98
6.2.4 Determinação dos modelos empíricos para estimativa da concentração de nematoides/cm ³ no solo	101
6.2.5 Validação dos modelos predição e mapeamento das áreas de concentração de nematoides/cm ³	102
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	105
REFERÊNCIAS	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. A) Plantas de café com sintomas da infecção por nematoides (folhas cloróticas). B- Galhas formadas nas raízes do cafeeiro (SILVA et al., 2008)	23
Figura 2. Reflectância espectral característica da folha verde sadia. (Fonte: Adaptado de Thenkaibail et al., 2011).....	29
Figura 3. Geometria de feixes hipotéticos da radiação incidente e refletida, onde: ω é ângulo sólido; θ e Φ remetem o ângulo zenital e o azimutal, respectivamente e os subscritos i e r denotam quantidades associados a fluxo incidente e refletido, respectivamente. Fonte: (NICODEMUS et al., 1977).....	32
Figura 4. Aspecto de plantas de café sadio e sob diferentes níveis de infecção por nematoides <i>Meloidogyne Paranaensis</i> : i- café; ii- infecção inicial e; iii- severamente infectada.....	40
Figura 5. Medidor de área foliar AM 300. (Fonte: www.marconi.com.br)	42
Figura 6. Clorofilômetro SPAD - 502 plus. (Fonte:www.minolta.com)	42
Figura 7. Caracterização da área experimental 1. (A) Municípiode Monte Carmelo em destaque nos mapas de Minas Gerais e Brasil. (B) Talhões de café destacando a área de estudo em uma composição cor natural RGB da imagem RapidEye, limitada no vermelho. (C) Distribuição espacial de pontos amostrais georreferenciados: círculos representam a localização dos pontos em que folhas do cafeeiro foram extraídas para realizar medições biofísicas e espectrorradiométricas; demais pontos (controle) indicam elementos amostrais usados na estimativa da acurácia.	46
Figura 8. Metodologia proposta para o desenvolvimento do experimento 1.	47
Figura 9. Esquema de aquisição de medidas de reflectância em laboratório. (Adaptado: JENSEN, 2009).	49
Figura 10. Indicação da feição espectral do vermelho limítrofe na curva da vegetação.	51
Figura 11. Variabilidade dos indicadores biofísicos registrados para as folhas de café sadio, início de infecção e severamente infectada. (A) Leituras do índice SPAD. (B) Índice de Área Foliar - IAF em cm ² . (C) Biomassa em gramas. Para cada condição de planta, m é a média da amostra, σ é o desvio padrão e CV é o coeficiente de variação.	57
Figura 12. Dendrograma resultante da análise de agrupamento realizada a partir dos dados biofísicos.....	59
Figura 13. Curvas FRHC obtidas a partir de folhas de café sadio, em início de infecção e severamente infectados, considerando: (A) toda a amostra; e (B) cada condição investigada.	60

Figura 14. Diagrama de dispersão e correlação entre o índice REP o TRC (A), IAF(B) e Biomassa (C).	63
Figura 15. Diagrama de dispersão e correlação entre o índice NDVI (A), IAF (B) e Biomassa (C).....	65
Figura 16. FRHC simulado (R_{sim}) e reflectância de superfície (R_{sup}) obtida a partir de bandas espectrais de imagem RapidEye de: (A) azul - 440-510nm; (B) verde - 520-590nm; (C) vermelho - 630-685nm; (D) borda vermelha - 690-730nm; (E) infravermelho próximo - 760-850nm; e (F) valores de NDVI.	67
Figura 17. Distribuição espacial de café sadio, em início de infecção e severamente infectado na área de estudo, obtido pela classificação não-supervisionada da imagem NDVI e as bandas multiespectrais do sensor RapidEye: vermelho, vermelho limítrofe e infravermelho próximo.	70
Figura 18. Cafeeiro sadio na área de estudo (A). Presença de solo exposto no cafeeiro severamente infectado (B).....	71
Figura 19. Caracterização da área experimental. Município de Monte Carmelo em destaque nos mapas estadual de Minas Gerais e Brasil (A). Delimitação (em vermelho) dos talhões de café que definiram a área experimental 2 em uma composição de cor natural RGB da imagem OLI/Landsat 8 (B). (C) Distribuição espacial de pontos amostrais georreferenciados: pontos com círculos externos representam a localização das medições espectralradiométricas; pontos indicam elementos de amostrais usados na avaliação acurácia da classificação. Cores distintas foram usadas para indicar cada classe (café sadio, início de infecção, severamente infectado e solo exposto).....	75
Figura 20. Metodologia proposta para o desenvolvimento do experimento 2.	76
.....	76
Figura 21. Sistema de aquisição de medidas de FRHC, em culturas cafeeiras, utilizado na coleta dos dados espectralradiométricos.	77
Figura 22. Curvas de FRHC obtidas para as três ocorrências (A). FRHC médio para as condições café sadia, em estágio inicial de infecção e severamente infectada (B).....	81
Figura 23. Variabilidade de reflectância de superfície obtida por simulação das bandas espectrais OLI/Landsat 8 e extraídos da imagem para bandas: do azul (A); verde (B); vermelho (C); infravermelho próximo (D); e NDVI (E).....	83
Figura 24. Mapa dos níveis de infecção por nematoides na área experimental 2, baseado na classificação de dados OLI/Landsat 8.	86
Figura 25. Desenvolvimento metodológico aplicado no Experimento 3	91

Figura 26. Localização da área de estudos e configuração de amostragem de coleta de solo. Os círculos em vermelho representam os pontos amostrados (61 pontos). (Fonte: O Autor)..	92
Figura 27. Correlograma entre a concentração de nematoides/cm ³ no solo e a refletância de superfície das bandas originais e índices multiespectrais derivado do sensor RapidEye.....	97
Figura 28. Gráficos de regressão entre a concentração de nematoides/cm ³ observada (eixo y) e as bandas originais RapidEye (A-Azul, B-Verde, C-Vermelho, D-Vermelho Limítrofe e E-Infravermelho Próximo) e índices multiespectrais (F-NDVI, G-NDVI _{3,4} e H-NDVI _{4,5}).....	99
Figura 29. A- Modelo não linear de estimativa da concentração de nematoide/cm ³ formado pela banda do infravermelho próximo. B- Modelo não linear de estimativa da concentração de nematoide/cm ³ formado pelo índice NDVI.	102
Figura 30. RMSE para o modelo linear múltiplo (A) e para o modelo linear simples (B). ...	102
Figura 31 A-Mapa cor-valor de concentração de nematoides/cm ³ obtido a partir do modelo empírico de regressão linear múltipla; B-Mapa cor-valor de concentração em nematoides/cm ³ obtido a partir do modelo de regressão linear múltipla.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização das áreas experimentais.....	40
Tabela 2. Matriz de classificação das curvas espectrais.....	61
Tabela 3. Média amostral e desvio padrão do R_{sim} e R_{sup} do café sadio, em início de infecção e severamente infectado. (R_{sim} : FRHC simulado; reflectância da superfície extraído a partir da imagem corrigida; R_{sup} m : média da amostra; s : desvio padrão; A, B, C, D, E, F: designação das regiões espectrais coincidentes com as bandas RapidEye).....	68
Tabela 4. Análise de similaridade, em <i>t-pareado</i> e F, dos R_{sim} e R_{sup} do café sadio, em início de infecção e severamente infectado.	69
Tabela 5. Matriz de confusão e erros de omissão e comissão da classificação da imagem RapidEye (experimento 1).....	72
Tabela 6. Extensão das classes mapeadas no experimento 2	86
Tabela 7. Matriz de confusão e erros de omissão e comissão da classificação da imagem OLI/Landsat 8 (área experimental 2).....	88
Tabela 8. Modelo de regressão da concentração de nematoides/cm ³ e coeficientes.....	101
Tabela 9. Teste de normalidade para a estimativa dos modelos empíricos.....	103

LISTA DE SIGLAS

ICO-International Coffee Organization
CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento
IAC – Instituto Agronômico de Campinas
IAF – Índice de Área Foliar
ATP – Adenosina Trifosfato
NADPH – Fosfato de Dinucleotídeo de Adenina
TRC – Teor Relativo de Clorofila
SPAD – Soil Plant Analysis Development
REM – Radiação Eletromagnética
R – Reflectância
FDRB – Função de Reflectância Bidirecional
FR – Fator de Reflectância
FRB – Fator de Reflectância Bidirecional
FRHC – Fator de Reflectância Hemisférico Cônico
ND – Número Digital
MODTRAN – Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmittance Algorithm
MODIS – *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*),
AFRL – Air Force Research Labs
SSI – Spectral Sciences Inc
TM – Thematic Mapper
SPOT – Satellite Pour l'Observation de la Terre
ASD – Analytical Spectral Devices
GNSS – Global Navigation Satellite System
MNA – Ministério do Meio Ambiente
OLI – Operational Land Imager
TIRS – Thermal Infrared Sensor
ENVI – Environment for Visualizing Images
ESRI – Environmental Systems Research Institute
IFOV – Instantaneous Field of View
SAM – Spectral Angle Mapping
NDVI – Normalized Difference Vegetation Index
REP – Posição da Borda do Vermelho

FLAASH – Fast Line-of-sight Atmospheric of Hypercubes

ISODATA – Organizing Data Analysis Technique

R_{sim} – Reflectância Simulada

R_{sup} – Reflectância de Superfície

ETM – *Enhanced Thematic Mapper Plus*

RMSE – Root Mean Square (Erro Médio Quadrático)

1. CARACTERIZAÇÃO PROBLEMA

1.1 Introdução

Atualmente, o café é a segunda mercadoria de maior valor comercial no mundo, estando posicionada apenas abaixo do petróleo. Seu cultivo, processamento e comercialização apoiam milhões de empregos diretos e indiretos em áreas urbanas e em ambientes rurais, nas diversas áreas do planeta (ICO, 2015).

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de café no mundo, sendo que só a região sul do estado de Minas Gerais concentra cerca de 50% da produção nacional de café. Atualmente, a produção mantém-se em constante crescimento, demonstrando que a utilização da mecanização, aliada às inovações tecnológicas e à boa gestão da atividade, favorecem fatores o avanço e modernização da cafeicultura (CONAB, 2015).

Porém, mesmo com o aumento da produtividade aliado à tecnologia, existem diversos fatores que podem causar a redução da produtividade e consequente redução da área plantada de café. Entre eles, os aspectos relacionados à ocorrência de pragas e doenças durante o ciclo da cultura estão entre os mais significativos. Dentre os patógenos, destacam-se os nematoides, pois causam expressiva perda de produtividade para diversas espécies de café (arábica e robusta) (SOUZA, 2008).

O diagnóstico e o levantamento de plantas infectadas por nematoides em áreas extensas, com o objetivo de se estimar com precisão a população desses patógenos, são atividades onerosas e nem sempre tecnicamente viáveis. Uma estimativa precisa do potencial de danos requer a análise laboratorial de um grande número de amostras de solo, uma vez que a distribuição vertical dos nematoides em áreas infectadas é heterogênea. Assim, as perdas causadas por nematoides e os altos custos das análises laboratoriais de um grande número de amostras de solo coletadas ao longo de áreas extensas de plantio, envolve o desenvolvimento de métodos mais efetivos para detectar e quantificar os locais específicos de sua ocorrência para uma intervenção localizada.

A agricultura de precisão considera exatamente esse cenário: a presença, distribuição e intensidade de uma condição específica que causa redução no rendimento da cultura agrícola devem ser identificadas e receber tratamento diferenciado (HILLNHUNTER et al, 2011). Nesse contexto, o monitoramento remoto em da resposta da vegetação em condições de estresse é particularmente importante em agricultura de precisão, uma vez que os custos

relacionados com a intensa amostragem ou manejo agrícola indiscriminado para toda área de cultivo podem ser minimizados pelo mapeamento prévio das áreas de ocorrência de nematoides. Além disso, Hillnhünter et al. (2011) relataram que a indução de sintomas nas folhas, a ocorrência do parasita em grupos (reboleiras) e sua baixa capacidade de mobilidade no solo facilitam sua detecção por sensoriamento remoto e a aplicação da agricultura de precisão.

Assim, o uso direcionado dessa prática, como ferramentas de planejamento, controle e análise de dados agrícolas, prevê então, o monitoramento das variações espaciais e espectrais dos fatores que limitam a produção, orientando no processo de tomada de decisão, na aplicação de insumos em áreas específicas e no manejo diferenciado das culturas no campo de produção.

A dimensão espacial está relacionada diretamente com a capacidade de amostragem dos sensores e, indiretamente, com o nível de aquisição de dados. Dados medidos *in situ* ou em laboratório, com campo de visada restrito, conseguem capturar condições específicas da folha, enquanto que sensores imageadores, instalados em plataformas remotas, determinam uma área de amostragem maior na superfície terrestre. Por incorporar em um único elemento de resolução, a resposta espectral de outros alvos, como o solo, além daquela específica da planta ou plantas, imagens aéreas ou orbitais podem indicar a dispersão espacial das diferentes proporções de planta e solo, dentro da cultura agrícola. Ou seja, a partir da caracterização espectral da cultura sadia e infectada, dados multiescala de sensoriamento remoto permitem inferir graus de sanidade da cultura.

A integração de diferentes tipos de dados de sensoriamento remoto obtidos em multiescala, com vistas ao monitoramento e mapeamento de culturas agrícolas infectadas por parasitas encontra-se em constante avanço. Isso ocorre devido à grande quantidade de dados obtidos por intermédio de plataformas terrestres, aeronaves e orbitais, disponibilizando produtos radiométricos oriundos de fontes diversas (USHA et al., 2013).

Várias abordagens têm sido avaliadas para a detecção de doenças sintomáticas e assintomáticas de plantas a partir de dados obtidos por sensoriamento remoto em multiescala, ambos baseados em espectroscopia (ASHOURLOO et al 2016; BELASQUE JR et al., 2008; CHO et al., 2012; HILLNHÜNTER et al., 2011; HUNT JR et al., 2013; LINS et al., 2009; MARCASSA et al., 2006; MARTINS e GALO, 2015; OUMAR et al., 2013; SANCHES et al. 2014) ou em imagem multiespectral e hiperespectral (BECK et al., 2015; DELALIEUX et

al., 2007; HAMZEH et al., 2013; MARTINS e GALO, 2014; OUMAR e MUTANGA et al., 2014; QIN et al., 2005; SHAFRI e HAMDAN, 2009).

Atualmente, uma série de novos sensores multiespectrais instalados em plataformas espaciais incluem bandas espectrais específicas e apropriadas para monitorar atividades agrícolas. Sensores como RapidEye e o WorldView 2 e 3 dispõem de uma banda espectral no vermelho limítrofe, a qual é capaz de detectar variações sutis de clorofila nas folhas e fornecer informações sobre estrutura e a condição sanitária da vegetação. Além do mais, índices de vegetação, calculados a partir da reflectância das bandas do infravermelho próximo e do vermelho limítrofe, podem fornecer estimativas mais precisas da concentração de clorofila do que para o NDVI tradicional derivado e reflectância da banda do vermelho centrada no intervalo absorção de clorofila *a* e *b* entre 660 e 680 nm (CHO et al. 2011).

De forma geral, os dados de sensoriamento remoto multiescala aplicados às culturas agrícolas são obtidas sob diferentes condições de ambientais e de imageamento, definindo variações que podem afetar os resultados de classificações, conduzindo a níveis de acurácia insatisfatórios. A qualidade da informação produzida está vinculada também aos processamentos aplicados aos dados provenientes de diferentes sensores remotos.

1.2 Hipótese e objetivos

Considerando-se que a ocorrência de nematoides no sistema radicular do cafeeiro provoca variações na resposta espectral da folha, devido a desequilíbrios nutricionais na planta e define uma configuração espacial característica às áreas infectadas, passível de detecção em imagens multiespectrais, esta pesquisa se baseia na hipótese de que o sensoriamento remoto multiescala constitui-se em uma abordagem adequada para o monitoramento da cultura cafeeira infectada por nematoides e identificação de estágios de infecção.

Para efeitos deste estudo especificamente, espera-se responder às seguintes questões:

É possível identificar características espectrais que discriminem plantas doentes considerando o grau de severidade da infecção por nematoides?

Qual a influência do nível aquisição dos dados de sensoriamento remoto na discriminação entre a vegetação sadia e infectada?

É possível estimar o nível de concentração de nematoides/cm³ a partir das variações espectrais do cafeeiro infectado?

Nesse contexto, objetivo geral deste estudo é desenvolver um conjunto de métodos baseados em dados hiper e multiespectrais, adquiridos em multiescala, que permitam discriminar níveis de infecção por nematoides na cultura cafeeira. Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Caracterizar espectralmente o cafeeiro sadio e infectado a partir de medidas radiométricas obtidas em condições controladas e em levantamentos sobre o dossel;
- Avaliar o potencial de dados hiperespectrais (espectrometria de laboratório e campo) e parâmetros biofísicos da folha em discriminar níveis de infecção por nematoides;
- Caracterizar espacialmente níveis de infecção do cafeeiro por nematoides a partir de imagens multiespectrais tomadas por sensores orbitais de diferentes resoluções espaciais;
- Avaliar o potencial de modelos empíricos obtidos a partir de imagens multiespectrais de alta resolução espacial em estimar a concentração de nematoides no solo.

Para atingir esses objetivos foram delineados três experimentos que envolveram a aquisição de medidas de amostras de solo e de folhas coletadas *in situ*; medidas espectrorradiométricas sobre o dossel da vegetação e o tratamento e análise de imagens multiespectrais tomadas a partir de plataformas orbitais.

1.3 Sensoriamento remoto na detecção de doenças em culturas agrícolas

Nos últimos anos, o uso do sensoriamento remoto tornou-se imprescindível no monitoramento agrícola, principalmente por propiciar o acompanhamento e o desenvolvimento da cultura ao longo do tempo, previsão de safra, determinação de novas áreas de cultivo, determinação da quantidade e da localização da área cultivada, entre outras possibilidades, como, uma forma alternativa para identificação de áreas agrícolas afetadas por patógenos (SUGAWARA et al., 2011).

Com o objetivo do manejo ou controle de doenças, para fins de avaliação da eficácia de tratamentos específicos frente aos fitopatógenos, pesquisas têm confrontado medidas radiométricas com métodos de inspeção e quantificação em campo e resultados de análises laboratoriais. Em estudos como o de Silva et al. (2009), foram comparadas medidas adquiridas no comprimento de onda do infravermelho próximo, com diagnósticos de avaliação para estimar os danos causados pela ferrugem asiática da soja. Prabhakar et al. (2013) testaram o método de verificação visual e valores de reflectância para definir o dano

causado por insetos na cultura do algodão. Nesses trabalhos, os autores relacionam as vantagens do uso do sensoriamento remoto em relação à análise visual, destacando a possibilidade de realizar medidas em faixas espectrais não perceptíveis ao olho humano, o aumento na velocidade de aquisição dos dados e diminuição do esforço de trabalho, principalmente em campo.

O sensoriamento remoto hiperespectral, que possibilita uma caracterização minuciosa e detalhada dos alvos agrícolas tem-se mostrado particularmente eficiente na detecção de doenças que causam alteração na cor e estrutura foliar. Os pequenos intervalos espectrais definidos permitem gerar curvas espectrais que podem detectar mudanças estruturais ou fisiológicas da vegetação, imperceptíveis no domínio multiespectral. Alguns autores têm abordado, principalmente, questões relacionadas à discriminação espectral entre plantas saudáveis e não saudáveis (APAN et al., 2004; BOECHAT et al., 2012; GRISHAM et al., 2010; MAHLEIN et al., 2013; MARTINS e GALO, 2015).

Além disso, a partir da análise do espectro podem-se inferir informações adicionais sobre a vegetação, associadas com o teor de clorofila, índice de área foliar e biomassa (MULLA, 2012). A determinação de alguns desses parâmetros agrônômicos, em ocasiões, é realizada por meio de análises laboratoriais, ou medições de campo. Em busca de métodos mais eficazes nessas estimativas, Sanches et al. (2014) e Ramoelo et al. (2015), utilizaram a espectrorradiometria para estimar o teor de clorofila de culturas atacadas por pragas. Nesses estudos, os autores encontraram uma alta correlação entre as bandas de absorção da clorofila *a* e *b*, centradas no espectro do vermelho, com a deficiência nutricional (nitrogênio) nas folhas das plantas.

Por meio dos índices de vegetação calculados a partir das medidas hiperespectrais é possível estimar danos causados às culturas por patógenos. Mahlein et al. (2013) avaliaram o potencial de novos índices de vegetação na detecção de doenças causadas por fungos na cultura da batata doce, além de insetos e pragas. Nesse estudo, os autores constataram que para detectar fungos nesta cultura, os índices que utilizaram comprimentos de onda do visível foram mais eficientes, enquanto que para a detecção de infestação por insetos, os índices formulados a partir da reflectância nos comprimentos de onda do infravermelho próximo foram os mais indicados.

O sensoriamento remoto multiespectral, por sua vez, tem sido amplamente utilizado no mapeamento de culturas parasitadas a partir de imagens. A maior disponibilidade de sistemas sensores instalados em plataformas orbitais expandiu o conjunto de opções para o

uso dos dados gerados em aplicações agrícolas, devido, principalmente, ao refinamento significativo nas resoluções espacial, espectral e radiométrica, como a inserção de bandas espectrais específicas, sensíveis à vegetação.

Com a disponibilidade de bandas específicas a detecção do estresse da vegetação, como a do vermelho limítrofe, presente nos sistemas orbitais comerciais WorldView 2 e 3 e na constelação RapidEye, aumentou a possibilidade de desenvolver estudos relacionados com a detecção de áreas agrícolas infestadas por parasitas e pragas e definição de sua dispersão geográfica por meio da classificação de imagens (SANCHES et al., 2013; OUMAR et al., 2014), ou mesmo da detecção de estágios iniciais de infecção (EITEL et al., 2011; RAMOELO et al, 2012).

Especificamente, a detecção de áreas agrícolas infestadas por parasitas do solo, tais como os nematoides, por meio de dados hiperespectrais e multiespectrais tem sido objetos de estudos como o de Santos Júnior et al. (2001), Nutter et al. 2002 e Marchiorato (2008), que relatam detecção de nematoides em plantio de soja. Santos Júnior et al. (2001) utilizou a espectrorradiometria no visível e infravermelho próximo para essa detecção, enquanto nos trabalhos de 2002 e 2008, os autores produziram mapas de áreas da cultura da soja infectadas por nematoides a partir de imagens multiespectrais, os quais foram instrumentos auxiliares a decisões sobre o manejo de nematoides na cultura da soja.

Beck et al. (2015) verificaram o potencial de sensores instalados em plataformas orbitais na detecção de nematoides na cultura de pinheiros. Para áreas canavieiras, Ferreira Sobrinho et al. (2013) e Martins e Galo (2014), avaliaram o potencial da banda do vermelho limítrofe dos sensores WorldView 2 e RapidEye, respectivamente, na detecção de áreas de cana-de-açúcar infestadas por nematoides.

Embora se tenha o registro de vários estudos que resultaram no mapeamento de áreas infectadas por nematoides em culturas agrícolas em geral, pesquisas visando discriminar áreas severamente infectadas daquelas em estágio inicial de infecção, considerando que esse tipo parasita tem um efeito que se propaga no comprimento da folha para plantas e grupos de plantas, propiciando a sua detecção em dados multiescala, não foram encontradas na literatura para estudos dessa natureza, na cultura do cafeeiro.

1.4 Contribuição da pesquisa no âmbito da Agricultura de Precisão

O sucesso na cafeicultura está relacionado a diversos fatores, destacando-se a redução dos custos de produção, o aumento na produtividade, a busca constante de qualidade, a preservação do meio ambiente, a conquista de novos mercados consumidores e a definição de políticas agrícola para o setor cafeeiro. Quanto às questões que visam o aumento da produtividade e a busca constante de qualidade, é essencial que haja a diminuição de perdas causadas por fitoparasitas em geral (SOUZA, 2008).

Em face deste vertiginoso aumento da produtividade, com uso intensivo da tecnologia, o Brasil tornou-se um grande consumidor de produtos fitossanitários. O uso desse grande volume de substâncias químicas deve ser feito de maneira técnica e responsável, observando que elas possam cumprir suas funções de forma adequada, sem desperdícios e sem a degradação do meio ambiente.

A ocorrência de fitoparasitas no solo, como os nematoides, é um dos principais problemas enfrentados pelas culturas agrícolas, que demandam o uso constante destes produtos fitossanitários. Assim, o levantamento e monitoramento de populações de fitonematoides são essenciais para orientar medidas de controle desses patógenos. Nesta perspectiva, têm-se a agricultura de precisão, a qual emprega conhecimentos científicos que proporcionam a correta colocação dos produtos fitossanitários no alvo georreferenciado, em quantidade necessária, de forma econômica, com o mínimo de contaminação de outras áreas.

Além do mais, a agricultura de precisão pode ser uma alternativa viável para redução de custos no setor cafeeiro, uma vez que possibilita a aplicação de insumos de forma diferenciada, considerando-se as deficiências nutricionais do cafeeiro e dispersão de nematoides no solo para cada localidade. A compreensão da variabilidade espacial do patógeno na lavoura exige uma maior quantidade de informações, uma vez que os nematoides possuem baixo grau de mobilidade no solo e revelam a sua presença em sintomas típicos nas folhas do cafeeiro, a identificação e o mapeamento das áreas infectadas podem ser realizados a partir de técnicas de sensoriamento remoto.

O uso do sensoriamento remoto na cafeicultura de precisão é uma tecnologia a ser implantada em longo prazo, uma vez que ainda há poucos produtos disponíveis no mercado para aplicação na cultura cafeeira. Além do mais, há uma forte tendência para que o produtos sejam adotados para este fim, tanto por pressão do mercado que exige, cada vez mais, alimentos produzidos de forma ecologicamente consciente, como por parte dos produtores que visualizam, na agricultura de precisão, uma maneira de aumentar, por meio da otimização

do processo produtivo e do crescimento das tecnologias do sensoriamento remoto aplicado a culturas, a produtividade (FERRAZ et al., 2012).

A agricultura de precisão é uma atividade que envolve várias áreas no âmbito das geociências e há uma crescente necessidade de pesquisas para que ela seja adotada em uma maior escala na cafeicultura. Assim o desenvolvimento deste estudo, apoiado em técnicas de sensoriamento remoto, possa contribuir com a cafeicultura de precisão em práticas voltadas à detecção e o mapeamento de nematoides na cultura cafeeira, fornecendo uma importante contribuição na otimização processo de produção, redução de custos e no manejo ecologicamente consciente da cultura.

1.5 Estrutura da Tese

Esta tese está estruturada em sete capítulos que descrevem o conteúdo desenvolvido a partir do delineamento geral da pesquisa.

No primeiro capítulo em que se faz a caracterização do problema, com uma breve introdução ao tema proposto, definição da hipótese e objetivos, apresentação do potencial do sensoriamento remoto na detecção de doenças e com a contribuição desta proposta.

A fundamentação teórica, restrita aos conceitos necessários ao entendimento da proposta, é apresentada no segundo capítulo. Em um primeiro momento, são abordados tópicos relacionados ocorrência de nematoides na cultura cafeeira e os parâmetros agrônômicos do cafeeiro afetado pela infecção.

Posteriormente, é caracterizada a resposta espectral da vegetação e as propriedades físicas medidas em processos de radiometria de campo. No mais, são apresentadas as técnicas de pré-processamento de imagens (calibração e correção atmosférica) para conversão de números digitais em valores físicos.

No terceiro capítulo é apresentada abordagem metodológica adotada, delineados os experimentos realizados, bem como os materiais (instrumentos, dados e softwares) usados. O detalhamento dos experimentos, em termos de desenvolvimento metodológico, resultados e respectivas análises e discussões.

O experimento no qual se faz a caracterização biofísica e espectral dos níveis de infecção por nematoides por meio de espectrorradiometria de laboratório e posterior mapeamento das áreas infestadas a partir de imagens multiespectrais do sensor RapidEye é apresentado no quarto capítulo. Em seguida, no quinto capítulo, aborda-se o experimento em

que os dados hiperespectrais são tomados em campo, do dossel superior da vegetação, estabelecendo-se uma nova escala de aquisição de dados que é usada como referência para avaliar a discriminação dos níveis de infecção em imagem multiespectrais tomadas por sensores com diferentes resoluções espaciais.

O último experimento desenvolvido, no qual foram ajustados modelos empíricos para estimar a concentração de nematoides no solo, a partir da reflectância de superfície registrada em imagens multiespectrais é apresentado no sexto capítulo.

Como resumo do que foi apresentado e discutido nesta tese de doutorado, o último capítulo apresenta as conclusões obtidas acerca dos resultados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Nematoides na cultura cafeeira

- Caracterização do patógeno

Os nematoides são vermes microscópios e geralmente abundantes no solo, água doce e salgada e muitas vezes são parasitas de animais, insetos e plantas. Em geral, são classificados como indivíduos de vida livre, quando não são parasitas, e como fitopatógenos (fitonematoides), em caso de parasitismo (VAAST et al., 1998).

Nos solos agrícolas geralmente existem uma comunidade complexa de diferentes espécies de nematoides, alguns se alimentam de bactérias ou fungos com importância na decomposição e reciclagem de nutrientes. No entanto, uma parcela substancial da comunidade de nematoides do solo alimenta-se diretamente nas raízes das plantas, às vezes causando doença ou não (ALLARD e MOORE, 1989).

Os fitonematoides são classificados genericamente em dois grupos: endoparasitas e ectoparasitas. Os nematoides endoparasitas invadem os tecidos radiculares e permanecem grande parte do seu ciclo de vida dentro das raízes das plantas. Já os ectoparasitas, geralmente, alimentam-se externamente a raiz. O parasitismo nas raízes é realizado por meio do estilete do parasita que é inserido nas células das raízes para remover o conteúdo celular, e impedindo a absorção de água e nutrientes pelas plantas (BARROS et al., 2014).

- Nematoides na cafeicultura

Na cafeicultura, os nematoides (endoparasitas) são estritamente parasitas do solo que atacam o sistema radicular da planta. Geralmente, não estão uniformemente distribuídos em toda área cultivada, sendo caracterizados, no campo, pela ocorrência de reboleiras de plantas subdesenvolvidas ou dispersos na área agrícola, frequentemente exibindo folhas com aparência clorótica, necroses e formação de galhas nas raízes (CASTRO e CAMPOS, 2004). Na Figura 1 são apresentados alguns desses sintomas nas folhas e raízes do cafeeiro típicos da infecção por *Migdolus paranaenses*.

Figura 1. A) Plantas de café com sintomas da infecção por nematoides (folhas cloróticas). B- Galhas formadas nas raízes do cafeeiro (SILVA et al., 2008)



Diversos gêneros de nematoides, parasitas das raízes do cafeeiro, já foram identificados no mundo, porém poucas espécies apresentam boa adaptação, disseminação e capacidade de causar prejuízos à cafeicultura (MONTEIRO et al, 2001). Especificamente, na região sul do Brasil, as plantações de café são parasitadas, na maioria dos casos, pelos nematoides do gênero *Meloidogyne*, sendo a espécie *M. exigua* a mais disseminada (CAMPOS, 1997), seguida de *M. incognita* (SOUZA et al., 2000) e *M. paranaensis* (BARROS et al., 2014; CASTRO e CAMPOS, 2004).

- Propagação da infestação

A facilidade de propagação, a notável capacidade de destruir o sistema radicular, o grande número de plantas hospedeiras, a existência de raças fisiológicas, além da intolerância das cultivares de tais como o *Coffea arabica* a esses parasitas, fazem com que os nematoides constituam fator limitante tanto para a implantação de cafezais em áreas onde ocorrem quanto para a manutenção daqueles já infestados (IAC, 2007).

Em campo a disseminação dos nematoides ocorre através do transporte de mudas entre regiões, a partir de condições naturais causadas pelos movimentos da água, enxurradas, pontos de irrigação, cursos d'água, dos animais e, principalmente, pela ação do homem, que transporta nematoides em implementos agrícolas e veículos que circulam sobre as áreas de plantio (IAC, 2007).

- Controle e prevenção

O diagnóstico seguro requer a análise de amostras em laboratório de solo e raízes para a detecção dos nematoides presentes. Se a população dos nematoides-chave da cultura for considerada expressiva, em geral, atribui-se a esses os danos que estão sendo observados. Em níveis mais baixos, outras causas devem ser pesquisadas, já que as plantas afetadas por nematoides, geralmente, estão mais predispostas ao ataque de outras pragas e patógenos (ABAWI e CHEN, 1998).

A prevenção é a melhor forma de controle de patógenos de solo, em especial os nematoides, uma vez que introduzidos na propriedade, o produtor terá que conviver com o problema, já que sua erradicação é praticamente impossível. Desta forma, os métodos usuais de controle têm como objetivo principal reduzir ou manter as densidades populacionais dos nematoides em níveis baixos que não causem perdas econômicas.

O essencial é adotar práticas de contenção da proliferação dos nematoides em áreas ainda não infectadas. Neste sentido, o uso de implementos agrícolas, ferramentas e máquinas agrícolas sujas devem ser evitados. Além do mais, materiais de propagação de plantas, tais como mudas, estacas, tubérculos, bulbos, rizomas e sementes precisam estar isentos de nematoides (ALLARD e MOORE, 1989).

Cuidados muito especiais necessitam ser tomados com viveiros de produção de mudas, onde a área escolhida não deve estar infestada, e protegida de infestações futuras, especialmente por água de enxurradas e inundação. A água de irrigação deve provir de poço artesiano ou mina, por encanamento adequado. No mais, práticas como rotação de culturas, o uso de herbicidas, nematicidas, plantas antagonistas e cultivares resistentes contribuem na diminuição da proliferação do patógeno (IAC, 2007).

2.2 Parâmetros agronômicos

O Sensoriamento Remoto têm colaborado de maneira efetiva no levantamento, mapeamento e monitoramento de áreas cafeeiras. Mas ainda são necessárias pesquisas que visem correlacionar os fatores biofísicos da cultura com sua resposta espectral, avaliar o uso de satélites de alta resolução espacial na obtenção e análise destes dados.

Além do mais a resposta espectral da cultura cafeeira é muito complexa e, há necessidade de constantes estudos visando sua caracterização espectral em função de seus

parâmetros agronômicos. Os parâmetros agronômicos são variáveis biofísicas que remetem a propriedades fisiológicas particulares da vegetação, dentre tais parâmetros têm-se a biomassa, porcentagem de cobertura vegetal, índice de área foliar (IAF) e radiação fotossinteticamente ativa absorvida (GHINI, et al. 2008)

Parâmetros tais como o IAF, teor de clorofila e a biomassa são variáveis relevantes para avaliar a severidade da infecção de nematoides em culturas agrícolas, uma vez que os sintomas característicos desta infecção é o desfolhamento da planta, queda da produtividade e razão da baixa atividade fotossintética e o não desenvolvimento do vegetal (VAAST et al.,1998).

2.2.1 Índice de área foliar

O IAF é uma variável de crescimento reconhecida pela sua importância como indicativo da produtividade da planta, uma vez que a fotossíntese realizada pelas plantas depende da interceptação da energia luminosa pelo dossel e da sua conversão em energia química. A eficiência do processo fotossintético depende da taxa de fotossíntese por unidade de área foliar e da interceptação da radiação solar, as quais são influenciadas pela arquitetura do dossel e pela dimensão do sistema fotoassimilador (FAVARIN et al., 2002).

Assim como em diversas culturas, a área foliar do cafeeiro é fundamental em estudos na área de fisiologia, onde envolvem análises de crescimento, transpiração, e pesquisas científicas voltadas a estudos dos danos causados por pragas, patógenos de solo e foliares. O IAF também pode ser um estimador da perda de água do vegetal, uma vez que a folha é principal órgão vegetal no processo transpiratório responsável pela troca gasosa com o ambiente e de grande utilidade na avaliação de técnicas culturais, como poda, adubação, espaçamento, aplicação de defensivos e manejo da irrigação (BOECHAT, 2012).

A forma de quantificar a área foliar é por meio do IAF, o qual está intimamente relacionado com vários processos fisiológicos da planta. Matematicamente o índice de área foliar pode ser expresso pela relação funcional existente entre a área foliar e a área do terreno ocupada pela cultura. Considerando que o rendimento agrícola é expresso pela quantidade de matéria colhida por unidade de área, é válido expressar a área foliar sobre a mesma base do rendimento (BATISTA, 2005).

Para estimar o índice de área foliar de uma cultura são utilizados métodos classificados como destrutivos ou não destrutivos e diretos ou indiretos. Denomina-se método

destrutivo aquele em que se há a necessidade de retirar partes do vegetal, em contrapartida, os métodos não destrutivos são aqueles que não necessitam da retirada de suas partes, preservando, assim, a sua integridade e permitindo a continuidade das avaliações. Já os métodos diretos são baseados em medidas realizadas diretamente nas folhas, enquanto os indiretos são baseados na correlação conhecida entre uma variável biométrica mensurável e área foliar real (FLUMIGNAN et al., 2008).

Na cultura do café são encontradas diversas metodologias para estimar área foliar da cultura, porém, na prática, dois métodos são os mais difundidos: dimensões foliares e a utilização do integrador de área foliar. No método de dimensões foliares, a área foliar é estimada pela relação entre área foliar real e a área de um retângulo circunscrito na folha. Esta abordagem é amplamente empregada em levantamentos *in situ* devido à sua praticidade, boa qualidade das estimativas e por ser não-destrutivo. Já o método apoiado no integrador de área foliar, normalmente utilizado como referência, mede a área foliar pelo princípio de células de grade de área conhecida e, além do mais, possui alto custo e é destrutivo (FLUMIGNAN et al., 2008).

Dentre os métodos destrutivos, conforme Marshall (1968) têm-se: método planimétrico, método gravimétrico, utilização do peso seco da folha e sua relação com a área foliar, dentre outros. Dentre o escopo dos métodos não destrutivos, destacam-se: utilização da relação entre as medidas lineares da folha e sua área, método de contagem de quadrados preenchidos pelo contorno das folhas, planimetria fotoelétrica, fotográfica fotoelétrica e com radiação, fotografia hemisférica e outros.

Tratando-se de métodos indiretos, têm-se o IAF, que tem sido amplamente utilizado em pesquisas, atualmente. Neste procedimento, são realizadas medidas biométricas como o volume e a área lateral do dossel e, conseqüentemente a altura e o diâmetro inferior do dossel. Deve-se ressaltar que, os dois primeiros parâmetros apresentaram valores próximos aos dos métodos diretos considerados de referência (BOECHAT, 2012).

Com o avanço tecnológico, muitos métodos tradicionais de medição e equipamentos têm sido substituídos por métodos computacionais usando a análise de imagens digitais, provendo assim medições indiretas e não destrutivas.

Nesta perspectiva, uma forma bastante difundida para se obter o IAF, é por meio do integrador portátil *AM 300*, o qual é um sensor *scanner* passivo, que tem como principal característica uma maior rapidez na obtenção de medidas de IAF, quando comparados com outros métodos de medidas indiretos (BOECHAT, 2012).

Em suma, a relação entre a reflectância da vegetação e correspondentes valores de IAF, é um importante parâmetro de estudo em aplicações do sensoriamento remoto na vegetação, uma vez que a reflectância varia proporcionalmente com área da copa do dossel. Especificamente, o intervalo espectral do infravermelho próximo é a região mais sensível às variações do IAF para a maioria das culturas, tais como a cafeeira (LIU, 2007).

2.2.2 Teor relativo de clorofila

As clorofilas são pigmentos responsáveis pela conversão da radiação luminosa em energia, sob a forma de adenosina trifosfato (ATP) e fosfato de dinucleotídeo de adenina (NADPH). Por essa razão, estes pigmentos estão estreitamente relacionados com a eficiência fotossintética das plantas (STREIT et al., 2005). Assim o Teor Relativo de Clorofila (TRC) presente na folha pode fornecer algumas características relacionadas a desordens nutricionais e deficiências.

De forma não destrutiva, atualmente, a clorofila é estimada por um aparelho capaz de gerar grandezas relacionadas diretamente com o TRC, a este instrumento denomina-se clorofilômetro. No âmbito da agricultura de precisão, tais equipamentos, são amplamente utilizados, pois se realizam as medidas de forma indireta, fato que permite a estimava do TRC de forma rápida e pouco onerosa (BOECHAT, 2012).

Um clorofilômetro bastante utilizado é o Spad-502, o qual é um medidor indireto de clorofila e tem sido estudado para diversas culturas, e com resultados satisfatórios quanto à avaliação do estado nutricional de nitrogênio (NEVES et al. 2005; ZOTARELLI et al., 2003).

Especificamente, o SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) fornece leituras que se correlacionam com o TRC presente na folha. Os valores são calculados pela leitura diferencial da quantidade de luz transmitida pela folha, em duas regiões de comprimento de onda (vermelho (650 nm) e infravermelho próximo (940 nm)), e a absorção de luz pela clorofila ocorre no primeiro comprimento de onda (SWIADER E MOORE, 2002). Ainda o autor, ressalta que a leitura obtida no SPAD é um valor em unidades de SPAD, ou seja, adimensional, porém quanto maior o valor medido, maior é o TRC. Para tanto, as leituras efetuadas pelo medidor portátil de clorofila correspondem ao TRC presente na folha da planta.

2.2.3 Biomassa

A biomassa da vegetação é um parâmetro que remete a quantidade de matéria orgânica presente em uma planta. Em linhas gerais, ela pode ser quantificada de forma direta (destrutiva) e indireta (através de equações alométricas e sensoriamento remoto, entre outros métodos). Na forma direta é necessária à derrubada da vegetação, para diversas culturas agrícolas, a quantificação de biomassa segue o protocolo da amostragem direta, que exige áreas amostrais representativas, além de ser altamente onerosa (COLTRI et al., 2009).

O protocolo de aquisição configura-se na seguinte forma: primeiramente, extraem-se todos os compostos aéreos do vegetal (folhas, ramos, troncos e frutos), e posteriormente, secam-se as amostras em estufa de circulação forçada, para que possa ser quantificada a biomassa de cada componente com uma balança de precisão.

Nas aplicações em sensoriamento remoto da vegetação, a biomassa é um importante parâmetro para discriminação entre a vegetação sadia e doente. Segundo Colwell (1985), a refletância de pigmentos, tais como carotenoides e xantofilas são indicadores da produtividade biomassa, a qual quando apresenta altos valores é um indicador da vegetação sadia.

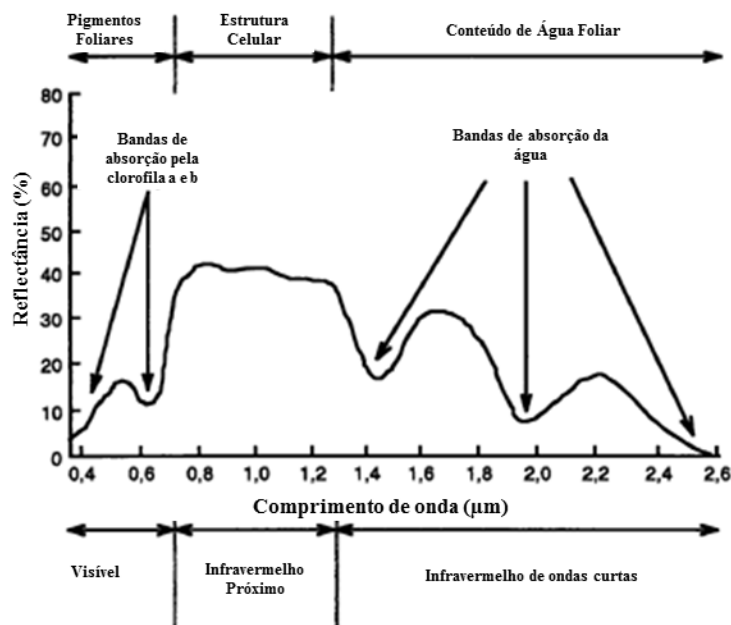
2.3 Interação da radiação eletromagnética com a vegetação

A interação da REM (Radiação Eletromagnética) com a vegetação ocorre em níveis diferentes para os diversos tipos vegetais. O processo inicia-se quando o fluxo radiante proveniente do Sol ou a radiação espalhada na atmosfera incide diretamente sobre a folha do vegetal. Assim acontece como qualquer alvo presente na superfície terrestre sobre qual incida certa quantidade de energia eletromagnética, a interação REM *versus* com a vegetação é descrita por três fenômenos: a reflexão, a transmissão e a absorção. Ou seja, frações espectrais da radiação incidente serão refletidas, absorvidas e transmitidas, de acordo com as características físico-químicas da vegetação (JENSEN, 2009).

A resposta espectral do café depende de uma série de fatores bioquímicos do vegetal e também de características físicas e estruturais do dossel. Em geral esses componentes químicos estão diretamente relacionados com os nutrientes presentes na folha, dentre os quais se têm: teor de macro e micronutrientes, componentes voláteis e ácidos e cafeína (ESTEBAN-DÍEZ, 2004).

Assim como para outras culturas, o padrão espectral da folha do café sadia e vigorosa, na região do visível, são caracterizados pela ocorrência de duas bandas de absorção pela clorofila, bem definidas no intervalo espectral do azul e do vermelho, especificamente entre 450nm e 520nm e entre 630nm e 690nm, respectivamente. Já na faixa do infravermelho próximo, a reflectância é alta e aumenta gradativamente com o acréscimo da quantidade de folhas, em função das múltiplas reflexões da radiação incidente nos espaços intracelulares do mesófilo foliar (JENSEN, 2009). Na Figura 2 é apresentada a reflectância espectral característica da folha verde sadia.

Figura 2. Reflectância espectral característica da folha verde sadia. (Fonte: Adaptado de Thenkaibail et al., 2011)



Dependendo da idade da folha, madura ou nova, a energia que é refletida, absorvida e transmitida é diferente. A discrepância espectral, neste caso, está relacionada ao espaçamento intracelular das paredes do vegetal, os quais já são bem desenvolvidos quando o tamanho da folha atinge cerca de um terço do porte normal. Esta condição faz com que a reflectância da folha madura seja 5% menor do que a reflectância de uma folha nova na região do visível e 15% maior na região do infravermelho próximo (LIU, 2007).

O comportamento da reflectância também sofre variações quando a planta está sob senescência ou algum estresse ambiental. A ausência da clorofila faz com que a planta absorva menor quantidade de energia nas bandas da região espectral do visível, ocasionam uma maior reflectância, principalmente no verde e no vermelho, fazendo com que apareçam amareladas ou cloróticas (CARTER, 1993).

Segundo Cibula e Carter (1992), as regiões do espectro do visível que são mais sensíveis a estresse localizam-se nos intervalos de 530 a 640nm e de 680 a 700nm. Valores maiores de reflectância nas proximidades de 700nm representam o que frequentemente é chamado de “deslocamento da borda vermelha para o azul” (em inglês, “*blue shift of the red edge*”). Trata-se do deslocamento, em direção aos menores comprimentos de onda, do gradiente de transição vermelho/infravermelho próximo (vermelho limítrofe), perceptível quando é feita a representação gráfica da reflectância pelo comprimento de onda.

De fato, também ocorrem mudanças na reflectância da planta no intervalo espectral do infravermelho próximo, quando ocorre condição de estresse causada por uma severa desidratação foliar. Nestas situações, observam-se menores picos de reflectância ao longo deste intervalo (JENSEN, 2009).

A resposta espectral da vegetação também sofre significativas alterações quando são atacadas por pragas e parasitas. Neste contexto, Thenkabail et al., (2011) apresentam as mudanças mais significativas nas propriedades óticas da vegetação: 1-em condições em que há mudanças no conteúdo de pigmentos das folhas, a resposta espectral do visível é mais afetada; 2- a reflectância ao de folhas com necrose assemelham-se com a resposta espectral de folhas em estágio de senescência e; 3-em casos de mudança da temperatura interna da folha, a doença pode ser detectada a partir da energia refletida no infravermelho próximo.

Especificamente na cultura cafeeira, as mudanças mais perceptíveis na resposta espectral para a cultura cafeeira infectada por nematoides ocorrem no intervalo do infravermelho próximo 780nm a 1070nm, onde o cafeeiro sadio apresenta maior resposta que as plantas infectadas por nematoides (MARTINS; GALO, et al. 2015).

2.4 Radiometria de laboratório e campo

Segundo Jensen (2009), a radiometria de laboratório consiste na aquisição de dados radiométricos, onde o equipamento é posicionado a uma pequena distância do alvo em condições geométricas e de iluminação controladas. Quando realizado em campo, o procedimento de aquisição de dados visa minimizar os efeitos atmosféricos e permitir o maior controle das variáveis e dos decorrentes erros sistemáticos que influenciam as propriedades óticas do alvo de uma superfície qualquer a ser estudada.

Conforme Schaepman-Strub et al. (2006), a determinação da radiância espectral de um alvo da superfície terrestre é um pré-requisito essencial para elaborar uma base física de

calibração e realizar análises quantitativas obtidas a partir de medições de sensores terrestres e de satélites no domínio óptico. A radiação espectral é o fluxo radiante em um feixe por unidade de comprimento de onda e por unidade de área e ângulo sólido, sendo expressa em unidades do Sistema Internacional [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$].

A reflectância de uma superfície é definida como a razão do fluxo de radiação eletromagnética refletida pelo fluxo de irradiância incidida sobre uma determinada superfície (NICODEMUS et al., 1977). Entretanto, desde os primeiros sobre a radiometria de campo, questiona-se a necessidade de separar os dois tipos de reflexão possíveis (difusa e direta), além de definir reflectância como sendo a razão de uma porção especificada do fluxo refletido pelo fluxo incidente (ANTUNES, 1992). Genericamente, a reflectância é dada por:

$$R = \frac{M(\text{W}/\text{m}^2)}{E(\text{W}/\text{m}^2)}, \quad (1)$$

em que M é a exitância devido à reflexão; e E a irradiância.

Porém, as grandezas envolvidas na Equação 1 são de difícil medição e pouco trazem de informações a respeito das propriedades refletoras do alvo, com relação à geometria de iluminação e direção de visada do sensor (STEFFEN, 1996).

Conforme Nicodemus et al. (1977), a quantidade que caracteriza geometricamente as propriedades refletoras de uma superfície que contém uma área consideravelmente grande, com propriedades uniformemente isotrópicas e irradiada de forma constante, é a Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional (FDRB) ou fr:

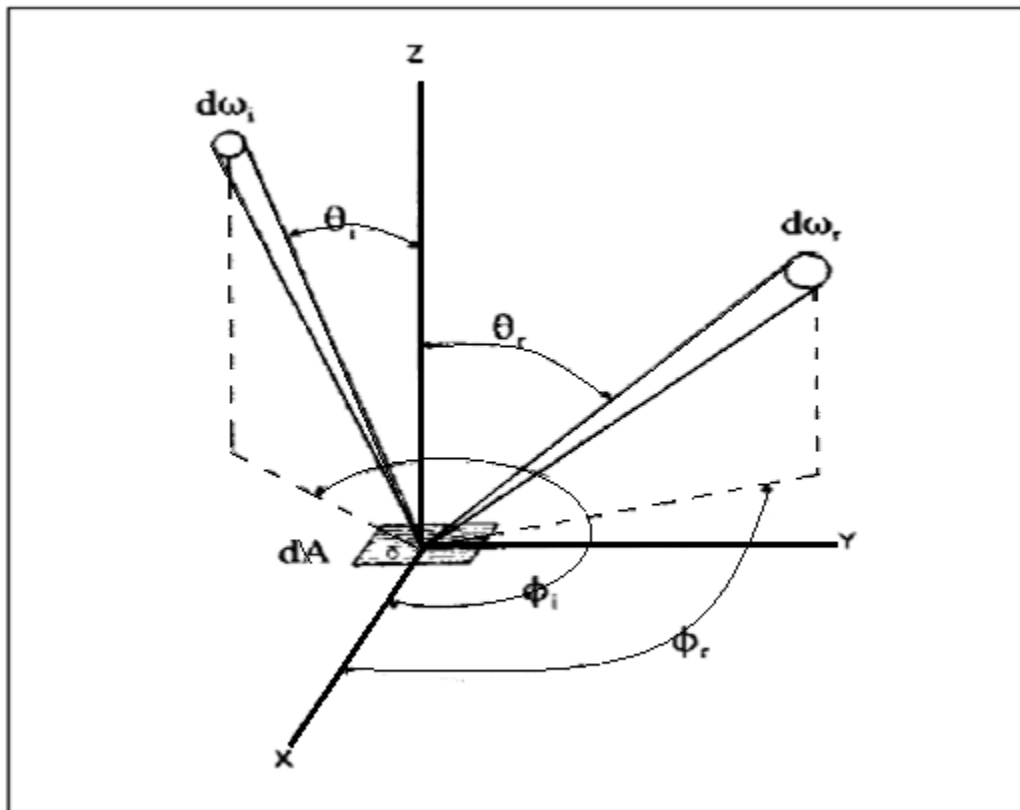
$$\text{fr}(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r, E_i)}{dL_i(\theta_i, \Phi_i) \cos\theta_i d\omega_i} \quad (\text{Sr}^{-1}) \quad (2)$$

em que, dL_r é radiância refletida (infinitesimal); E_i é a irradiância incidente; $L_i(\theta_i, \Phi_i) \cos\theta_i d\omega_i$ é a irradiância incidente; ω_i é o ângulo sólido; θ e Φ remetem aos ângulos zenital e o azimutal, respectivamente; e os subscritos i e r denotam quantidades associados a fluxo incidente e refletido, respectivamente.

A FDRB é uma razão de valores infinitesimais, que não podem ser medidos na prática. Uma vez que prediz uma densidade de reflectância por ângulo sólido, a FDRB pode assumir valores que variam de zero ao infinito. No entanto, estas limitações não invalidam o valor

conceitual desta grandeza (NICODEMUS et al., 1977). A Figura 3 ilustra a geometria da FDRB descrita na Equação 2.

Figura 3. Geometria de feixes hipotéticos da radiação incidente e refletida, onde: ω é ângulo sólido; θ e Φ remetem o ângulo zenital e o azimutal, respectivamente e os subscritos i e r denotam quantidades associados a fluxo incidente e refletido, respectivamente. Fonte: Nicodemus et al., 1977



Antunes (1992) menciona que, se a reflectância de um difusor perfeito ou Lambertiano é a unidade, a razão entre um fluxo refletido por um alvo qualquer e o fluxo refletido por um difusor perfeito, será numericamente idêntica à reflectância real desse alvo. Esta teoria torna a reflectância uma grandeza mensurável, desde que se cumpram os seguintes requisitos:

- O difusor perfeito deve ser irradiado da mesma maneira que o alvo;
- O equipamento de medição deve ter a mesma abertura (ângulo sólido) para o alvo e para o difusor perfeito.

Segundo Nicodemus et al. (1977), o procedimento ideal para se obter a reflectância de um alvo da superfície terrestre, em determinada direção, seria medir a sua radiância nessa direção, restrita a um determinado ângulo sólido infinitesimal e dividir o valor encontrado pela radiância de um difusor perfeito, sob condições idênticas de iluminação e mesmo ângulo

sólido. Porém, o que se mede, em condições de campo, é o Fator de Reflectância (FR), o qual é definido como a razão do fluxo radiante do alvo por aquele que seria refletido pela superfície Lambertiana e sem perdas por absorção e transmissão, levando-se em consideração as mesmas condições de geometria de iluminação e direção dos raios (mesmo ângulo sólido) (JENSEN, 2009). Conforme Nicodemus et al. (1977), o FR é descrito por:

$$FR(\omega_i\omega_r) = \frac{dA \int_{\omega_r} \int_{\omega_i} fr(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r) L_i(\theta_i, \Phi_i) d\Omega_i d\Omega_r}{(dA/\pi) \int_{\omega_r} \int_{\omega_i} L_i(\theta_i, \Phi_i) d\Omega_i d\Omega_r} \quad (3)$$

em que $d\Omega = \cos\theta(d\omega)$, sendo o valor de FR uma quantidade adimensional.

A Equação 3, embora represente fielmente o resultado de FR, pode ser reescrita de forma mais compacta quando se considera a placa de calibração como um difusor não perfeito, ou seja, levando-se em conta que ela está suscetível a perdas de energia em medidas realizadas em condições de campo. Considerando-se essa condição, Milton (1987) define FR da seguinte forma:

$$FR(\omega_i\omega_r) = \frac{dL_{(\theta_r, \Phi_r)}(\text{alvo})}{dL_{(\theta_r, \Phi_r)}(\text{placa})} K(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r) \quad (4)$$

em que K é o fator de correção da placa.

Martonchik (2009) salienta que a determinação da radiância da placa de referência é um importante procedimento que tende a cancelar grande parte da incerteza do valor do fluxo absoluto medido, no processo calibração radiométrica do instrumento de medição. Como exemplo de superfície Lambertiana, têm-se o painel Spectralon, o qual serve como um excelente refletor difuso e pode ser utilizado tanto em trabalhos de laboratório como de campo.

Robison e Biehl (1979) argumentam ainda que para que o FRB medido seja uma boa estimativa do verdadeiro valor de FRB do alvo, a placa de referência deve ter: reflectância próxima à Lambertiana; a incidência da radiação no alvo deve ser dominada pela fração direcional; o alvo não deve ter FRB radicalmente diferente do Lambertiano. Slater (1980) esclarece que Lambert propôs uma superfície perfeitamente difusa (ou Lambertiana) como

sendo aquela para qual a radiância (L) é constante para qualquer ângulo de reflexão em relação à normal à superfície.

Segundo Robinson et al. (1979), a quantidade obtida da medição do alvo e da placa padrão, com um equipamento que apresente um pequeno campo de visada (FOV), ou seja, menor que 20°, é denominada Fator de Reflectância Bidirecional (FRB), sendo uma direção relacionada ao ângulo de visada e a outra ao ângulo solar.

Assim como em Antunes (1992), o FRB é definido como sendo π vezes maior que a radiância do alvo na direção considerada, que pode ser obtido pela razão entre as radiâncias espectrais do alvo de interesse ($dL(\theta_r, \phi_r)_{Alvo}$) e a radiância de uma amostra referência de uma superfície lambertiana ideal ($dL(\theta_r, \phi_r)_{Placa}$) nas mesmas condições de iluminação e observação; multiplicado pelo fator de calibração da superfície de referência k :

$$FRB = \pi FRB(\omega_i \omega_r) = \frac{dL(\theta_r, \phi_r)_{(alvo)}}{dL(\theta_r, \phi_r)_{(placa)}} K(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r) \quad (5)$$

em que FRB é o Fator de Reflectância Bidirecional (adimensional).

Ainda segundo Antunes (1992), nesta situação, o uso de π é necessário para conversão de radiância para irradiância, sendo obtido da integração de todo hemisfério do ângulo sólido projetado. Atualmente, essa técnica já se encontra implementada na maioria dos sensores espectrais e utiliza a seguinte condição de conversão:

$$\pi = \int_{2\pi} \cos\theta_v d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\theta_v \sin\theta_v d\Phi_v d\Phi_v \quad (6)$$

em que θ_v é o ângulo zenital da fonte de radiação eletromagnética; $d\Phi_v$ é o fluxo da radiância incidida no alvo.

Embora, a terminologia FRB seja fortemente mencionada como a componente física da REM que é mensurada em nível de campo e laboratório, alguns autores como (Martonchik et al., 2000; Schaepman-Strub et al., 2006; Milton et al., 2009; Anderson et al., 2011) consideram que, de acordo com a geometria assumida em medidas em campo, sob iluminação ambiente e um campo de visada instrumental constante, o fator a ser medido é denominado de Fator de Reflectância Hemisférico Cônico (FRHC) (Equação 7).

$$FRHC = R(\theta_i, \Phi_i, 2\pi, \theta_r, \Phi_r, \omega_r) = \frac{\int_{\omega_r} \int_{2\pi} fr(\theta_i, \Phi_i, \theta_r, \Phi_r) L_i(\theta_i, \Phi_i) d\Omega_i d\Omega_r}{(dA/\pi) \int_{2\pi} L_i(\theta_i, \Phi_i) d\Omega_i} \quad (7)$$

Em estudos da radiometria da vegetação é comum o uso de espectrorradiômetros para mensurar o FRHC dos alvos, tanto para atividades de campo como laboratório. Porém, a confiabilidades dos valores físicos medidos ainda é uma questão a ser discutida, uma vez que, mesmo em um campo de medidas controlado, os valores de FRHC podem apresentar erros provenientes de fontes não conhecidas, como imprecisões do equipamento de medida (ANDERSON et al, 2011; MARTONCHICK et al., 2000; MILTON et al., 2009; SCHAEPMAN-STRUB et al., 2006).

Anderson et al. (2011), com o objetivo de quantificar as incertezas nos valores de FRHC tomados em laboratório e *in situ*, reportaram que em medidas sobre o dossel da vegetação, foram registradas discrepâncias da ordem de 0,008 e 0,016, quando comparadas com valores de referência. Os autores destacam que, por vezes, os erros encontrados estão associados a outras variáveis, tais como: condições atmosféricas, geometria de aquisição de medidas, distância alvo-sensor e calibração do sensor.

Logo, para garantir a integridade dos valores de FRHC obtidos em estudos da vegetação, as variáveis citadas devem ser consideradas e evitadas. Milton et al. (2009) e Anderson et al. (2011) relatam que como forma de se obter os valores físicos fidedignos, o ideal é que a medidas sejam realizadas em ambientes controlados quando isso não for possível, deve-se aumentar a distância alvo-sensor e manter a geometria de aquisição.

2.5 Calibração radiométrica e correção atmosférica de imagens multiespectrais

A conversão de números digitais (ND) de uma imagem multiespectral em parâmetros físicos, como a radiância e a reflectância, é um importante processo que possibilita a caracterização espectral de objetos e, a utilização de operações numéricas que incluem diferentes bandas espectrais ou diferentes sensores (SCHOWENGERDT, 2006).

Em Sensoriamento Remoto, cada sensor, em cada banda, possui um critério próprio para discretizar os valores de radiância medidos na escala específica de sua resolução radiométrica. Logo, as imagens resultantes para um mesmo sensor, em diferentes bandas, não apresentam necessariamente compatibilidade entre os NDs registrados. Isso torna impossível

a comparação entre NDs de bandas diferentes, tanto para um mesmo sensor quanto para sensores diferentes, já que a caracterização espectral de objetos torna-se inviável (CURRAN, 1985).

Uma solução para essas limitações, segundo Schowengert (2006), são as conversões dos NDs registrados em valores físicos mediante o conhecimento de características de navegação do sensor que gera a imagem, assim como das condições ambientais do exato momento da geração das imagens.

Para converter NDs em valores físicos, primeiramente, devem-se transformar os números digitais de uma imagem em valores de radiância aparente ($L_0(\lambda)$) (NOVO, 1992). O valor de $L_0(\lambda)$ é dado pela Equação 8:

$$L_0(\lambda) = (L_{\min}(\lambda) + \frac{(L_{\max}(\lambda) + L_{\min}(\lambda))}{2^x}) * ND(\lambda) \quad (8)$$

em que x é número de bits; e $L_{\min}(\lambda)$ e $L_{\max}(\lambda)$ representam os valores de radiância mínima e radiância máxima respectivamente.

É importante destacar que o valor de $L_0(\lambda)$ é medido em nível orbital e não representa fielmente a radiância de superfície. Esse fato é bastante relevante em produtos orbitais, pois o sensor recebe um fluxo de radiação que contém a radiação específica do objeto acrescida da radiação de trajetória e do fluxo, que é espalhado pela atmosfera (NOVO, 1992).

Uma vez convertidos para $L_0(\lambda)$, assume-se que os dados contidos nas imagens de diferentes bandas de um mesmo sensor ou de sensores diferentes, podem, então, ser comparados entre si. Porém, Ponzoni e Shimabukuro (2007), explicam que, como a radiância é um parâmetro radiométrico que depende da intensidade de radiação irradiada pela fonte, ela passa a não ser o parâmetro mais apropriado às avaliações das propriedades espectrais de objetos. Desta forma, a reflectância passa a ser de extrema importância para estes tipos de estudo, com destaque aos FRHC, os quais melhor representam as propriedades espectrais dos objetos (STEFFEN, 1996).

Ao calcular o FR a partir dos valores de Radiância Bidirecional aparente ($L_0(\lambda)$ B aparente), assume-se que o mesmo é Fator de Reflectância Hemisférico Cônico aparente (FRHC aparente), considerando-se as mesmas propriedades já apresentadas pelo termo aparente (SCHOWENDGERT, 2006).

Em Markhan e Barker (1986), é apresentado o processo para transformar ND e FRHC aparente, onde, primeiramente, convertem-se os NDs em $L_0(\lambda)B$ aparente e, posteriormente, calcula-se o FRHC aparente a partir dos valores de $L_0(\lambda)B$ aparente, derivado dos parâmetros de calibração obtidos em missões de calibração anteriores ao lançamento. Vale ressaltar que, na maioria dos softwares de processamento digital de imagens, esses parâmetros e transformações encontram-se implementados.

A partir da conversão dos ND's em FRHC's aparente, é possível realizar operações aritméticas utilizando dados de diferentes bandas espectrais registrados para um mesmo sensor ou para sensores diferentes, uma vez que os novos ND's representam um parâmetro físico apresentado em uma mesma escala (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007). Apesar disso, Schowendgert (2006) explica que ainda não é possível a caracterização espectral de um alvo da superfície terrestre, uma vez que, intrinsecamente aos valores de FRHC aparente, encontram-se os efeitos da atmosfera. Para que tal caracterização seja possível, faz-se necessário eliminar ou minimizar os efeitos da atmosfera sobre os valores de FRHC aparente.

Na aquisição de uma imagem multiespectral, deve-se considerar que os sinais eletromagnéticos da radiação coletados pelos sensores remotos, instalados a bordo dos satélites, são modificados, dispersos e absorvidos por gases e aerossóis quando de sua passagem pela atmosfera no caminho entre a superfície da terra e o sensor. Portanto, a variabilidade existente nas diferentes condições atmosféricas deve ser considerada para se obter valores mais acurados de reflectância e radiância de superfícies vegetais (ZULLO JR, 1994).

A presença da atmosfera, entre o satélite e a superfície terrestre, ocasiona diversos efeitos nas imagens de satélites, como a diminuição dos valores digitais registrados pelo sensor, a diminuição de contraste entre superfícies adjacentes e alteração do brilho de cada ponto da imagem. (ZULLO JR, 1994).

A radiância está sujeita a dois processos físicos resultantes da interação com a atmosfera: espalhamento e absorção. A combinação destes dois efeitos é denominada atenuação atmosférica (NOVO, 1992).

Schowendgert (2006) afirma que a absorção atmosférica é um efeito termodinâmico que resulta na perda de energia para constituintes atmosféricos, como o vapor d'água, ozônio e outros gases. Já o espalhamento é o mecanismo que leva as maiores distorções radiométricas, causadas por partículas suspensas na atmosfera.

Segundo Ponzoni e Shimabukuro (2007), uma das formas de minimizar os efeitos da atmosfera é a aplicação de modelos de correção atmosférica sobre os valores de $L_0(\lambda)B$ aparente ou de FRHC aparente. Alguns dos modelos atmosféricos mais utilizados são os modelos de transferência radiativa, como o MODTRAN (*Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmittance Algorithm*). Este modelo é implementado em diversos *softwares* de processamento digital de imagens que oferecem variadas possibilidades de entradas de dados provenientes da caracterização espectral da atmosfera, principalmente em relação às concentrações de vapor d'água, ozônio, profundidade óptica e concentração de aerossóis. Há ainda a possibilidade de informar parâmetros referentes às propriedades espectrais de objetos vizinhos àquele que se pretende corrigir o efeito da atmosfera sobre seus valores de FRHC aparente apresentado em imagens orbitais.

Vale ressaltar que a caracterização da atmosfera, no ponto da tomada da imagem, é uma tarefa difícil e onerosa, pois, normalmente, envolve uma série de profissionais atuantes em diversas áreas do campo da meteorologia, além de requerer equipamentos de alto custo de aquisição e de manutenção. Apesar disso, é possível obter bons resultados ao se aplicar o modelo MODTRAN, adotando-se algumas condições de contorno e aproximações. Com dados de alta resolução espectral, como uma cena tomada pelo sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), é possível utilizar dados da própria imagem para estimar a presença de constituintes importantes da atmosfera, como a quantidade de vapor d'água (g/m^3), e para otimizar a modelagem de outros constituintes (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007).

Após a aplicação da correção atmosférica tem-se, como resultado final, a Reflectância de superfície, ou seja, assume-se que os FRHC resultantes referem-se aos estimadores da Reflectância Hemisférica Cônica dos alvos presentes na superfície terrestre, sendo possível, então, a caracterização espectral dos mesmos (SHOWENDGERT, 2006).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

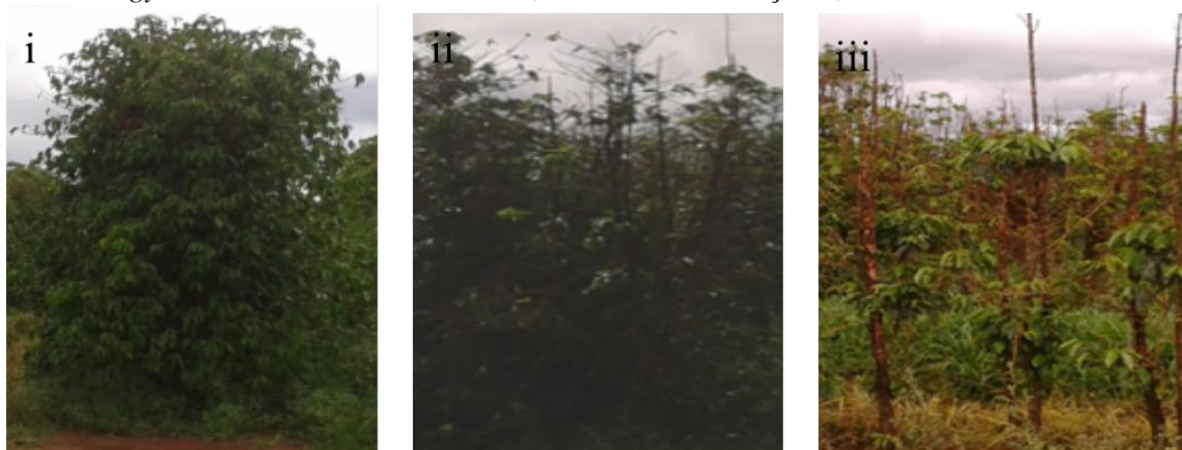
3.1 Delineamento experimental

Com o intuito de caracterizar espectral e espacialmente áreas cafeeiras infectadas por nematoides foram desenvolvidos três experimentos em áreas de estudos de dimensões diferentes, mas todas inseridas no maior polo produtor de café do país, localizado na região sudoeste do Brasil, especificamente no município de Monte Carmelo, estado de Minas Gerais. Nessas áreas experimentais, foi certificada somente a ocorrência de nematoides, por meio de análises nematológicas de amostras de solo e raízes.

Para duas das áreas experimentais, foi feita a caracterização espectral do café sadio e infectado por nematoides, enquanto que a dispersão espacial das áreas de infecção foi mapeada por meio da classificação de imagens multiespectrais. Na última área experimental, de menor dimensão, e na qual foi realizada a análise nematológica de uma densa amostra, foi feita a inferência espacial da concentração de nematóides (indivíduos/cm^3) com base em valores pontuais extraídos de uma imagem multiespectral.

De acordo com o nível de infecção de nematoides, as áreas de café foram classificadas em três categorias: (i) café sadio, representada por plantas assintomáticas sem a presença de nematoides; (ii) infecção inicial por nematóides, definida por plantas com sintomas moderados da infecção por nematoides e; (iii) severamente infectada, caracterizada por plantas com sintomas avançados de infecção por nematoides. No terreno, as plantas infectadas foram pelos sintomas característicos da presença do patógeno, plantas subdesenvolvidas, algumas delas apresentando folhas cloróticas e desfolhamento em casos mais severos. Nas áreas como um todo, a ocorrência de nematóides foi diagnosticada por análises nematológicas de amostras de solo e raízes. A Figura 4 mostra a aparência em campo de plantas sadias e infectadas.

Figura 4. Aspecto de plantas de café sadio e sob diferentes níveis de infecção por nematoides *Meloidogyne Paranaensis*: i- café sadio; ii- início de infecção e; iii- severamente infectada



Café Sadio: plantas assintomáticas sem a presença de nematoides

Início de Infecção: plantas com moderado sintomas da infecção por nematoides

Severamente Infectada: plantas com sintomas avançados da infecção por nematoides

A definição de três áreas experimentais deveu-se à disponibilidade de análises nematológicas de sítios específicos e a possibilidade de coletar de folhas de plantas sadias e infectadas em campo às medidas biofísicas e espectrorradiométricas, ou de realizar levantamentos de campo para obter os dados espectrais. Embora haja sobreposição parcial dessas áreas experimentais, as condições de tomada de dados, e mesmo alguns tipos de dados foram diferentes, definindo experimentos diferentes.

Tabela 1. Caracterização das áreas experimentais

Experimento	Objetivos	Dimensão da área experimental
1	Avaliar a discriminação entre folhas de plantas sadias e infectadas (leve e severamente) em dados biofísicos e espectrais; selecionar bandas espectrais de melhor discriminação e mapear áreas com diferentes graus de infecção por nematoides a partir de imagem RapidEye	400 há
2	Avaliar a discriminação entre folhas de plantas sadias e infectadas (leve e severamente) em dados espectrais tomados <i>in situ</i> ; selecionar bandas espectrais de melhor discriminação e mapear áreas com diferentes graus de infecção por nematoides a partir de imagem OLI/Landsat 8	600 há
3	Inferência da concentração de nematoides a partir de imagem RapidEye	14 há

3.2 Materiais

Os instrumentos de coleta de dados, imagens multiespectrais, softwares, utilizados na análise de cada área experimental são apresentados a seguir.

3.2.1 Equipamentos de laboratório

- Espectrorradiômetro

O espectrorradiômetro utilizado para realização das medidas de radiância foi um modelo *ASD Fieldspec HandHeld* fabricado pela *ASD (Analytical Spectral Devices)*, operando em 512 canais no intervalo espectral de 0,325 a 1,075 μm , com resolução espectral de 0,016 μm e quantização do sinal em 16 bits. O equipamento possui um campo de visada de 25°, variável de 1° e 10° com uso de filtros.

Além de ser usado na aquisição das curvas espectrais das folhas de plantas café sadio e infectado em condições controladas (laboratório), este espectrorradiômetro foi utilizado em campo, para aquisição de medidas sobre o dossel da vegetação.

- Receptor GNSS (Global Navigation Satellite System)

Nos experimentos 1 e 3, para o georreferenciamento dos locais de aquisição de amostras de folhas, solos e de pontos de verificação, foi utilizado um par de receptores de dupla frequência do modelo *Hipper GGD Topcon*.

No experimento 2 para o georreferenciamento das medidas radiométricas tomadas *in situ* e de pontos de verificação foi utilizado um receptor de navegação por código C/A *Garmim eTrex 30x*.

- Medidor de Área Foliar

O IAF das amostras de café foi medido por um *scanner* de folhas *AM 300* (Figura 5), fabricado pela *ADC Scientific*, com resolução de 0,065mm², precisão de 1% e velocidade de medida de 0,25 segundos por polegada.

Figura 5. Medidor de área foliar AM 300. (Fonte: www.marconi.com.br)



- Clorofilômetro

As medidas de clorofila foram obtidas a partir de um clorofilômetro *SPAD - 502 plus* (Figura 6), fabricado pela *Konica Minolta*, com precisão de $\pm 1,0$ unidade SPAD (SPAD para o valor entre 0,0 e 50,0 em temperatura/umidade normais): mensuração do índice de clorofila foliar.

Figura 6. Clorofilômetro *SPAD - 502 plus*. (Fonte: www.minolta.com)



- Estufa e Balança de Precisão

Para secagem e pesagem das folhas, foram utilizadas estufa de circulação forçada (secagem) e balança de precisão (pesagem).

- Relatórios de análises nematológicas

Para certificação da presença de nematoides nas áreas experimentais foram utilizados relatórios de análises nematológicas. Nestes relatórios os nematoides identificados por gênero e quantificados a concentração em 150 cm³ de solo.

3.2.2 Imagens Multiespectrais

- Imagens multiespectrais RapidEye tomadas em 13/10/2013 e 12/12/2014, adquiridas no Nadir. O sistema RapidEye é composto por cinco satélites em um mesmo plano orbital, sendo que o sensor imageador registra os dados da superfície terrestre em cinco intervalos de comprimento de onda: azul (0,440-0,510 μm), verde (0,520-0,590 μm), vermelho (0,630-0,685 μm) vermelho limítrofe (0,690-0,730 μm) e infravermelho próximo (0,760-0,850 μm). O sensor é do tipo *pushbroom* e adquire dados tanto no nadir como *off-nadir*, sendo que no primeiro caso o tempo de revisita é de 5,5 dias e, no outro, os dados podem ser adquiridos diariamente. A resolução espacial de um pixel é de 5 metros (BLACKBRIDGE, 2015). As imagens utilizadas nessa pesquisa foram disponibilizadas pelo Ministério do Meio Ambiente (MNA), por meio da página ‘Geo Catálogo’. O MNA disponibiliza essas imagens de todo o Brasil a órgãos públicos federais, estaduais e municipais. O acesso é feito pela página *web* <<http://geocatalogo.mma.gov.br/>>.
- Imagem multiespectral OLI/Landsat 8 tomada em 18/11/2015. O sensor OLI (*Operational Land Imager*) integra o satélite mais recente da série Landsat 8, possui dois sensores a bordo: OLI e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). A mudança da arquitetura do sensor de varredura mecânica (*whiskbroom*) para varredura eletrônica (*pushbroom*) foi uma das melhorias para aquisição de informações do sensor OLI, que resultou no aumento do tempo de integração (e conseqüente aumento da razão sinal-ruído) (GERACE et al., 2013). Outro ponto relevante foi a melhor quantização do sinal radiométrico (12 bits para raw data). Ao todo, o sensor OLI apresenta nove

bandas, sendo estas: Cirrus (1,360-1,380 μm), Costal (0,433-0,453 μm), Azul (0,450-0,515 μm), Verde (0,525-0,600 μm), Vermelho (0,630-0,680 μm), IVP (0,845-0,885 μm), Infravermelho médio 1 (1,560-1,660 μm), Infravermelho médio 2 (1,000-2,300 μm) e Pancromática (0,500-0,680 μm) (BARSÍ et al., 2014). A imagem do sensor OLI/Landsat 8 foi adquiridas junto ao USGS, no endereço <http://earthexplorer.usgs.gov/>. As imagens processadas no nível 1T, já estavam ortorretificadas e georreferenciadas (USGS, 2015).

3.2.3 Softwares para processamento de dados e das imagens

Os *softwares* utilizados foram: *MINITAB 15.0*, para tratamento estatístico das amostras; *ViweSpec Pro*, para processamentos das curvas espectrais tomadas pelo espectrorradiômetro; *ENVI (Environment for Visualizing Images)* desenvolvido pela empresa *Exelis VIS (Visual Information Solutions)*, utilizado para correção atmosférica e classificação das imagens multiespectrais; *ArcGis 10* desenvolvido pela empresa *ESRI (Environmental Systems Research Institute)*, utilizado para confecção dos mapas temáticos.

4. EXPERIMENTO 1: ANÁLISE DE DADOS BIOFÍSICOS E HIPERESPECTRAIS MEDIDOS EM CONDIÇÕES CONTROLADAS E DA DETECÇÃO DE NÍVEIS DE INFECÇÃO EM IMAGENS RAPIDEYE

4.1 Área experimental 1

A primeira área experimental (Figura 7) estudada está centrada nas coordenadas cartesianas WGS-84/UTM 253.812 m (E) e 7.917.075 m (N), abrangem cerca de 400 ha e consiste em parcelas da cultura do café em fase avançada de desenvolvimento (aproximadamente 10 anos) onde foi certificada a ocorrência de *Meloidogyne paranaensis*.

Estruturalmente, a região se caracteriza por relevos planos (altitude média de 900m), com predominância de solos do tipo Latossolo Vermelho Argiloso compostos por frações de argila e areia. O clima da área é caracterizado por apresentar um verão quente e úmido com as maiores precipitações, ocorrendo de outubro a fevereiro e decrescendo no mês de março. A precipitação média anual é da ordem de 1500 mm e a temperatura média é de 22C (OLIVEIRA, 2010).

Figura 7. Caracterização da área experimental 1. (A) Município de Monte Carmelo em destaque nos mapas de Minas Gerais e Brasil. (B) Talhões de café destacando a área de estudo em uma composição cor natural RGB da imagem RapidEye, limitada no vermelho. (C) Distribuição espacial de pontos amostrais georreferenciados: círculos representam a localização dos pontos em que folhas do cafeeiro foram extraídas para realizar medições biofísicas e espectrorradiométricas; demais pontos (controle) indicam elementos amostrais usados na estimativa da acurácia.



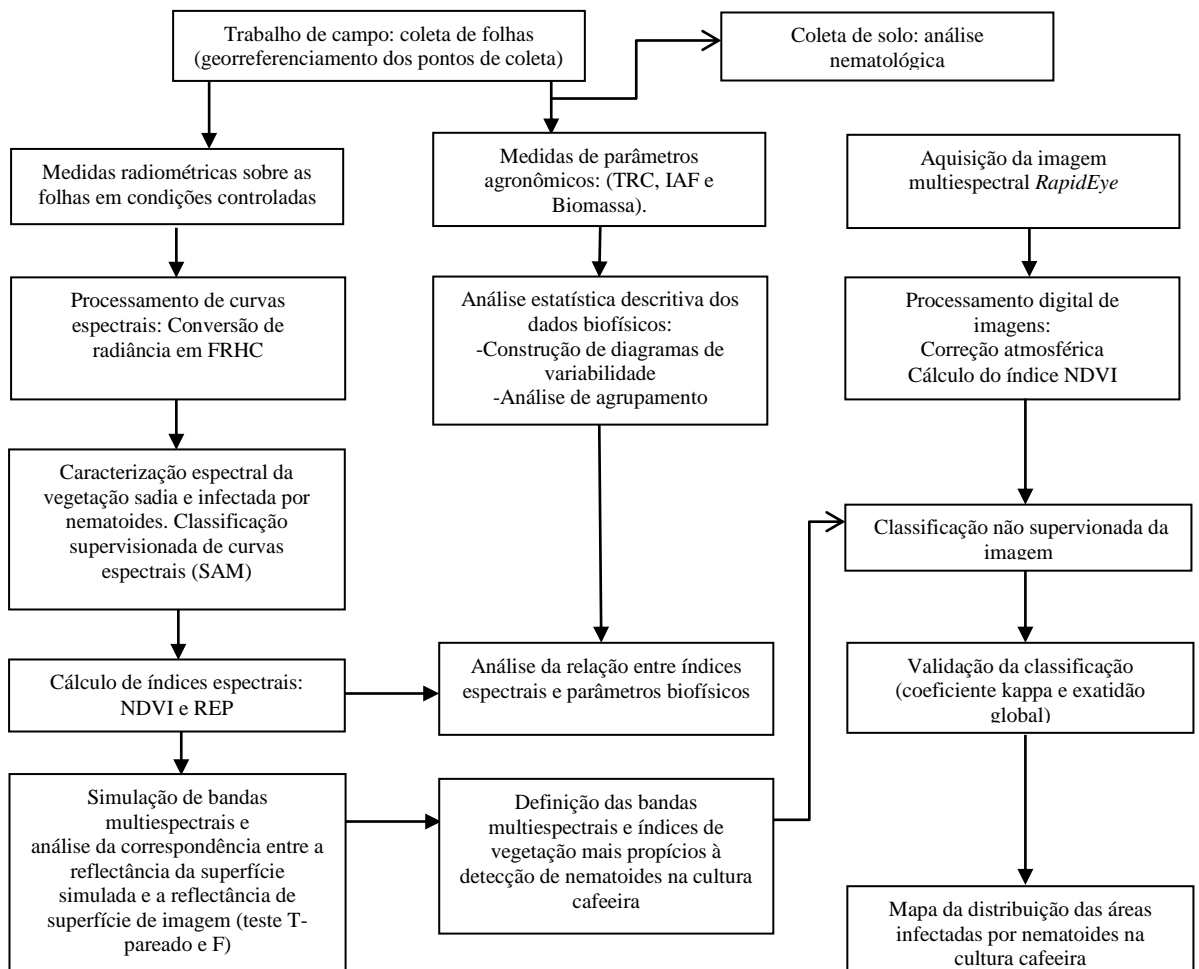
4.2 Desenvolvimento metodológico

Para avaliar a possibilidade de discriminar folhas do cafeeiro sadio e infectado (considerando os estágios inicial e severo de infecção) foram adquiridos, analisados e

comparados dados biofísicos e hiperespectrais. Os dados biofísicos analisados foram os parâmetros agrônômicos IAF, o TRC obtido pelo SPAD e medidas de biomassa.

No processo de caracterização espectral foram utilizados dados espectralradiométricos de folhas coletadas das mesmas plantas usadas para estimar os parâmetros agrônômicos, os quais permitiram a identificação das faixas espectrais mais sensíveis para discriminação do patógeno na cultura. A possibilidade de um sensor imageador detectar a configuração espacial definida nas áreas infectadas por nematoides foi avaliada a partir de uma imagem multiespectral *RapidEye*. Na Figura 8, é apresentado o fluxograma das atividades desenvolvidas na área experimental 1.

Figura 8. Metodologia proposta para o desenvolvimento do experimento 1.



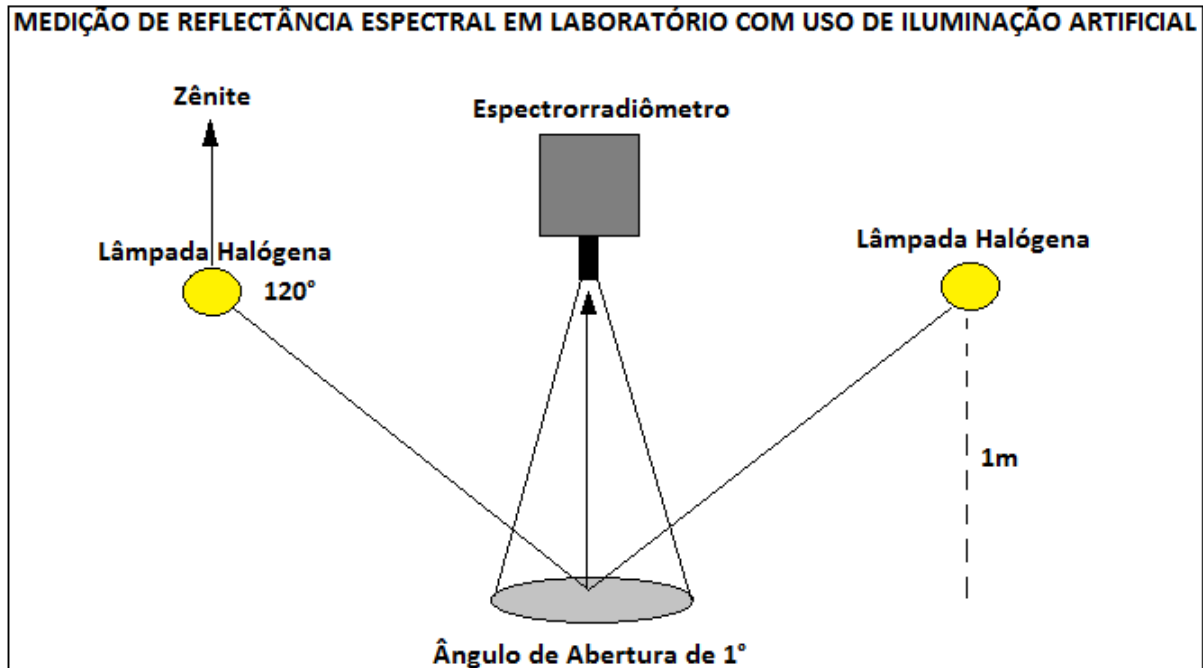
4.2.1 Aquisição de dados biofísicos e hiperespectrais

Em uma campanha de campo realizada em 23 de novembro de 2013, dados biofísicos e radiométricos do cafeeiro foram adquiridos de acordo com os pontos amostrados na Figura 7C. Os pontos de amostragem indicados por círculos, nesta figura, indicam a posição georreferenciada das plantas cujas folhas foram recolhidas e utilizadas para realizar medições radiométricas e biofísicas.

Em relação aos parâmetros agrônômicos, o IAF e o conteúdo relativo de clorofila foram medidos pelo medidor de área foliar *AM 300* e pelo clorofilômetro *SPAD-502*, respectivamente. Para a medição da biomassa, a matéria seca das amostras foi pesada depois de 48 horas de secagem a 65 ° C em uma estufa de circulação forçada. Para cada unidade de amostral foram realizadas dez medidas e obteve-se um valor médio para cada parâmetro.

Para medições radiométricas, as folhas foram coletadas em quatro pontos cardeais do terço basal dos arbustos, a fim de compensar a variação das condições de iluminação. A aquisição das medidas nas folhas coletadas foi realizada em laboratório, conforme recomendado em Jensen (2009). O espectrorradiômetro portátil *ASD FieldSpec* - operando na faixa espectral de 375-1075nm, fixado em 512 canais com resolução espectral de 1,6 nm e o *IFOV (Instantaneous Field of View)* de 1° - foi utilizado para medir a radiância da folha. Para cada elemento amostral, utilizou-se a média de dez repetições da leitura de radiância do alvo e mediu-se, também, a radiância de uma superfície lambertiana de referência (placa *Spectralon*), nas mesmas condições de iluminação e de observação, para estimar o Fator de FRHC do alvo. A Figura 9 apresenta o protótipo de aquisição das curvas de FRHC em laboratório.

Figura 9. Esquema de aquisição de medidas de reflectância em laboratório. (Adaptado: JENSEN, 2009).



A partir da conversão dos valores de radiância em FRHC, utilizou-se a média das dez repetições por ponto para produzir uma única curva por elemento amostral. Em seguida, foi aplicado um filtro média móvel de quatro pontos para suavizar as curvas, minimizando o efeito de ruídos causados por interferências externas ao alvo e pela imprecisão do instrumento.

4.2.2 Processamento dos dados biofísicos e hiperespectrais

Diagramas mostrando os valores do TRC, IAF e biomassa foram gerados para avaliar a discriminação de plantas saudáveis de café e submetidos a diferentes níveis de infecção por nematoides através de seus parâmetros biofísicos.

Para verificar a normalidade das medidas obtidas para parâmetros agrônômicos, foi aplicado o teste de normalidade proposto por Anderson-Darling, que compara a função de distribuição de probabilidade normal acumulada obtida para estes dados, com a distribuição normal (HAIR et al., 2009). Para tanto, o teste considera a hipótese nula (H_0), quando os dados definem distribuição normal, com a hipótese alternativa (H_1), quando os dados não apresenta distribuição normal. Assim, caso o p-valor seja maior o nível de significância (0,05) se aceita a hipótese nula (H_0).

Uma análise de agrupamento foi aplicada para avaliar a capacidade de discriminar as ocorrências avaliadas, a partir dos valores dos parâmetros agronômicos mensurados. Para tanto, adotou-se o agrupamento por observações, por meio do método de ligação média, usando da distância Euclidiana e o nível de similaridade igual a 90 para separação dos grupos. A análise de agrupamento foi realizada no software *Minitab*.

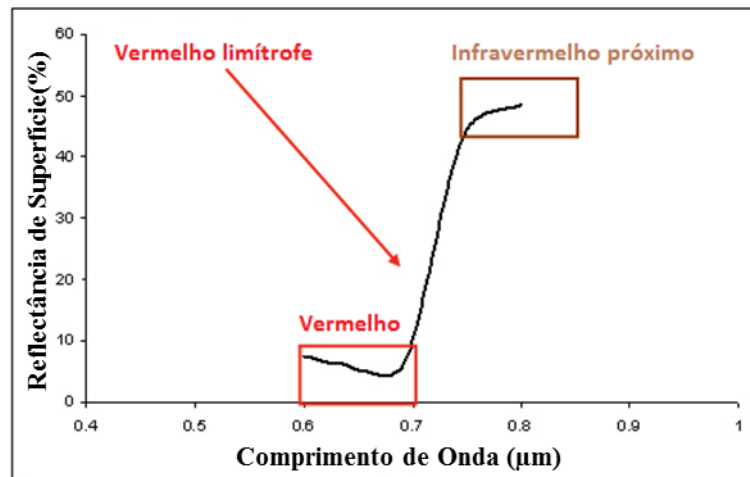
As curvas do FRHC foram utilizadas para caracterizar a resposta espectral das folhas coletadas do cafeeiro sadio e infectado. Desta forma, analisaram-se as discrepâncias entre os intervalos das três curvas médias de FRHC geradas e foram aplicadas técnicas de classificação supervisionada por meio do método do mapeamento por ângulo espectral (algoritmo *SAM*) nas trinta curvas de FRHC de cada cafeeiro para medir o grau de similaridade entre os espectros.

O algoritmo *SAM* foi desenvolvido para mapear o grau de similaridade entre curvas espectrais geradas por sensores hiperespectrais a curvas de referência, representativas do fenômeno de interesse. O algoritmo calcula a similaridade espectral por meio do ângulo formado entre um espectro teste (t) e um espectro de referência (r), tratando-os como vetores em um espaço de dimensionalidade correspondente ao número de bandas do sensor (nb). Segundo Kruse et al. (1993), o cálculo consiste em usar o arco cosseno do produto escalar dos espectros para determinar o ângulo θ :

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\left(\sum_{i=1}^{nb} t_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^{nb} r_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (9)$$

Os membros de referência de cada classe foram definidos pelos espectros médios, calculados a partir de conjuntos de dez curvas que representaram cada uma das três condições avaliadas. Para alvos de vegetação, na maioria das curvas espectrais, a região de interesse para classificação, pelo algoritmo *SAM*, compreende-se no intervalo espectral de 690 a 800 nm. Para este estudo, a classificação foi aplicada para o intervalo onde se insere a banda do vermelho limítrofe (680 a 730 nm – Figura 10).

Figura 10. Indicação da feição espectral do vermelho limítrofe na curva da vegetação.



Para analisar a relação entre os índices biofísicos da vegetação mensurados com as características espectrais para as amostras de cada uma das ocorrências, realizaram-se testes de correlação e construíram-se diagramas de dispersão, no software *Minitab*, entre índices hiperespectrais e os valores de TRC.

Na geração dos índices hiperespectrais, tratamentos específicos foram aplicados às curvas de FRHC, tais como a determinação da posição da borda do vermelho limítrofe (REPD - *Red Edge Position Determination*) (APAN et al. 2004; CHO et al., 2006) e o cálculo de índices hiperespectral NDVI (DAUGHTRY et al., 2000; HABOUDANE et al., 2002; LIU et al. 2010), normalmente usados para inferir algumas características biofísicas da vegetação, inclusive associadas a suas condições fitossanitárias.

A equação, proposta por Rouse et al. (1973) para o NDVI, baseia-se na alta absorção da clorofila na região espectral do vermelho e no espalhamento da REM na estrutura interna das folhas, no intervalo do infravermelho próximo. O valor pode saturar em coberturas vegetais densas com valores de IAF elevados, variando entre -1 e 1. Geralmente, em vegetações saudáveis, o índice apresenta valores em torno de 0,7 (JENSEN, 2009). A equação 10 apresenta a expressão do NDVI aplicada aos valores de FRHC medidos nos comprimentos de onda de 800 e 670 nm das curvas hiperespectrais:

$$\text{NDVI} = \frac{(\rho_{800} - \rho_{670})}{(\rho_{800} + \rho_{670})} \quad (10)$$

Segundo Jensen (2009), a Posição da Borda do Vermelho Limítrofe (REP), situada no intervalo espectral de 680 nm a 800 nm, é um importante indicador da quantidade clorofila

presente em uma folha. O conceito utilizado por este índice infere que, quanto mais próxima a REP estiver da região do visível, menores são os níveis de clorofila e nitrogênio do vegetal, tornando-se, assim, um indicador determinante da sua sanidade.

Nessa abordagem, aplicou-se o método linear de determinação da REP proposto por Clevers et al. (1994), descrito conforme:

$$REP = 700 + 40 \left[\frac{\frac{\rho(670nm) + \rho(780nm)}{2} - \rho(700nm)}{\rho(740nm) - \rho(700nm)} \right] \quad (11)$$

em que ρ refere-se ao comprimento de onda ao longo do espectro do FRHC.

Além disso, os valores do FRHC (medido diretamente sobre as folhas) foram utilizados na simulação de bandas do sensor RapidEye, a fim de selecionar os intervalos espectrais adequados para a separação da cultura entre os diferentes níveis de infecção.

Para simular o FRHC correspondente aos valores registados pelo sensor RapidEye para cada banda centrado no comprimento de onda de banda λ_i , foi utilizada a função de resposta espectral (SRF) para os canais do sensor RapidEye (STEIN, 1999), como dado abaixo (Equação 12).

$$R_{sim}(\lambda_i) = \frac{\sum_{\lambda} HCRF(\lambda) * SRF(\lambda)}{\sum_{\lambda} SRF(\lambda)} \quad (12)$$

Em que $R_{sim}(\lambda_i)$ é a reflectância simulada (a partir de FRHC) no comprimento de onda da banda λ_i e $SRF(\lambda)$ é a função de resposta espectral do sensor RapidEye. Os intervalos hiperespectrais considerados para simulação de bandas formam os mesmos das bandas espectrais RapidEye: 0,440-0,510 nm (azul); 0,520-0,590 nm (verde); 0,630-0,685 nm (vermelho); 0,690-0,730nm (vermelho limítrofe); 0,760-0,850 nm (infravermelho próximo).

Em adição às bandas espectrais originais, o potencial para a discriminação dos níveis de infecção foi avaliado pelo índice de vegetação NDVI (ROUSE et al., 1973). Esta métrica é normalmente usada para inferir sobre as características biofísicas da vegetação, incluindo as suas condições fitossanitárias (DAWGHTRY et al., 2000; HABOUDANE et al., 2002; LIU et al., 2010). O NDVI é expresso pela razão normalizada mostrado na Equação 13.

$$NDVI = \frac{R_{sim}(infravermelho\ próximo) - R_{sim}(vermelho)}{R_{sim}(infravermelho\ próximo) + R_{sim}(vermelho)} \quad (13)$$

Em que $R_{sim}(\text{vermelho})$ é a reflectância simulada na banda do vermelho e $R_{sim}(\text{infravermelho próximo})$ é a reflectância simulada da banda do infravermelho próximo.

4.2.3 Processamento e análise da imagem multiespectral RapidEye

A imagem multiespectral usada para mapear as áreas de café sadio e infectado por nematoides foi adquirida pela constelação de satélites RapidEye, em 13 de outubro de 2013, Essa imagem está disponível com resolução espacial de 6,5m, em um nível básico de correção geométrica e radiométrica e georreferenciada no sistema de referência WGS84.

Há uma diferença temporal de vinte dias entre a aquisição das imagens e as coleta das amostras foliares em campo. Neste estudo, no entanto, este período de tempo não tem influência sobre a integração de dados, pois o café é uma cultura perene, que mantém suas características biofísicas na mesma estação.

O processamento de imagem multiespectral RapidEye consistiu da correção atmosférica da cena, geração de uma imagem NDVI e aplicação de um método de classificação não-supervisionada de *pixels* agregados com atributos radiométricos semelhantes, que permitem a associação de grupos formados com as classes de informações de interesse: café sadio; início de infecção; severamente infectadas; solo exposto (estradas, ruas e carregadores não pavimentados).

A correção atmosférica foi necessária pelo fato da imagem RapidEye não incluir qualquer tipo de tratamento para minimizar os efeitos de absorção e espalhamento atmosféricos da radiação eletromagnética. Foi realizada no software ENVI (Ambiente para a visualização de imagens), utilizando a ferramenta de correção FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric of Hypercubes*) (ADLER-GOLDEN et al., 1999). O FLAASH é baseado no modelo de transferência radiativa e, portanto, considera que a radiação detectada pelo sensor é função da reflectância de *pixels* e os seus arredores, do albedo hemisférico nadiral, da transmitância e da geometria de aquisição (ENVI, 2009). Ele é baseado no código MODTRAN4, que solicita a definição prévia do modelo de aerossol, a localização geográfica, a altitude, altitude do satélite, data e hora da aquisição, além de outros parâmetros atmosféricos (como a concentração de CO₂).

Alguns dos parâmetros necessários para a aplicação do *FLAASH* foram extraídos do arquivo de imagem (metadados) RapidEye. A concentração de vapor de água foi obtida a partir do produto MOD07-L2 MODIS/Terra, cuja aquisição foi coincidente com a imagem. As especificações do modelo de aerossol (tropical) e outras variáveis seguiram as recomendações da FELDE et al. (2003) e ADLER-GOLDEN et al. (1999).

Os atributos de *pixels* da imagem corrigida atmosféricamente representam a reflectância da superfície (R_{sup}). Assim, a R_{sup} foi extraída a partir de cada banda da imagem RapidEye, nas mesmas posições dos elementos das amostras georreferenciados, e relacionada com a reflectância simulada (R_{sim}) obtida a partir de FRHC para essas bandas, assim como para o índice NDVI, por meio de diagramas que mostram a variação da reflectância do cafeeiro sadio e infectado. Esses gráficos permitiram verificar a capacidade de discriminação de bandas espectrais e NDVI e identificar os dados de entrada mais apropriados para a classificação da imagem.

No intuito de analisar a significância entre os dados simulados (R_{sim}) e reflectância da imagem (R_{sup}), foram realizados testes de hipóteses *t-Student* (t) e o *Fisher-Snedecor* (F). Segundo Hair (2009), a partir dos testes t e F é possível verificar a igualdade entre as médias e as variâncias entre dois conjuntos independentes, respectivamente. Nas Equações 14 e 15, são apresentados os modelos para o cálculo do teste t e do teste F , respectivamente.

$$t = \frac{\mu_1 + \mu_2}{\sqrt{S_p^2 * (\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2})}} \quad (14)$$

Em que μ_1 e μ_2 representam a média das amostras de observação e de referência, respectivamente, S_p o valor médio entre as variâncias das amostras, N_1 e N_2 o número de elementos de cada uma das amostras.

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (15)$$

Em que S_1^2 e S_2^2 representam a variância das amostras de observação e de referência, respectivamente.

Os testes de hipóteses foram aplicados separadamente para cada intervalo multiespectral, considerando-se 30 amostras por banda e um nível de significância de 0,05. As hipóteses nula e alternativa foram, em cada teste, foram definidas por.

- Teste t :

H_0 : Média da $R_{sim} =$ Média de R_{sup}

H_1 : Média da $R_{sim} \neq$ Média de R_{sup}

- Teste F :

H_0 : Variância da $R_{sim} =$ Variância de R_{sup}

H_1 : Variância da $R_{sim} \neq$ Variância de R_{sup}

Finalmente, as bandas espectrais da imagem RapidEye e os índices que melhor discriminaram os níveis de infestação, constituíram os dados de entrada de uma classificação não supervisionada. O algoritmo de classificação utilizado foi o ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*), que consiste em agrupar vetores de pixels com significativa semelhança espectral usando a técnica da distância mínima. Neste estudo, foi adotado um limite de alteração de 10% para terminar o processo iterativo. Os agrupamentos formados foram atribuídos ou fundidos em classes que representam: café sadio, infecção inicial, severamente infectada e solo exposto.

A fim de avaliar a confiabilidade das áreas do mapa infectadas por nematoides, a acurácia da classificação foi avaliada pela matriz de confusão e o coeficiente de estatística kappa (CONGALTON E GREEN, 1999). Para esta análise, foi considerada a posição geográfica de 145 pontos de amostragem no terreno, cuja distribuição espacial na área de estudo é mostrada na Figura 7C.

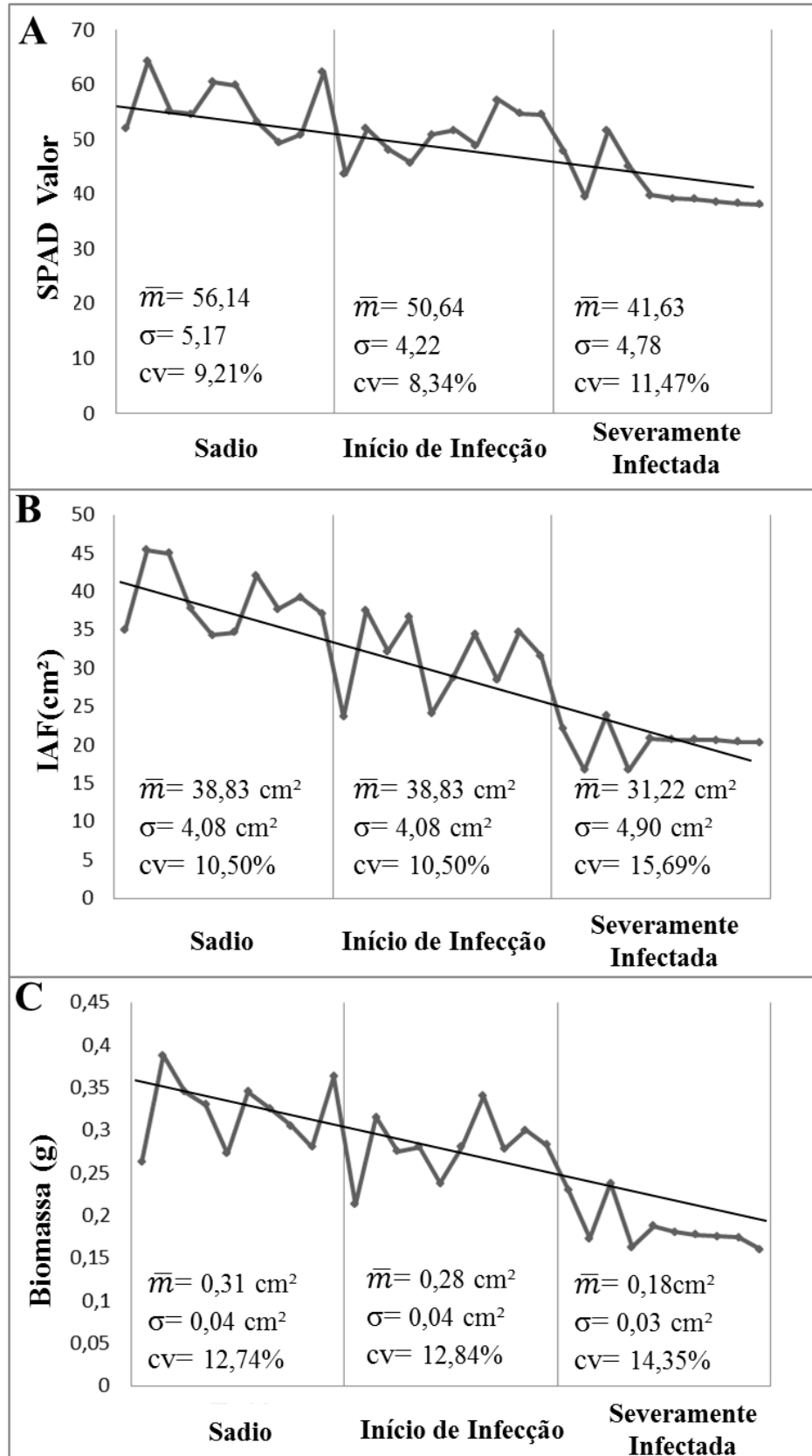
4.3 Resultados e discussões

4.3.1 Características biofísicas de folhas sadias e infectadas por nematoides

Mudanças no TRC, IAF e biomassa são características de vários tipos de estresse na vegetação (JONES E WAUGAHN, 2010). Assim, a fim de verificar se esses índices biofísicos podem discriminar folhas coletadas do café sadio dos infectados, o valor médio

obtido a partir de 10 repetições medidos em cada unidade amostral é indicado em gráficos de leitura do índice SPAD, IAF e biomassa (Figura 11).

Figura 11. Variabilidade e linha de tendência dos indicadores biofísicos registrados para as folhas de café sadio, início de infecção e severamente infectada. (A) Leituras do índice SPAD. (B) Índice de Área Foliar - IAF em cm². (C) Biomassa em gramas. Para cada condição de planta, \bar{m} é a média da amostra, σ é o desvio padrão e CV é o coeficiente de variação.



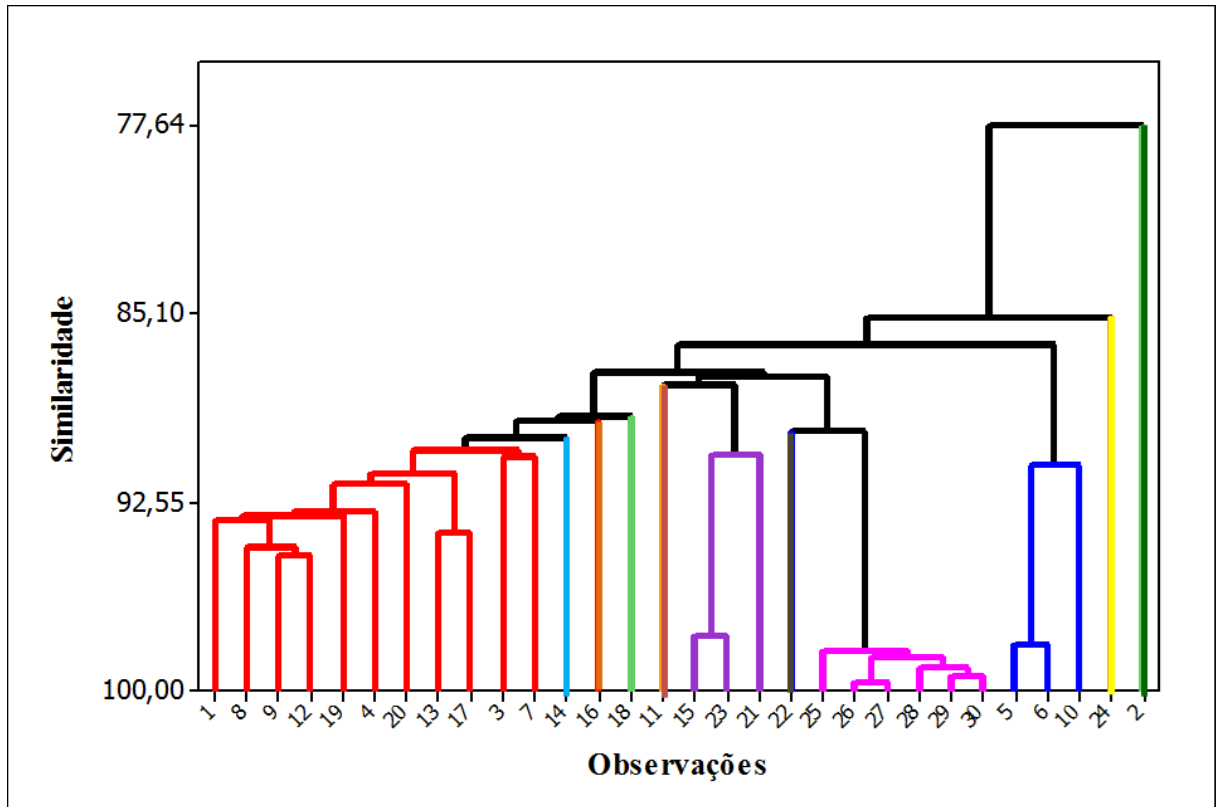
Para os três índices ocorrem uma variabilidade perceptível nos valores medidos para as mesmas condições fitossanitárias, especialmente para o café sadio e infecção inicial. A variação entre as condições fitossanitárias, no entanto, não é tão perceptível, apesar da diminuição sutil observada entre as medidas obtidas no café sadio e severamente infectado. Este comportamento é verificado nos gráficos de IAF (Figura 11B) e biomassa (Figura 11C), onde se observa a diminuição das suas médias. As leituras do *SPAD* resultaram nas medidas mais homogêneas entre as três condições e índices avaliados.

A linha de tendência aponta a correlação negativa entre alguns parâmetros biofísicos, particularmente IAF e biomassa, em plantas de café infectadas com nematoides e outros parasitas confirmam as observações de Usha et al. (2013). No entanto, mesmo com a indicação de diferenças sutis entre as três condições de cafeeiros avaliados, nenhum dos parâmetros agronômicos considerados discrimina, de forma eficiente, as amostras de café sadio e em infecção inicial.

Em relação à normalidade dos valores obtidos para os três parâmetros agronômicos, o teste de normalidade Anderson-Darling aceitou a hipótese alternativa (H1), ou seja, em nenhum dos conjuntos amostrais as distribuições das medidas tem o comportamento normal.

Considerando-se que os elementos amostrais adquiridos para o cafeeiro sadio foram identificados pelos números de 1 a 10, aqueles referentes ao café estágio inicial de infecção por nematoides de 11 a 20 e o café severamente infectado de 21 a 30, o dendrograma apresentado na Figura 12 mostra os grupos formados a partir de uma análise de agrupamento dos dados biofísicos.

Figura 12. Dendrograma resultante da análise de agrupamento realizada a partir dos dados biofísicos.

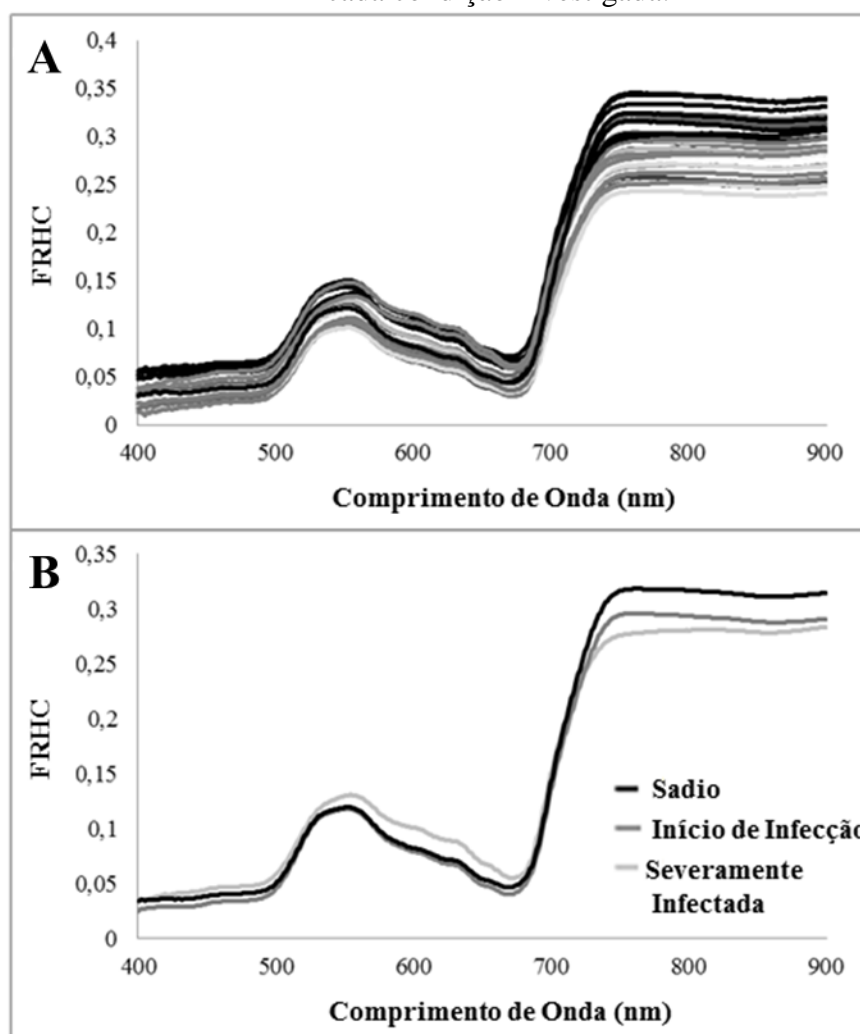


A partir do dendrograma, observa-se a formação de doze grupos, sete a mais do que as condições fitossanitárias avaliadas. A análise dos grupos formados também não permitiu discriminar corretamente as classes de interesse pré-definidas. O que se verifica é uma distribuição não homogênea de observações entre os grupos formados, pois a maioria das plantas foi agrupada em uma única classe, composta por plantas saudias e em início de infecção.

4.3.2 Caracterização espectral de folhas saudias e infectadas por nematoides

A Figura 13 mostra as curvas de FRHC obtidas para cada elemento da amostra medida em condições controladas (Figura 13A) e as curvas médias para cada uma das três condições fitossanitárias (Figura 13B).

Figura 13. Curvas FRHC obtidas a partir de folhas de café sadio, em início de infecção e severamente infectados, considerando: (A) toda a amostra (10 curvas por condição); e (B) cada condição investigada.



A forma geral das curvas do espectro visível indica que as plantas do café sadio e início de infecção têm bandas de absorção clássica de clorofila. Estas absorções são discerníveis mesmo em folhas gravemente infectados. Porém, esta condição define sutilmente maiores valores de média de FRHC no espectro visível, em particular entre 550 e 680nm. Este comportamento espectral é consistente com um nível avançado de infecção da cultura devido ao comprometimento da estrutura das folhas, que se tornam cloróticas e amareladas. Os sintomas, tais como amarelecimento e murcha das folhas, são a base para a detecção por sensoriamento remoto deste tipo de manifestação de doenças, aumentando a sua resposta espectral em comprimentos de onda do vermelho (620 e 720 nm).

Na região do infravermelho próximo (720-1000 nm), é perceptível a diferença na intensidade de refletância das folhas de plantas saudáveis e severamente infectadas. A maior discrepância entre eles é discernível em comprimentos de onda entre 750-900 nm. No entanto,

à medida que se aproximava de 900 nm, observa-se que a diferença, na resposta espectral das folhas em início de infecção e severamente infectadas, começa a diminuir gradualmente.

Assim como em ZHANG et al. (2003), que utilizaram dados hiperespectrais para detecção de agentes patogénicos no tomate, a região espectral mais adequada para discriminar plantas saudáveis e infectadas foi de infravermelho próximo, já que plantas em condição de estresse sofrem alterações na sua estrutura interna da folha.

A curva espectral obtida a partir de folhas de café severamente infectadas por nematoides mantém um padrão característico de plantas sob forte estresse. Essa condição é diagnosticada por variações nos mecanismos de absorção e dispersão da radiação electromagnética incidente no visível (vermelho) e infravermelho próximo (APAN et al., 2004; HILLNHÜNTER et al. 2011; USHA et al. 2013), resultado da diminuição na clorofila e alterações na estrutura interna das folhas (JENSEN, 2009).

4.3.3 Classificação das curvas espectrais pelo mapeamento por ângulo espectral

A associação das curvas espectrais obtidas, a partir das trinta plantas identificadas nas quatro condições fitossanitárias, a um dos membros de referencia (curvas médias calculadas para plantas saudáveis, início de infecção e severamente infectadas), por meio da classificação supervisionada pelo SAM, resultou na associação correta de nove curvas espectrais a plantas sadias. Porém, alguns equívocos ocorreram na atribuição das demais curvas às respectivas classes definidas para os três níveis de infecção por nematoides considerados.

Para expressar os erros e concordâncias no processo de classificação pelo SAM, no contexto deste estudo, elaborou-se a matriz de confusão mostrada na Tabela 2. As colunas da matriz expressam o resultado da classificação, enquanto que as linhas indicam o estado de infecção da planta por ocasião da tomada dos dados espectrorradiométricos.

Tabela 2. Matriz de classificação das curvas espectrais

	Sadio	Início de infecção	Severamente infectada
Sadio	9	1	-
Início de infecção	1	6	3
Severamente infectada	-	3	7

A classe que teve o maior número curvas corretamente classificada após o processo de classificação foi à classe do cafeeiro sadio. Esse resultado mostra-se, em termos, conveniente,

uma vez que, para o intervalo espectral classificado, o comportamento da vegetação sadia se difere das demais condições.

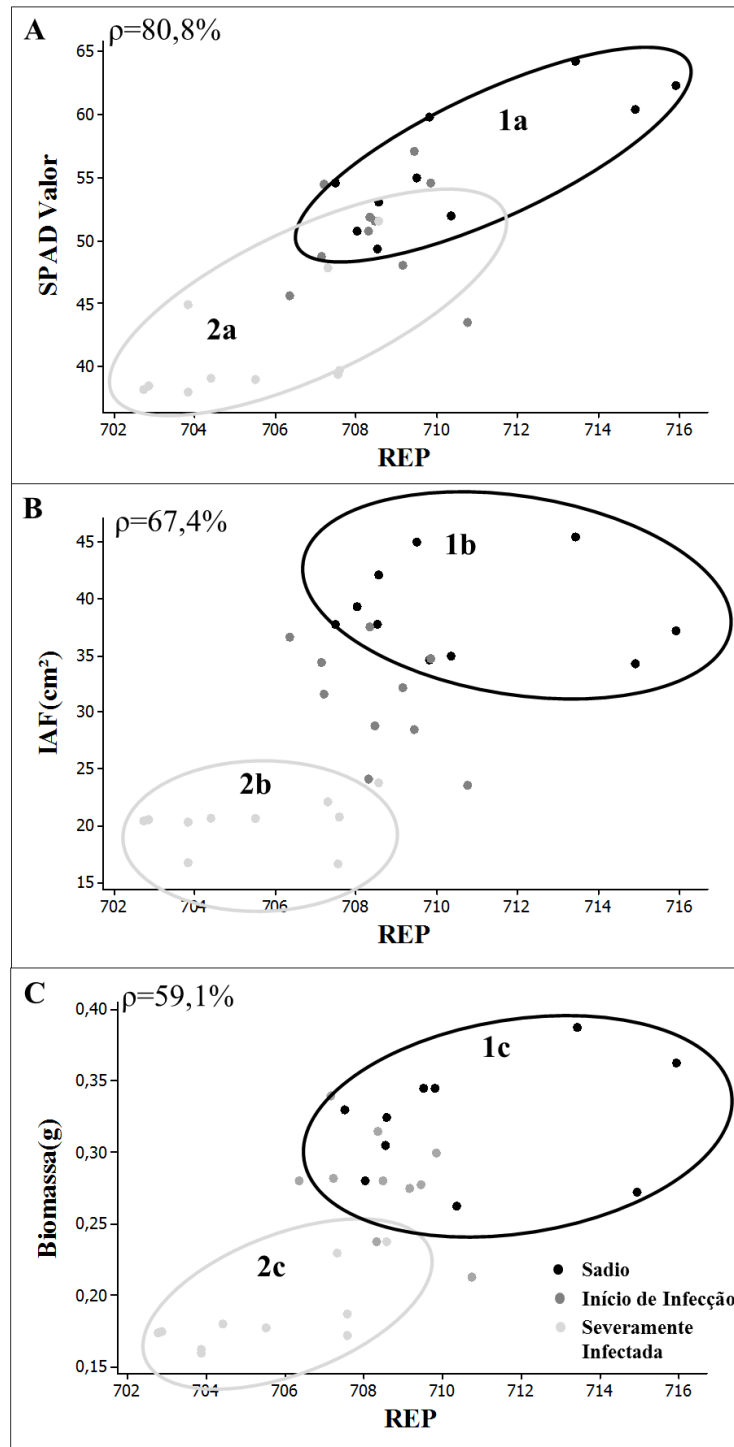
Para as classes de início de infecção e severamente infectada, seis de sete curvas foram corretamente classificadas, respectivamente. Nota-se que, dentre as três classes, houve uma troca de curvas, sendo mais expressiva entre as classes início de infecção e severamente infectada. Neste caso, corrobora-se que também há margem para confusão visual em campo entre os níveis de infecção, no processo de separação de amostras para as medidas radiométricas.

Outra hipótese, que ratifica os resultados desta classificação, é que, em uma mesma planta com alta infecção, possa haver folhas que estejam em condições nutricionais similares à vegetação com infecção moderada e muito infectada.

4.3.4 Relação entre índices hiperespectrais e os dados biofísicos

A Figura 14 apresenta os diagramas de dispersão e a correlação entre os valores calculados do índice REP (X) e os parâmetros agrônômicos (Y) calculados para cada uma das ocorrências.

Figura 14. Diagrama de dispersão e correlação entre o índice REP o TRC (A), IAF(B) e Biomassa (C).



Ao analisar os gráficos das Figuras 14A, 14B e 14C, nota-se que os valores da REP, para as amostras para a vegetação sadia, encontram-se mais próximos da região do infravermelho próximo quando comparadas com vegetação severamente infectada, o que,

conforme Clevers et al. (1994), indica uma condição característica da vegetação que apresenta maiores níveis de clorofila foliar. Essa mesma condição também foi verificada para outras culturas infectadas por nematoides, conforme Hillnhütter et al. (2011) e Martins (2013), os quais verificaram menores índices de clorofila para batata doce e cana-de-açúcar, respectivamente.

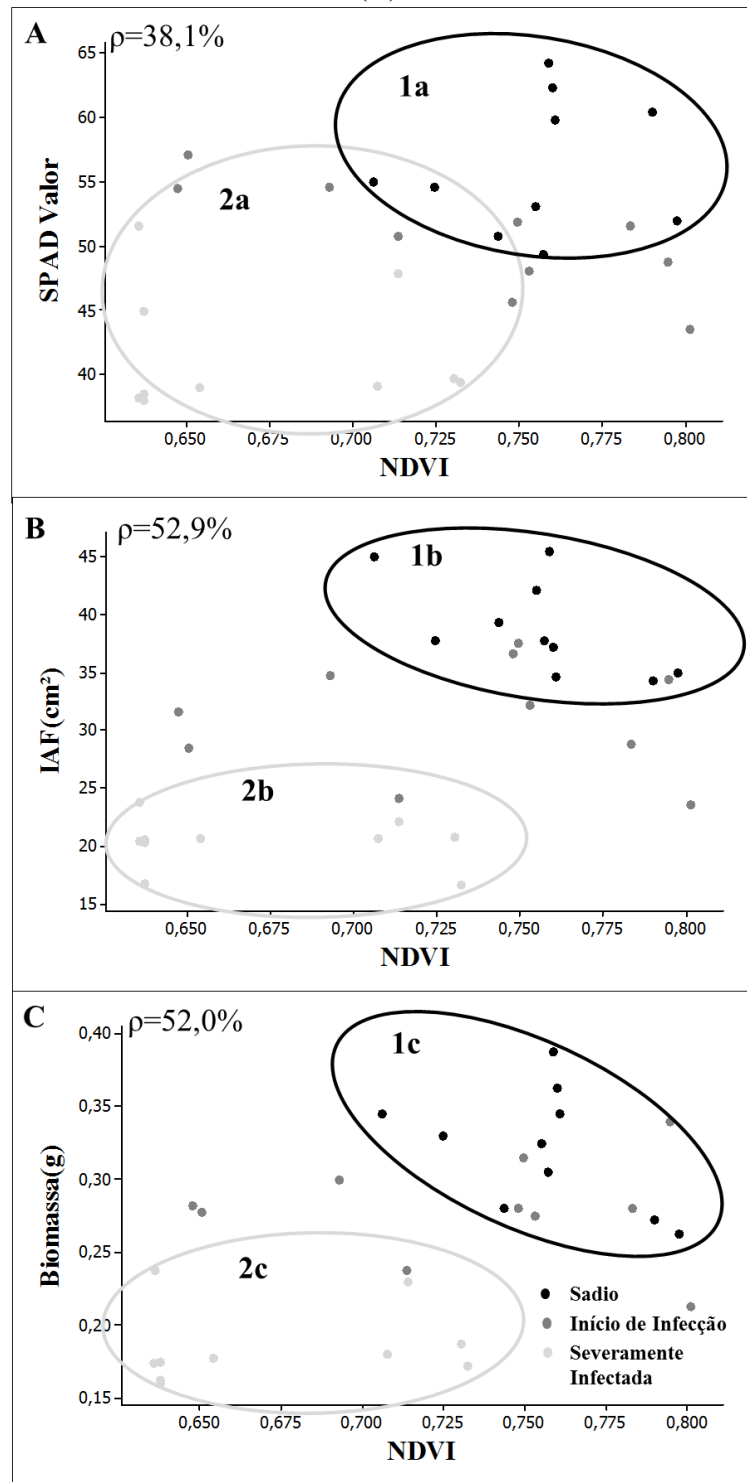
O parâmetro agrônômico que apresentou maior correlação com a REP foi o TRC (80,8%), seguida do IAF (67,4%) e da biomassa (59,1%). A alta correlação entre a REP e o teor de clorofila justifica-se pelo fato da REP ter sido desenvolvida, justamente, com intuito de se estimar o nível de clorofila na vegetação (CLEVERS et al., 1994). Dessa forma, corrobora-se que a REP, nesta aplicação, é um índice sensível ao teor de clorofila do cafeeiro sadio e infectado por nematoides e que as leituras efetuadas com o clorofilômetro estimam adequadamente o teor relativo de clorofila na folha. Já os demais parâmetros apresentaram baixa correlação por não influenciarem diretamente nos valores específicos de reflectância utilizados para calcular a REP, além do fato de não serem variáveis correlacionadas com quantidade de clorofila em uma folha.

Quanto à discriminação das classes a partir da associação entre o índice REP e os parâmetros IAF e Biomassa, nos gráficos das Figuras 14A, 14B e 14C, observa-se a nítida formação de dois grupos: “sadio”, em **1a**, **1b** e **1c**; e “severamente infectada”, em **2a**, **2b** e **2c**.

A partir destas relações, consta-se que o índice REP consegue discriminar, relativamente, apenas as plantas sadias das severamente infectadas, as quais que, em todas as relações, se confundem com a classe de infecção intermediária.

A Figura 15 apresenta os diagramas de dispersão e a correlação entre os valores advindos do índice NDVI (X) e os parâmetros agrônômicos (Y) calculados para cada uma das ocorrências.

Figura 15. Diagrama de dispersão e correlação entre o índice NDVI (A), IAF (B) e Biomassa (C).



A análise dos dados constatou que, em geral, o índice NDVI propiciou maiores valores para a vegetação que apresentou menores índices de infecção. A mesma relação foi observada em Santos Júnior et al. (2002), Marchiorato (2008), Hillnhütter et al. (2011) e Martins (2013),

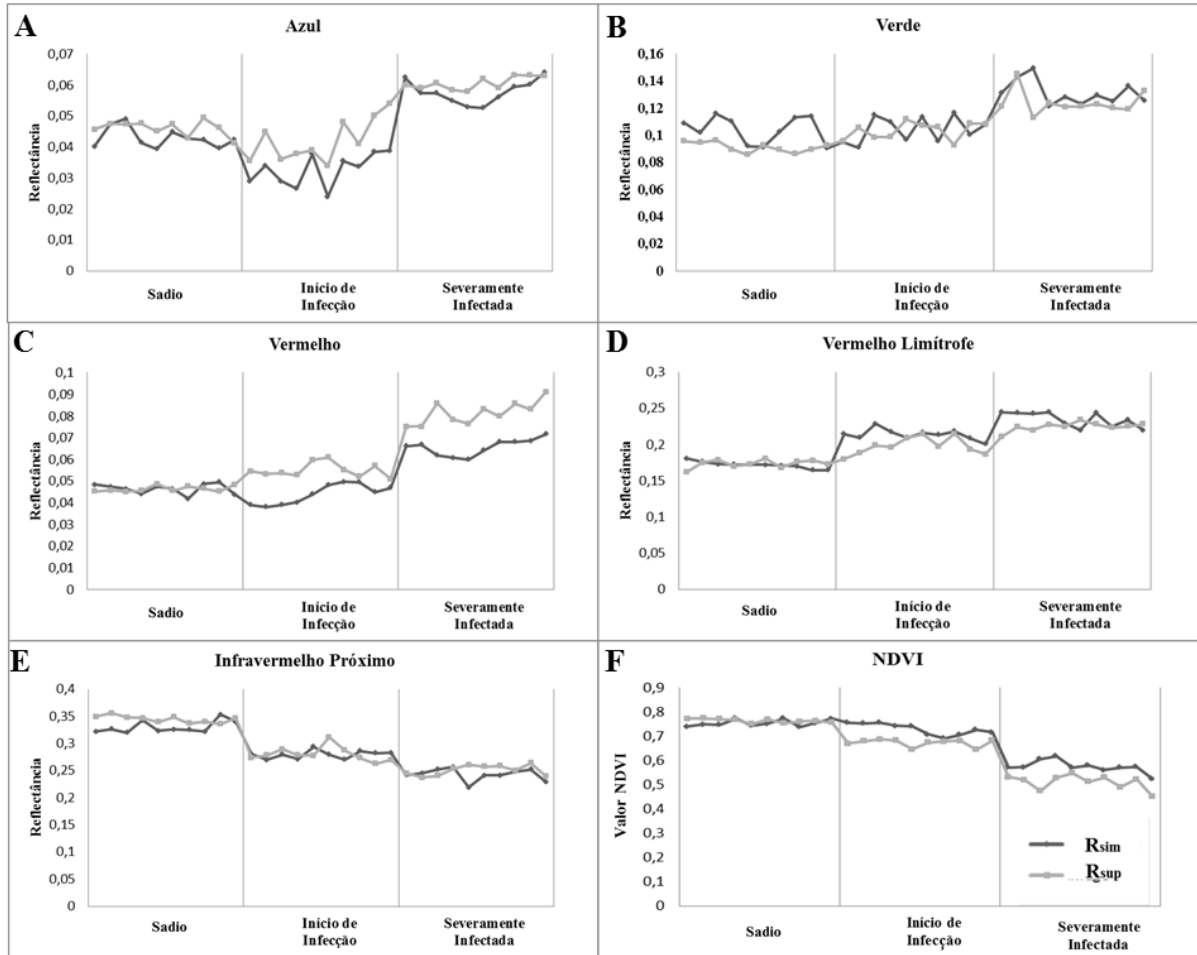
para outras culturas infectadas por nematoides, tais como a soja, o algodão, a batata doce e a cana-de-açúcar, respectivamente.

A relação entre o NDVI e os três parâmetros agronômicos, praticamente, não apresentou uma correlação significativa, sendo a maior evidenciada entre o NDVI e o IAF (52,9%). Assim, como nas relações entre o índice REP e os parâmetros agronômicos, as combinações com o índice NDVI somente conseguiram discriminar as plantas sadias (Figura 15, **1a**, **1b** e **1c**) das severamente infectada (Figura 15, **2a**, **2b** e **2c**).

4.3.5 Discriminação entre o café sadio e infectado a partir de dados hiperespectrais simulados e bandas espectrais RapidEye

As bandas espectrais do sensor RapidEye foram simuladas a partir das curvas de FRHC medidas nas folhas, enquanto que as bandas da imagem foram submetidas a correção atmosférica, produzindo valores de reflectância simulada (R_{sim}) e de superfície (R_{sup}), respectivamente. A Figura 16 mostra a variação entre os valores da reflectância de superfície simulada e reflectância extraída de *pixels* correspondentes em cada banda RapidEye.

Figura 16. FRHC simulado (R_{sim}) e reflectância de superfície (R_{sup}) obtida a partir de bandas espectrais de imagem RapidEye de: (A) azul - 440-510nm; (B) verde - 520-590nm; (C) vermelho - 630-685nm; (D) borda vermelha - 690-730nm; (E) infravermelho próximo - 760-850nm; e (F) valores de NDVI.



Em geral, os gráficos da na Figura 16, mostram um comportamento similar para os valores FRHC simulados (R_{sim}) e reflectância de superfície (R_{sup}), obtido diretamente da imagem multiespectral atmosféricamente corrigida. Essa percepção é mais evidente nas bandas espectrais do vermelho limítrofe (Figura 16D) e do infravermelho próximo (Figura 16E). As bandas do Azul (Figura 16A) e do verde (Figura 16B) apresentam uma maior variabilidade na R_{sim} . Porém, uma pequena discrepância entre esses valores de reflectância impede a separação entre o café sadio e o infectado. A banda espectral do vermelho (Figura 16C), no entanto, mostra uma diferença mais pronunciada e um claro aumento na amplitude de reflectância do café severamente infectado, especialmente em valores extraídos a partir da imagem.

A adequação do espectro visível para a detecção de doenças em colheitas agrícolas, tal como ferrugem da folha, é recorrente em trabalhos de detecção remota (APAN et al., 2004).

No caso de parasitas de raízes, tais como os nematoides, a discriminação nos comprimentos de onda visíveis ocorre quando a infecção se torna mais severa, isto é, quando as folhas passam a ter aspecto clorótico.

As bandas espectrais do vermelho limítrofe e do infravermelho próximo foram identificados como ideal para a discriminação de insetos em cultura (ADELABU et al., 2014) e outros patógenos (USHA et al., 2013). No entanto, as grandes discrepâncias entre as refletâncias médias calculadas (R_{sim} e R_{sup}) entre o café sadio, em início de infecção e severamente infectado, foram registradas nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo, bem como no índice NDVI. Para resumir essas observações, a Tabela 3 apresenta a média e o desvio padrão calculado a partir dos elementos da amostra do café sadio, inicial e severamente infectada, para intervalos espectrais das bandas originais RapidEye e o índice NDVI.

Tabela 3. Média amostral e desvio padrão do R_{sim} e R_{sup} do café sadio, em início de infecção e severamente infectado. (R_{sim} : FRHC simulado; reflectância da superfície extraído a partir da imagem corrigida; R_{sup} \bar{m} : média da amostra; s : desvio padrão; A, B, C, D, E, F: designação das regiões espectrais coincidentes com as bandas RapidEye).

Bandas/ NDVI	Estatística descritiva	Sadio		Início de Infecção		Severamente Infectada	
		R_{sim}	R_{sup}	R_{sim}	R_{sup}	R_{sim}	R_{sup}
Azul (A)	\bar{m}	0.042	0.046	0.032	0.042	0.057	0.060
	s	0.003	0.002	0.005	0.007	0.004	0.002
Verde (B)	\bar{m}	0.104	0.091	0.104	0.103	0.131	0.124
	s	0.010	0.004	0.009	0.006	0.009	0.009
Vermelho (C)	\bar{m}	0.046	0.046	0.044	0.054	0.065	0.081
	s	0.002	0.001	0.004	0.003	0.003	0.005
Vermelho limítrofe (D)	\bar{m}	0.171	0.173	0.213	0.198	0.235	0.224
	s	0.005	0.006	0.007	0.012	0.010	0.006
IVP (E)	\bar{m}	0.330	0.344	0.279	0.280	0.242	0.250
	s	0.011	0.006	0.007	0.013	0.011	0.009
NDVI (F)	\bar{m}	0.754	0.763	0.729	0.672	0.574	0.510
	s	0.013	0.008	0.023	0.015	0.025	0.029

As maiores discrepâncias entre o café sadio e infectado ocorrem, em média, entre as regiões espectrais do vermelho (C) e infravermelho próximo (E), em proporções diferentes, mas consistente com o padrão observado nas curvas de reflectância. As R_{sim} e R_{sup} médias calculadas para o café, em início de infecção e severamente infectado, são diferentes no intervalo espectral do vermelho (C), apresentando uma média mais elevada na R_{sup} .

No intervalo do vermelho, no nível foliar, a resposta simulada é menor devido à atividade fotossintética, enquanto que os maiores valores para a reflectância da superfície, extraída da imagem inclui a resposta espectral do solo exposto, do tipo Latossolo Vermelho Argiloso, supostamente com presença do óxido de ferro. A diferença, no nível de aquisição de

medições, também é responsável pela maior R_{sup} , capturada por um sensor orbital em relação à menor R_{sim} , capturada por radiometria de campo para esta banda de ocorrência.

Como esperado, na vegetação sadio, a R_{sim} e a R_{sup} , no infravermelho próximo (E), são maiores do que no café em início de infecção e severamente infectado. No vermelho limítrofe (D), embora a R_{sup} tenha um elevado desvio padrão, os valores médios de R_{sim} e de R_{sup} , para o café na fase de início de infecção, são ligeiramente diferentes das outras duas ocorrências, fato que somente é perceptível nesta banda.

Os intervalos espectrais do vermelho, vermelho limítrofe e infravermelho próximo foram complementares para a discriminação de café sadio e os dois níveis de infecção (Figura 16 e Tabela 3). O NDVI apresentou as maiores diferenças entre o café em início de infecção e severamente infectado, especialmente para dados R_{sup} .

Na Tabela 4, são apresentados os resultados dos testes de hipóteses t na análise da similaridade entre os valores de R_{sim} e R_{sup} , para as condições de planta sadia, início de infecção e severamente infectada.

Tabela 4. Análise de similaridade, por meio dos testes t e F, dos R_{sim} e R_{sup} do café sadio, em início de infecção e severamente infectado.

Banda/NDVI		sadio	Infecção Inicial	Severamente Infectada
Azul	<i>t</i>	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0
	<i>F</i>	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0
Verde	<i>t</i>	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0
	<i>F</i>	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0
Vermelho	<i>t</i>	Aceita-se H_0	Aceita-se H_1	Aceita-se H_1
	<i>F</i>	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0	Aceita-se H_1
Vermelho Limítrofe	<i>t</i>	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0
	<i>F</i>	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0
Infravermelho Próximo	<i>t</i>	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0
	<i>F</i>	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0
NDVI	<i>t</i>	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0	Aceita-se H_0
	<i>F</i>	Aceita-se H_0	Aceita-se H_1	Aceita-se H_0

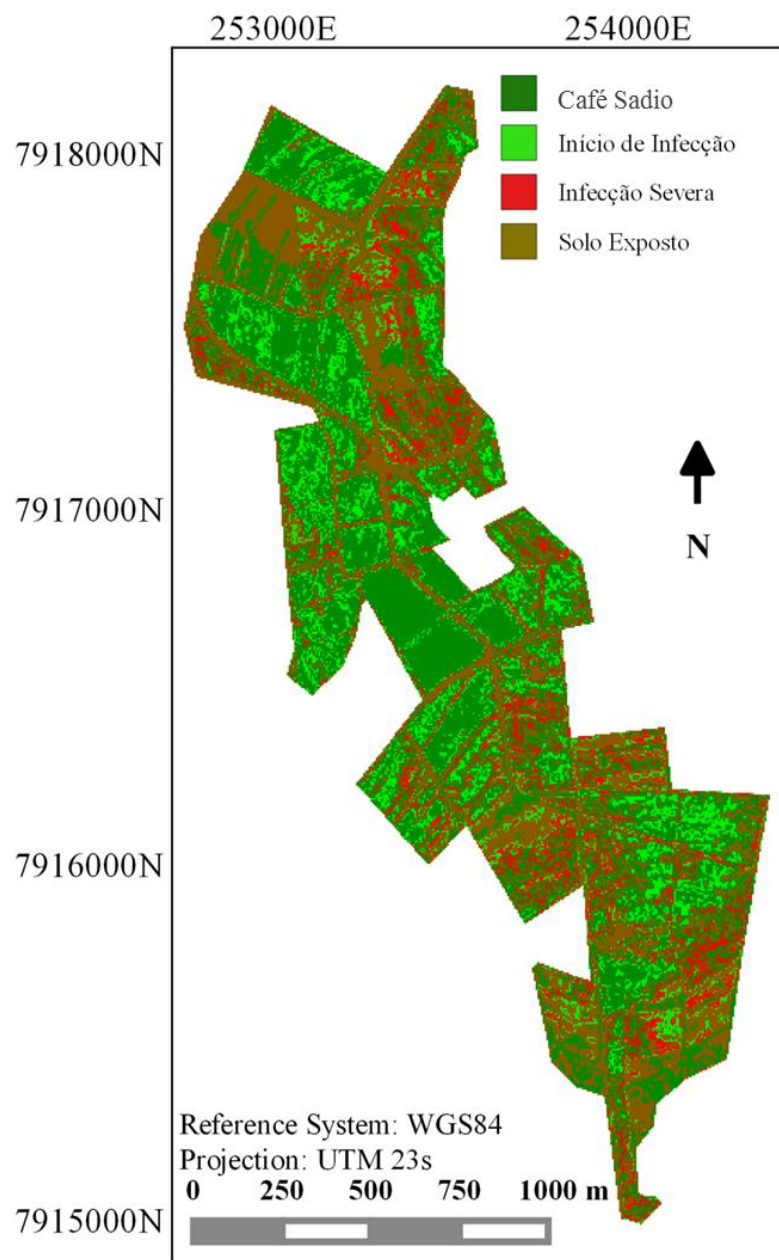
Por meio da análise estatística do teste t, verificou-se que os valores médios de R_{sim} e de R_{sup} obtidos para todos os tipos de ocorrência foram significativamente semelhantes ao longo de todo espectro, com exceção da banda do vermelho nas condições início de infecção e severamente infectada.

No mesmo sentido, a partir do teste *F*, foi constatado que, para este conjunto de amostras, com exceção do vermelho na condição de severamente infectada e do NDVI para o caso início de infecção, as variáveis físicas medidas variam em uma mesma proporção.

4.3.6 Dispersão espacial de nematoides na área experimental 1

O mapa temático produzido pela classificação não supervisionada e os agrupamentos subsequentes rotulados como café sadio, início de infecção e infecção severa, bem como áreas com solo exposto, é mostrado na Figura 17.

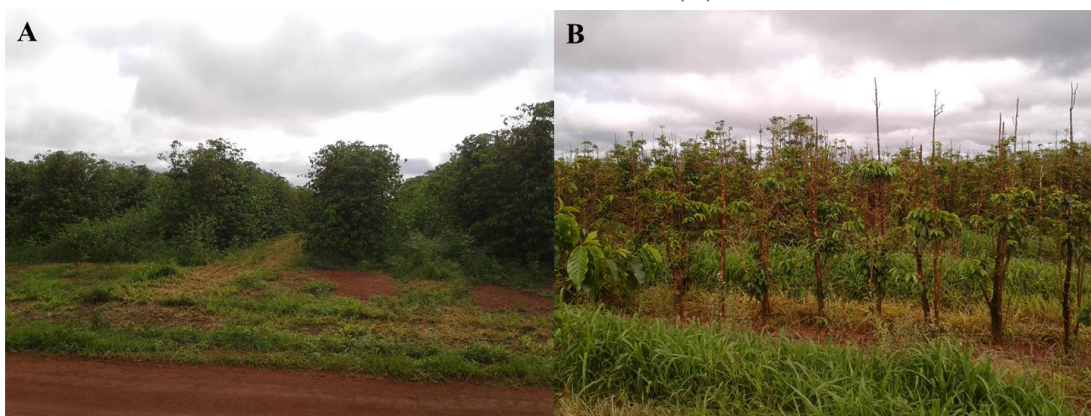
Figura 17. Distribuição espacial de café sadio, em início de infecção e severamente infectado na área de estudo, obtido pela classificação não-supervisionada da imagem NDVI e as bandas multiespectrais do sensor RapidEye: vermelho, vermelho limítrofe e infravermelho próximo.



A dispersão de café em início de infecção estende-se por quase toda a área de estudo, exceto em dois talhões centrais. O padrão característico de pequenas clareiras, ao longo das linhas de plantação, associadas com as culturas agrícolas instalados em áreas infectadas por nematoides (ABAWÉ; CHEN, 1998), nem sempre é observado nesta classe.

A dispersão da classe severamente infectada nessa área de experimental é menor do que a classe anterior (início de infecção), concentrando-se na porção nordeste e no centro e sul da área de estudo. Por outro lado, o café severamente infectado por nematoides pode apresentar uma redução significativa na área foliar e sua resposta espectral se confundir com a resposta da cultura submetida a outros estresses ambientais, como a seca, deficiência de nutrientes, salinidade e outros estresses bióticos (JONES; VAUGHAN, 2010). Outra evidência, nas áreas mapeadas como severamente infectada por nematoides, é a presença maciça de solo exposto, o que se torna notável após o desfolhamento da cultura (Figura 18).

Figura 18. Cafeeiro sadio na área de estudo (A). Presença de solo exposto no cafeeiro severamente infectado (B).



A Tabela 5 mostra a coincidência espacial obtida comparando 145 pontos amostrais georreferenciados observados *in situ* (Figura 7C) e sua rotulação como café sadio, em início de infecção e severamente infectado por nematoides, além das áreas com solo exposto, indicado no mapa temático da Figura 17. Na matriz de confusão desenvolvida, as linhas representam os elementos atribuídos a classes, no processo de classificação, e as colunas correspondem à verdade terrestre. A última linha mostra os erros de omissão por categoria (complementares à precisão do produtor), enquanto na última coluna são apresentados os erros de comissão (complementares à precisão do usuário).

Tabela 5. Matriz de confusão e erros de omissão e comissão da classificação da imagem RapidEye (experimento 1)

		Verdade Terrestre				Total.	Erro de comissão (%)
		Sadio	Início de infecção	Severamente infectada	Solo exposto		
Classificação	Sadio	41	5	1	-	47	12,76
	Início de infecção	4	33	5	-	42	21,43
	Severamente infectada	-	7	15	-	22	31,82
	Solo exposto	-	-	9	25	34	26,47
	Total	45	45	30	25	145	
	Erro de omissão (%)	8,89	26,67	50	-		

O índice de exatidão global foi de 78,62%, e o coeficiente kappa foi de 0,71.

Os resultados da classificação foram comparados com pontos georreferenciados verificados no campo (Figura 7C), que determinam uma exatidão global de 78,62% e índice kappa de 0,71, indicando um bom grau de precisão. A acurácia do produtor da classe de café severamente infectada (50%) foi o resultado mais crítico, uma vez que esta classe incluiu vários dos seus postos de controle em áreas de solo exposto (30%) e em início de infecção de infecção (16,67%). A confusão com áreas de solo exposto (presença de solo exposto) é de, alguma forma, uma consequência natural dos níveis muito elevados de infecção que normalmente leva à morte da planta e o aparecimento de clareiras sem vegetação no meio da cultura.

A classe início de infecção (acurácia do produtor de 73,33%) foi, em alguns resultados, confundida com café sadio e apresentou um erro de omissão de 26,67%, o que confirma a natureza intermediária desta classe. As classes café sadio e solo exposto resultaram em uma alta acurácia de produção, respectivamente com 91,11% e 100%.

A acurácia do usuário da classe café sadio foi maior do que 87%, cujo erro de comissão (12,76%) resultou da inclusão de elementos da amostra de classe do café em início de infecção. Os maiores erros foram causados por confusão entre as classes vizinhas (início de infecção e severamente infectada), que é uma ocorrência esperada na classificação.

Considerando o elevado custo e grau de incerteza da detecção convencional de parasitas do solo, uma indicação da distribuição espacial das áreas infectadas por nematoides já é uma informação relevante no contexto de agricultura de precisão. Além disso, para uma cultura perene, como o café, e um parasita de baixa mobilidade no solo, cuja gestão não

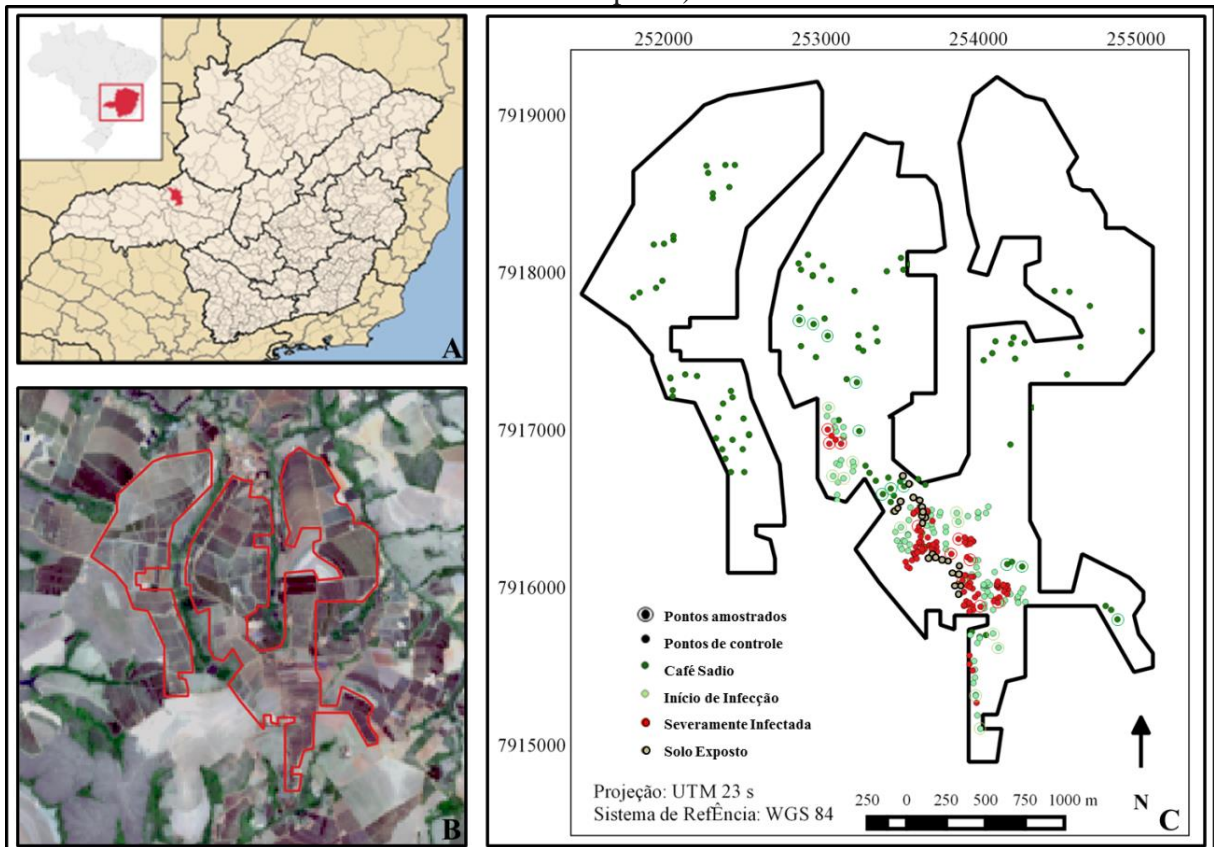
implica a intervenção pontual na planta infectada, os níveis de precisão alcançados foram adequados.

5. EXPERIMENTO 2: ANÁLISE DE DADOS HIPERESPECTRAIS ADQUIRIDOS SOBRE O DOSEL E DA DETECÇÃO DE NÍVEIS DE INFECCÃO EM IMAGENS OLI/LANDSAT 8

5.1 Área experimental 2

O segundo experimento foi desenvolvido na mesma região em que foi realizado o experimento 1, porém, considerou-se um maior número de talhões, estendendo-se a área experimento 2 para aproximadamente 6000 ha, conforme apresentado na Tabela 1. Para a inserção da área experimental 2 no contexto estadual apresenta-se, na Figura 19A, o município de Monte Carmelo inserido no estado de Minas Gerais, e a delimitação das parcelas de cultura do café que definiram essa área experimental sobre uma composição colorida OLI/Landsat 8 (RGB em composição colorida normal), na Figura 19B. A distribuição espacial dos pontos em que foram realizadas as medições espectrorradiométricas e levantado os elementos amostrais usados na avaliação acurácia da classificação estão indicados na Figura 19C.

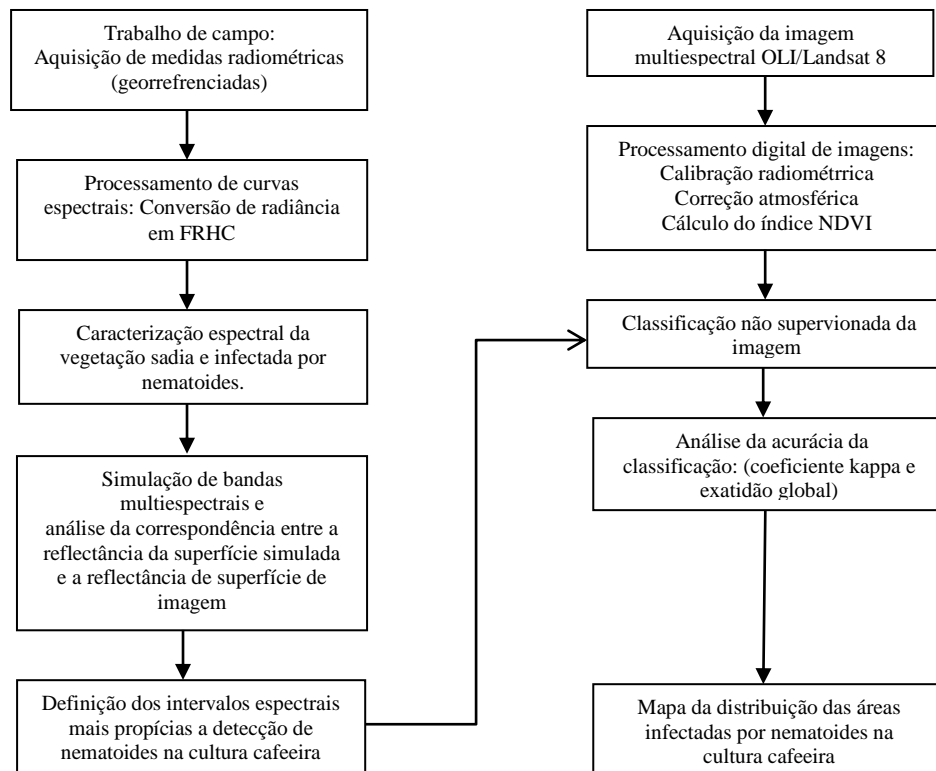
Figura 19. Caracterização da área experimental. Município de Monte Carmelo em destaque nos mapas estadual de Minas Gerais e Brasil (A). Delimitação (em vermelho) dos talhões de café que definiram a área experimental 2 em uma composição de cor natural RGB da imagem OLI/Landsat 8 (B). (C) Distribuição espacial de pontos amostrais georreferenciados: pontos com círculos externos representam a localização das medições espectrorradiométricas; pontos indicam elementos de amostrais usados na avaliação acurácia da classificação. Cores distintas foram usadas para indicar cada classe (café sadio, início de infecção, severamente infectado e solo exposto).



Os objetivos deste experimento foram: (1) analisar as características espectrais da vegetação sadia e infectada a partir de dados hiperespectrais tomados *in situ*; (2) mapear as áreas infectadas por nematoides a partir de imagens de média resolução espacial.

Para caracterização espectral da cultura, os dados hiperespectrais da vegetação foram coletados *in situ*, sobre o dossel de plantas saudias e infectadas. O mapeamento das áreas saudias e infectadas por nematoides foi feito a partir de uma imagem de multiespectral adquirida pelo sensor OLI a bordo do satélite Landsat 8. Na Figura 20, é apresentado o fluxograma de trabalho desenvolvido na área experimental 2

Figura 20. Metodologia proposta para o desenvolvimento do experimento 2.



5.2 Desenvolvimento metodológico

5.2.1 Aquisição de dados hiperespectrais *in situ*

As medições radiométricas foram feitas nos dias 18 de novembro de 2015, entre 10:00 e 12:00 horas, em dez elementos amostrais definidos para cada uma das ocorrências (plantas saudas, início de infecção e severamente infectadas). A aquisição de medidas espectrorradiométricas foi realizada tanto em áreas saudas como em áreas com comprovada ocorrência de nematoides. Para tanto, a posição geográfica das estações de medidas foi determinadas a partir de um receptor GNSS de navegação.

Assim como no experimento 1, o instrumento de medição foi um espectrorradiômetro portátil *ASD FieldSpec*, modelo *HandHeld UV/VNIR*, que opera no intervalo espectral entre 375 e 1075nm, configurado em 512 canais com 1,6nm de resolução espectral.

Durante a aquisição em campo das medidas de radiância do alvo (diretamente sobre a folha) e do fluxo retroespalhado, o sensor foi posicionado a uma altura aproximada de 20 cm acima do topo do dossel da vegetação, sustentado por um suporte manuseado por um

operador. Restringiu-se o campo de visada do sensor a um ângulo de 1° , com o intuito de minimizar a interferência de alvos vizinhos, o que definiu um *GSD* (*Ground Sample Distance*) de $0,2 \text{ cm}^2$.

Para cada elemento amostral, utilizou-se a média de dez repetições da leitura de radiância do alvo e mediu-se, também, a radiância de uma superfície lambertiana de referência (placa *Spectralon*), nas mesmas condições de iluminação e de observação, para estimar o Fator de Reflectância Hemisférico Cônico (FRHC) do alvo. Na Figura 21, é apresentado o protótipo de aquisição da radiometria dos arbustos de café em campo.

Figura 21. Sistema de aquisição de medidas de FRHC, em culturas cafeeiras, utilizado na coleta dos dados espectrorradiométricos.



5.2.2 Processamento dos dados hiperespectrais

A partir da conversão dos valores de Radiância em FRHC, utilizou-se a média das dez repetições por ponto amostral para produzir uma única curva para cada um dos trinta elementos amostrais. Assim como no experimento 1, foi aplicado um filtro média móvel de quatro pontos para suavizar as curvas, minimizando o efeito de ruídos causados por interferências externas ao alvo e pela imprecisão do instrumento. Porém, mesmo com a aplicação do filtro, alguns ruídos permaneceram nos extremos das curvas. Assim, para a caracterização espectral da vegetação, foi considerado o intervalo espectral de 425 nm a 925 nm.

A fim de selecionar os intervalos espectrais adequados para a separação da cultura entre os diferentes níveis de infecção, foi realizada a simulação de bandas sobre as curvas de FRHC. Neste caso, considerou-se a função resposta do sensor OLI/Landsat 8 disponível em Barsi et al. (2014). Os intervalos hiperespectrais considerados para simulação de bandas correspondem aos intervalos das bandas espectrais OLI/Landsat 8: 0,450-0,510 μm (azul); 0,530-0,590 μm (verde); 0,640-0,670 μm (vermelho); 850-880 μm (infravermelho próximo).

A discriminação entre o café sadio e infectado por nematoides é apresentada por meio de gráficos de variabilidade, confrontando valores entre a reflectância de superfície simulada e a observada na imagem.

5.2.3 Aquisição e pré-processamento da imagem

As imagens do sensor OLI/Landsat 8 que cobrem a área de estudo foram adquiridas junto ao USGS, no endereço <http://earthexplorer.usgs.gov/>. As imagens são disponibilizadas no nível processamento 1T, ortorretificadas e georreferenciadas (USGS, 2015). A cena foi tomada em novembro de 2015.

Seguindo a metodologia proposta no experimento 1, a correção atmosférica das imagens foi realizada no software *ENVI 4.8*, o qual conta com o módulo de correção *FLAASH*, baseado no modelo atmosférico *MODTRAN 4+* proposto por KAUFMAN et al. (1997).

Deve-se incluir a ressalva de que, no procedimento de correção atmosférica da cena, foi inserida a banda Cirrus, a qual contém informações relacionadas aos componentes gasosos

presentes na atmosfera no momento em que se realiza a aquisição de dados da superfície física.

5.2.4 Classificação da imagem e análise da acurácia do mapeamento

O processo de inferência geográfica das áreas agrícolas infectada por nematoides foi realizado a partir da classificação não supervisionada da imagem OLI/Landsat 8. A primeira etapa foi à determinação das bandas a serem utilizadas no processo de classificação.

A escolha das bandas para classificação foi definido de acordo com aquelas correspondentes aos intervalos hiperspectrais que melhor discriminaram cada uma das ocorrências. Assim, as bandas originais escolhidas foram à banda do vermelho e do infravermelho próximo. Além de corresponderem aos intervalos que melhor discriminaram a vegetação sadia da infectada por nematoides, a escolha destas bandas, também, justifica-se pelo fato dessas se encontrarem, classicamente, em intervalos propícios à detecção de variações na sanidade da vegetação (MARTINS e GALO, 2014). A banda do infravermelho médio 1 e o índice NDVI também foram selecionados para compor os dados de entrada da classificação, pelo fato de serem bastante utilizados na maioria de pesquisas científicas como indicadores de estresse da vegetação (APAN et al., 2004; ABDEL RAHMAN et al., 2008; GRISHAM et al., 2010; MARTINS e GALO et al., 2014).

O algoritmo utilizado na classificação foi o ISODATA com nível de significância 10% e número máximo de três iterações. Às classes espectrais resultantes foram atribuídas as classes de informação: café sadio, infecção inicial, severamente infectada e solo exposto.

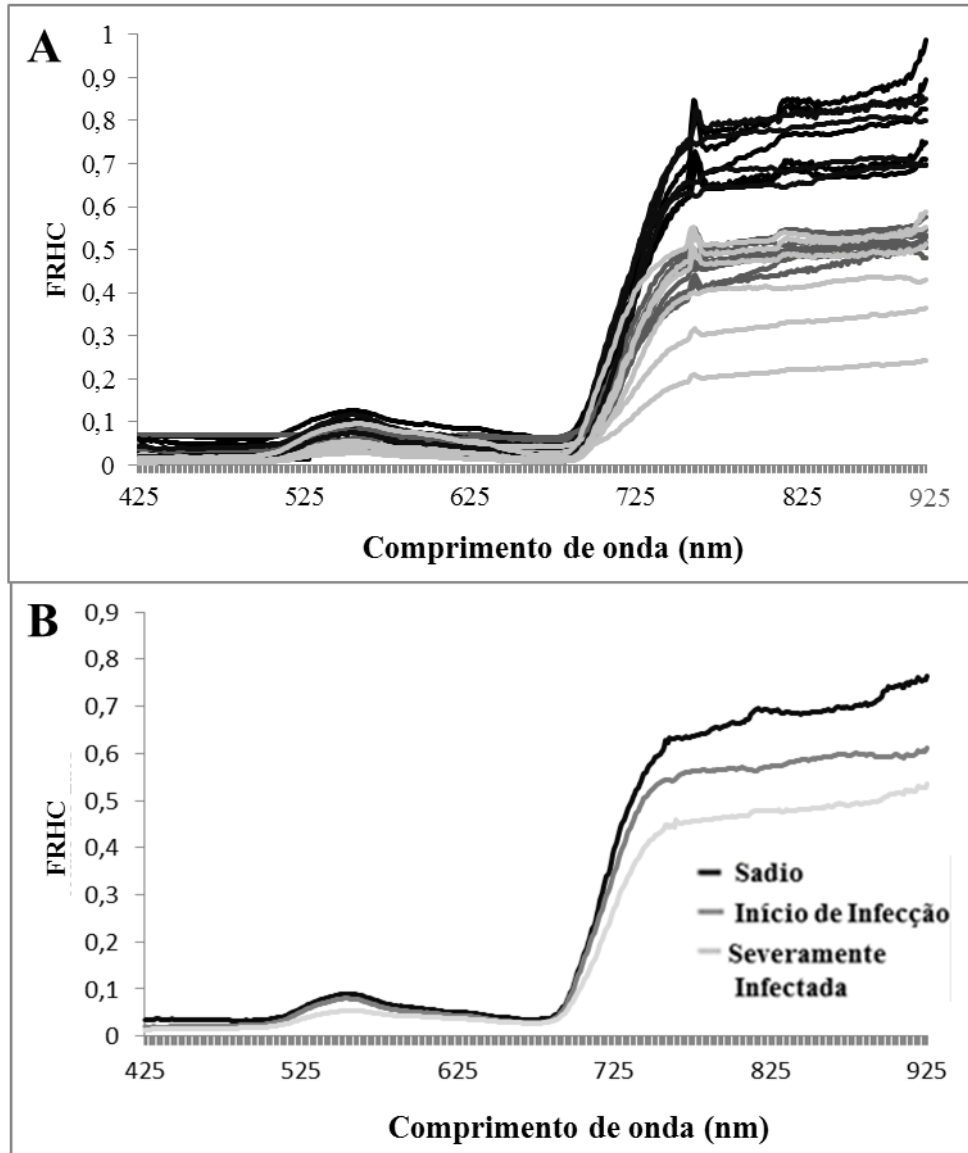
Para avaliar a confiabilidade das áreas do mapa infectadas por nematoides, a acurácia da classificação foi avaliada pela matriz de confusão e o coeficiente de estatística kappa, considerando-se a posição geográfica de 325 pontos de amostragem definidos aleatoriamente no terreno a partir de locais com histórico de ocorrências de nematoides, cuja distribuição espacial, na área de estudo, é mostrada na Figura 19C.

5.3 Resultados e discussões

5.3.1 Caracterização espectral do café sadio e infectado por nematoides por meio de dados coletados *in situ*

As curvas médias dos valores de FRHC obtido *in situ* são mostradas na Figura 22A, enquanto que na Figura 22B apresenta-se a curva média para cada condição. Devido ao comportamento ruidoso do sinal detectado no início e final do espectro, o intervalo espectral considerado para as curvas foi limitado a 425 - 925 nm. Vale ressaltar que a causa destes espectros ruidosos podem ter sido causados por interferências externas no momento do registro do sinal, tais como o movimento das folhas e do instrumento de medida (ANDERSON et al., 2011).

Figura 22. Curvas de FRHC obtidas para as três ocorrências (A). FRHC médio para as condições café sadio, em estágio inicial de infecção e severamente infectada (B).



As curvas médias espectrais evidenciam comportamentos típicos da vegetação: baixos valores de reflectância na região do visível devido absorção da REM pela clorofila *a* e *b* e altos valores na região do infravermelho próximo relacionados ao espalhamento da REM devido a estrutura celular interna da folha. O pico de reflectância no intervalo (540-550nm) indica padrão espectral da vegetação verde para todas as condições, sendo atenuado proporcionalmente ao aumento do nível de infecção. Esta redução está relacionada à condição clorótica da deficiência nutricional (clorofila) das folhas infectadas.

Ao longo de todo espectro, os maiores valores de FRHC estão associados à curva média da vegetação sadia, enquanto que os menores valores à curva da vegetação severamente infectada. De acordo com o padrão físico dos espectros, a discriminação entre

esses espectros é mais notável na intensidade dos valores de FRHC, já que os formatos das curvas se mantêm praticamente iguais, verificando-se, apenas, alguns padrões de disformidade entre as ocorrências em intervalos específicos.

No intervalo do visível (425-690 nm), a curva média da vegetação com infecção inicial apresentou praticamente o mesmo comportamento da curva média sadia, observando-se uma pequena diferença na intensidade do FRHC. Já a curva da vegetação infectada evidenciou uma diminuição evidente na região do espectro verde. Em geral, este padrão de resposta, na região do visível, não é comum em culturas infectadas por nematoides, onde observam-se valores maiores de FRHC para vegetação doente, no que se refere ao intervalo espectral do verde e do vermelho (SANTOS JUNIOR, et al. 2002; MARTINS e GALO, 2015).

Porém, esta característica é mais frequente quando o parasitismo é proveniente de outros tipos de patógenos, tais como fungos (BOECHAT, 2012) e insetos (ABDEL RAHMAN, 2010).

Outro padrão característico, em culturas infectadas por nematoides, é a não ocorrência do efeito denominado “*blue shift of the red edge*”, ou seja, deslocamento da borda vermelha em direção ao comprimento de onda do visível (CLEVERS et al., 2002). Neste estudo, este efeito é perceptível para a curva média da vegetação sadia.

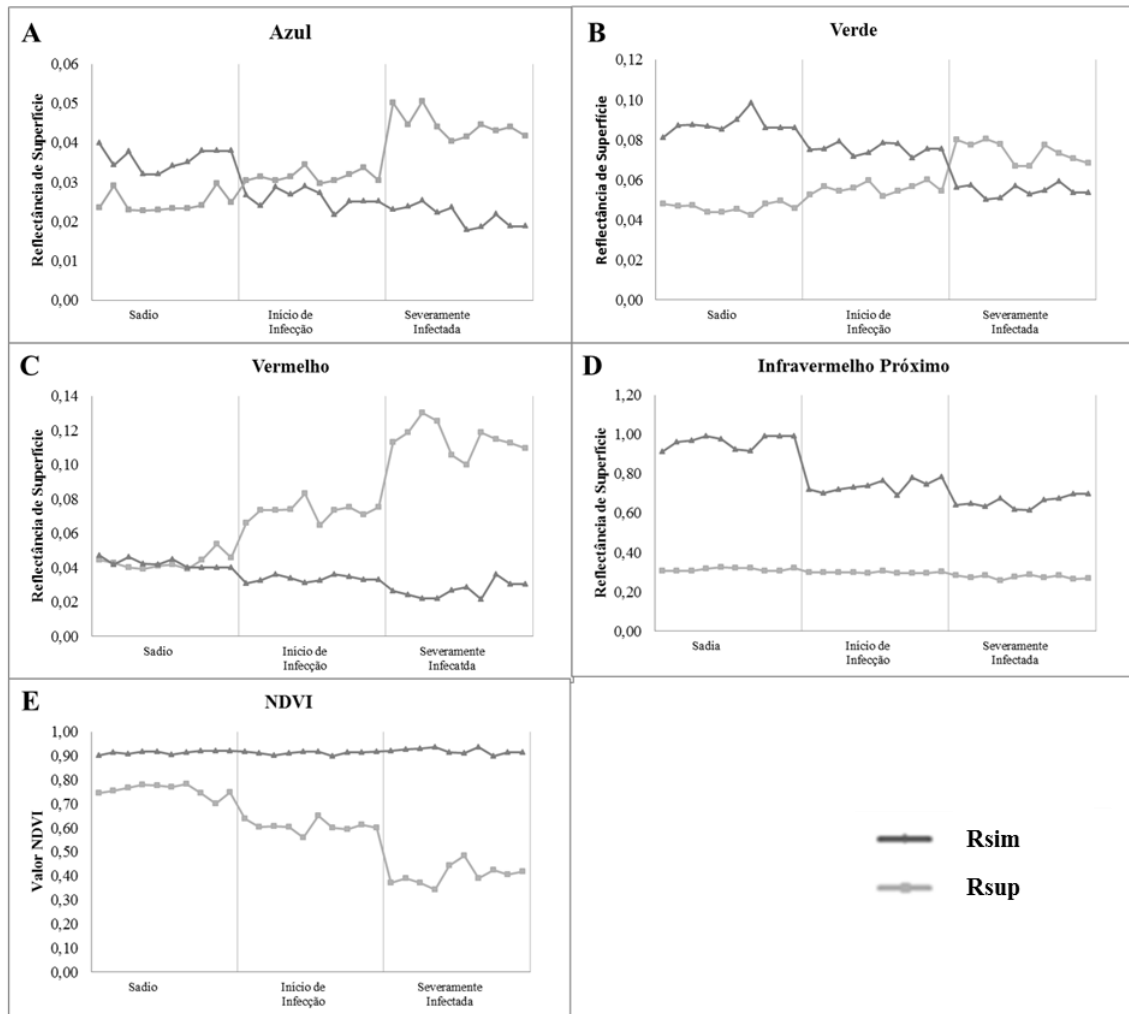
Na região do infravermelho próximo, verifica-se a maior discrepância entre as curvas, com evidente aumento a partir do comprimento de 750 nm. Nesta região, as curvas médias do café em início de infecção e severamente infectado apresentaram formas semelhantes, discriminando-se apenas em intensidade. Já na curva do café sadio, verificou-se uma maior intensidade e feições que a discriminaram das demais ocorrências, observando-se picos de reflectância na região espectral de 825 nm e 900 nm.

5.3.2 Discriminação de níveis de infecção por nematoides a partir de dados simulados e bandas espectrais OLI/Landsat 8

Os valores da reflectância de superfície simulando as bandas espectrais OLI/Landsat 8 e os valores extraídos da imagem, para a vegetação sadia, em início de infecção e severamente infectada para os pontos amostrados *in situ*, são apresentados gráficos de variabilidade da Figura 23. Como os dados hiperespectrais abrangem o intervalo de 425 a 925 nm e índice NDVI, foram simuladas a partir das medidas de FRHC tomadas sobre as folhas, as bandas

espectrais da região do azul (Figura 23A), verde (Figura 23B), vermelho (Figura 23C), infravermelho próximo (Figura 23D) e o índice NDVI (Figuras 23E)

Figura 23. Variabilidade de reflectância de superfície obtida por simulação das bandas espectrais OLI/Landsat 8 e extraídas da imagem para bandas: do azul (A); verde (B); vermelho (C); infravermelho próximo (D); e NDVI (E).



Para os quatro intervalos espectrais, observa-se pouca variabilidade nos valores de reflectância das bandas simuladas (R_{sim}) e extraídas da imagem (R_{sup}), para mesmas condições fitossanitárias, com exceção da reflectância de superfície da imagem (R_{sup}) para a vegetação severamente infectada na banda do vermelho (Figura 23C). Em geral, quase não há variação entre a reflectância do café sadio e em início de infecção, exceto no infravermelho próximo e para valores simulados (R_{sim}), mas uma sutil diferença torna-se perceptível para a condição café severamente infectada.

Nos quatro intervalos espectrais analisados não se percebe correspondência no comportamento da reflectância de superfície obtida pela simulação de bandas (R_{sim}), e aqueles

extraídos da imagem (R_{sup}). A discrepância entre as duas fontes de dados é observada é mais evidente no intervalo do infravermelho próximo do que no visível. Esses resultados concordaram com os conceitos apresentados por Thenkaibail et al. 2011, onde afirmam que diferenças absolutas entre a reflectância hemisférica de folhas de arbustos e a reflectância bidirecional de um dossel referentes à região do visível são menores do que aquelas identificadas para a região do infravermelho próximo.

No visível, considerando a reflectância de superfície das bandas simuladas (R_{sim}), os valores foram maiores para o café sadio e menores para café severamente infectado. Ao contrário, para a reflectância de superfície extraída da imagem, os valores do café sadio foram menores que severamente infectado. Os maiores valores de R_{sup} da vegetação infectada nas bandas do visível podem estar relacionados com a resposta do solo (Latosolo Vermelho Argiloso), o qual dada a sua formação, pode conter óxido de ferro, resultando em uma maior resposta espectral na banda do vermelho (JENSEN, 2009).

Para a banda do infravermelho próximo, os valores simulados (R_{sim}) e de imagem (R_{sup}) foram maiores para café sadio e menor para severamente infectado. Considerando-se os valores obtidos para o índice NDVI, observa-se que a partir dos valores simulados, praticamente, não houve discriminação entre as três ocorrências. Para os valores extraídos da imagem, foi possível discriminar a vegetação severamente infectada do café sadio e em início de infecção.

Em oposto ao experimento 1, a discrepância, entre os valores simulados e da imagem, apontam que, neste estudo, o nível de aquisição dos dados hiperespectrais apresentou forte influência na discriminação espectral entre a vegetação sadia e severamente infectada. Para tanto, uma série de fatores pode explicar tais discrepâncias no caso da imagem. Segundo Beck et al. 2015, a configuração geométrica e a distribuição espacial do dossel da vegetação sadia e infectada por nematoides, variáveis que influenciam no comportamento espectral da vegetação, não são perceptíveis nas medidas espectrorradiométricas *in situ*. Deve-se considerar também fatores referentes ao processo de aquisição da imagem, como efeito atmosférico, que pode não ter sido efetivamente minimizado por meio da metodologia empregada neste trabalho, inclinação foliar.

Além do mais, a variações entre os valores simulados e de superfície, para os mesmos intervalos espectrais, estão relacionadas com a amostragem dos sensores utilizados, haja vista que o espectrorradiômetro tem o campo de visada muito restrito (1°), definindo uma área de amostragem reduzida, enquanto que, o sensor OLI amostra na superfície terrestre uma área de

900 m², podendo incluir a resposta de vários alvos espectralmente puros: solo exposto e galhos.

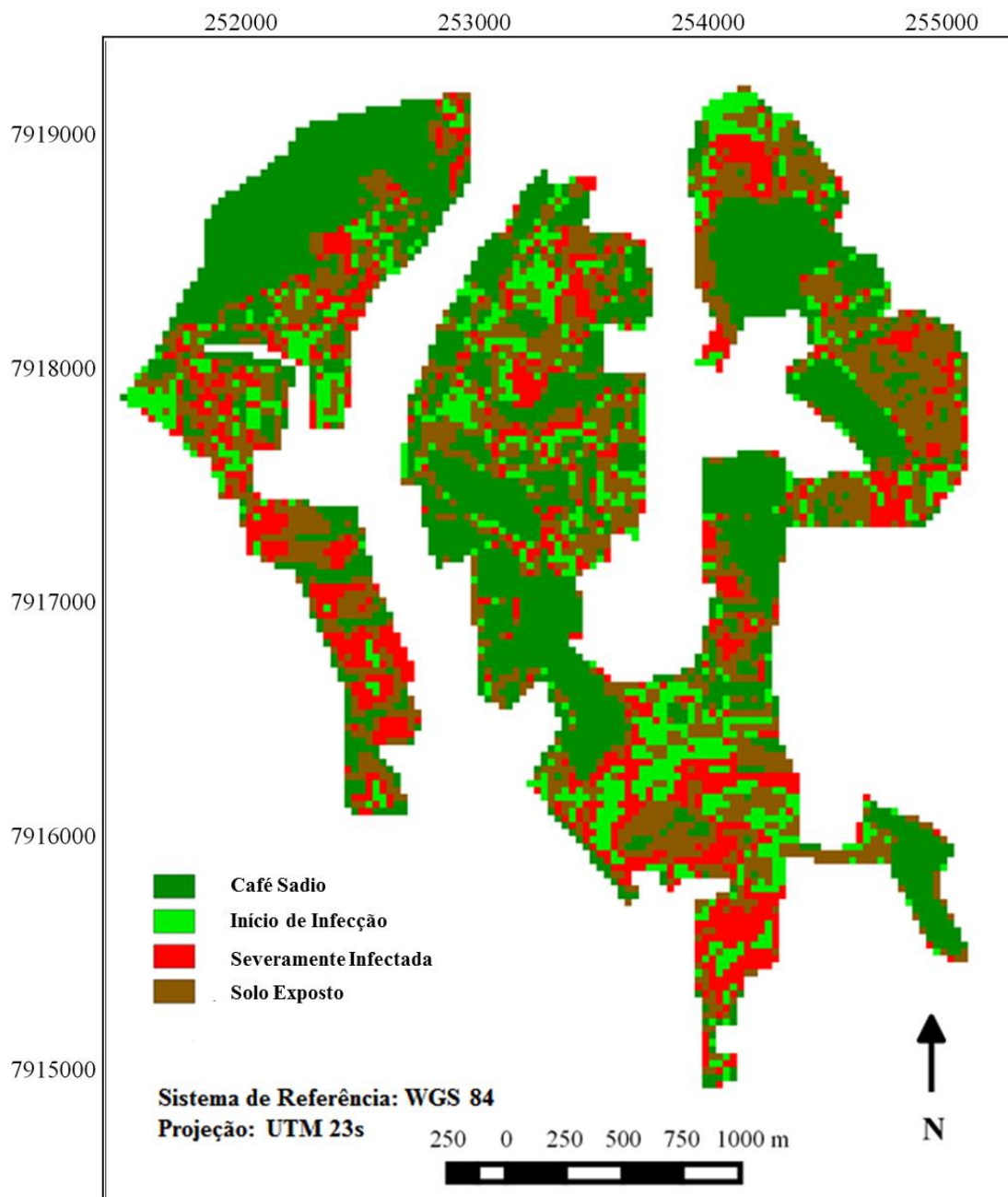
Fatores como a geometria de aquisição radiométrica e a distância do alvo sensor, também podem ter influenciado nas discrepâncias observadas entre o comportamento espectral das classes de vegetação registrado pelos dois sensores (ANDERSON et al., 2011). Além do mais, deve-se considerar que as medidas realizadas in situ diretamente sobre a planta, no interior do talhão, são influenciadas pelas amostras totais de folhas de sombra, bem diferentes das folhas do dossel, "vistas" pelo sensor a bordo do satélite.

Ainda Thenkaibail et al. 2011, salienta que folhas do estrato superior de dosséis erectófilos são adaptadas anatômica e fisiologicamente a ambientes bem iluminados e sujeitos à ação do vento, o que lhes diminui o conteúdo hídrico. É de se esperar, portanto, uma defasagem no comportamento espectral da reflectância das folhas da amostra em relação à reflectância medida pelo sensor e expressa na imagem do satélite.

5.3.3 Classificação da imagem e análise da acurácia do mapeamento

A Figura 24 apresenta o mapeamento das áreas infectadas por nematoides, a partir da classificação não supervisionada ISODATA, da imagem OLI/Landsat 8, na qual foram definidas as classes café sadio, início de infecção, severamente infectado e solo exposto. Os dados de entrada para a classificação foram: bandas espectrais do vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio 1, bem como a imagem NDVI.

Figura 24. Mapa dos níveis de infecção por nematoides na área experimental 2, baseado na classificação de dados OLI/Landsat 8.



A Tabela 6 apresenta a extensão, em km², das classes mapeadas no experimento 2.

Tabela 6. Extensão das classes mapeadas no experimento 2

Classes Mapeadas	Extensão em ha
Café sadio	2500
Início de Infecção	800
Severamente Infectado	1000
Solo Exposto	1700

As áreas em início de infecção e severamente infectadas por nematoides distribuem-se espacialmente em praticamente todos os talhões, sendo evidenciados grandes aglomerados de infecção, na porção inferior das áreas agrícolas, e concentrações mais esparsas da infecção na porção superior do mapa.

Em praticamente todas as áreas infectadas, há a associação das classes início de infecção e severamente infectadas, onde, em algumas situações, as áreas, em início de infecção, aparecem envoltas por áreas de plantas severamente infectadas situadas nas regiões periféricas dos talhões ou espalhadas gradualmente em torno de talhões completamente tomados por plantas severamente infectadas.

A evidência de nematoides na porção periféricas e central dos talhões pode ser explicado por Villate et al. (2008), o qual salienta que a distribuição espacial, nestas áreas, é comumente causada por enxurradas que transportam o patógeno por meio de carreadores e ruas contíguas aos talhões e por implementos agrícolas que os dispersam a partir das linhas de plantio.

Por se tratar de uma área tropical com decorrência constante de chuvas, entra em conformidade com Wolcott et al. (2005), onde a distribuição espacial de nematoides do gênero *Meloidogyne* também foi detectada na porção periférica de talhões de algodoeiros. Neste trabalho, discriminação das áreas de infecção foi realizada a partir da classificação de imagens tomadas por uma câmera multiespectral (*Ducan Tech MS 4000*) aerotransportada.

Alguns estudos, como o de Nutter et al. (2002), a proliferação da infecção dos nematoide, sobre talhões inteiros de soja, foi observada. Neste trabalho, as áreas de infecção foram detectadas a partir da classificação da combinação de índices multiespectrais com as bandas do visível do sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus ETM+/Landsat 7*.

Em relação ao padrão geométrico das áreas severamente infectadas, observa-se a formação de reboleiras, caracterizadas desde pequenas manchas no interior dos talhões a grandes áreas compreendidas por dois ou mais talhões. Devido à resposta do solo em áreas em início de infecção e severamente infectadas, em alguns locais, há a nítida associação dessas classes com os carreadores e as ruas localizadas entre os talhões.

A distribuição espacial de nematoides, em zonas pontuais ou em reboleiras, é evidenciada em diversas culturas arbustivas, tais como o cafeeiro. Em Beck et al. (2015), a detecção de nematoides em pinheiros, a partir de imagens multiespectrais aerolevantadas, foi evidenciada sobre arbustos isolados e agrupados em extensas áreas.

A Tabela 7 apresenta a matriz de confusão da classificação da área experimental 2, onde são expressos os valores dos erros de omissão, comissão e o índice kappa.

Tabela 7. Matriz de confusão e erros de omissão e comissão da classificação da imagem OLI/Landsat 8 (área experimental 2)

Classificação	Verdade Terrestre					Total	Erro de comissão (%)
	Café sadio	Início de infecção	Severamente infectado	Solo exposto			
Café sadio	70	12	11	-	93	24,73%	
Início de infecção	4	40	16	-	60	33,33%	
Severamente infectado	10	29	54	7	100	46%	
Solo exposto	16	19	19	18	72	75%	
Total	100	100	100	25	325		
Erro de omissão (%)	30%	60%	46%	28%			

O índice de classificação global foi de 56%, enquanto que o coeficiente kappa foi de 0,41.

A acurácia da classificação, calculada a partir da localização de 325 elementos amostrais identificados no terreno, definiu uma exatidão global de 56% e um índice kappa de 0,41. O maior erro de omissão foi para a classe início de infecção (60%), seguido da classe severamente infectado (46%), café sadio (30%) e solo exposto (28%). Já o maior erro de inclusão foi para a classe solo exposto (75%), severamente infectado (46%), início de infecção (33,33%) e café sadio (24,73%).

A acurácia do produtor da classe do café sadio (75,27%) foi a mais alta, com a inserção de elementos amostrais de validação provenientes de outras classes: início de infecção (4%), severamente infectada (10%) e solo exposto (16%). A acurácia do produtor, para classe de café em início de infecção, foi a mais crítica (40%), sendo que a maioria dos seus pontos de validação foi incluída nas classes severamente infectada (29%) e solo exposto (19%). A confusão entre essas duas classes de infecção é previsível, visto que há uma significativa similaridade radiométrica entre elas na banda do infravermelho próximo, além disso, a baixa resolução do sensor OLI não é capaz de discriminar, com precisão, o padrão geométrico das reboleiras das plantas severamente infectadas. A pior resolução espacial dessa imagem também foi responsável pela acurácia do usuário do solo exposto.

Assim como no mapeamento realizado a partir do sensor RapidEye (Figura 17), observou-se que a classe que obteve o melhor desempenho, na classificação, foi a café sadio.

Adicionalmente, nota-se que o classificador teve um baixo desempenho na discriminação entre as classes início de infecção, severamente infectada e solo exposto.

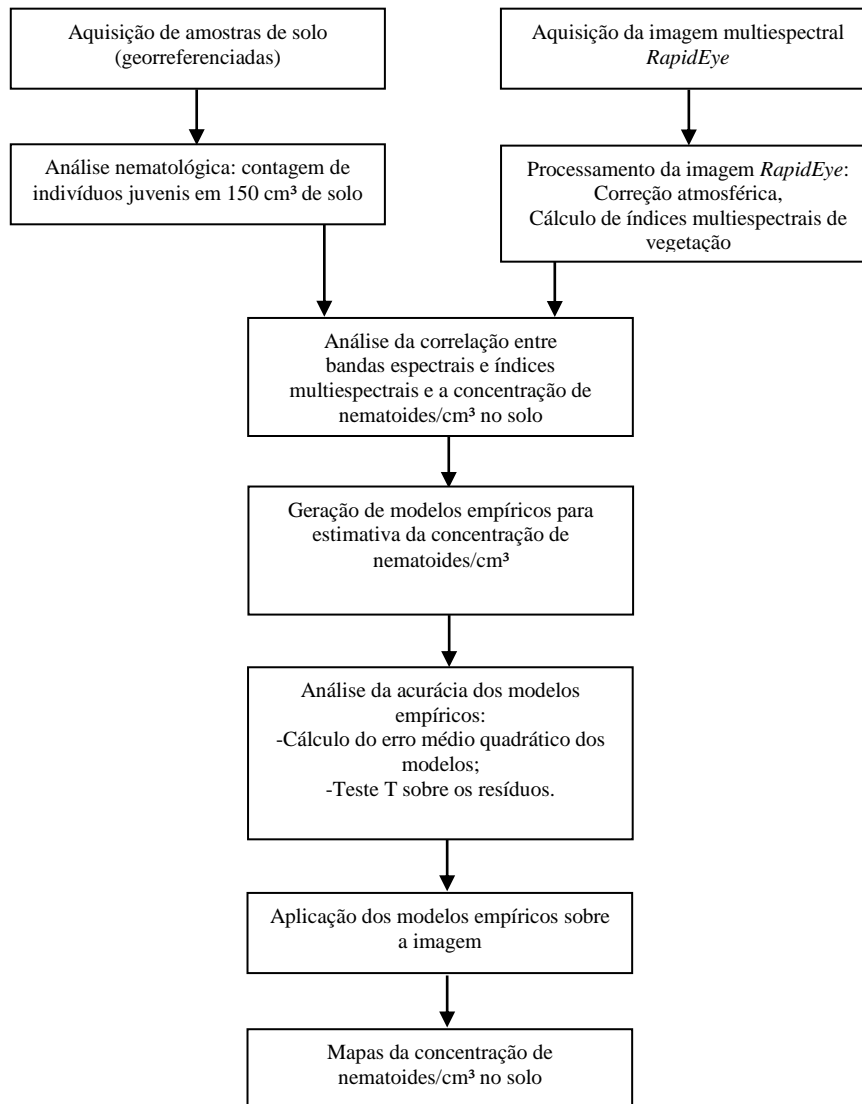
6. EXPERIMENTO 3: ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE NEMATOIDES/CM³ NO SOLO E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL EM CULTURAS CAFEIRAS A PARTIR DE MODELOS EMPÍRICOS OBTIDOS POR IMAGENS MULTIESPECTRAIS RAPIDEYE

O objetivo do terceiro experimento foi ajustar modelos empíricos capazes de estimar a concentração por centímetro cúbico de nematoides no solo, a partir da reflectância de superfície registrada em imagens multiespectrais.

Para o desenvolvimento desse experimento, foi utilizada uma imagem RapidEye obtida para uma área cafeeira infectada por nematoides, bem como relatórios da análise nematológica realizada na área indicando a concentração de nematoides (número de indivíduos por unidade de volume) em pontos de amostragem georreferenciados, nos quais foi realizada a coleta de solo. Vale ressaltar que as análises nematológicas foram realizadas no laboratório certificado de análises agrícolas LABRAS, localizado no município de Monte Carmelo-MG.

Os modelos empíricos foram obtidos a partir de equações de regressão, linear simples e linear múltipla, geradas pela relação direta entre valores de reflectância de superfície extraída de bandas originais RapidEye (corrigidas dos efeitos atmosféricos) e índices multiespectrais com a concentração de nematoides/cm³, nos elementos amostrais georreferenciados. Para avaliação dos modelos, foi utilizado o erro médio quadrático e analisada a tendência do modelo, considerando-se a concentração de nematoides/cm³ em pontos de amostrados. A Figura 25 apresenta as etapas desenvolvidas no experimento 3.

Figura 25. Desenvolvimento metodológico aplicado no Experimento 3



6.1 Desenvolvimento metodológico

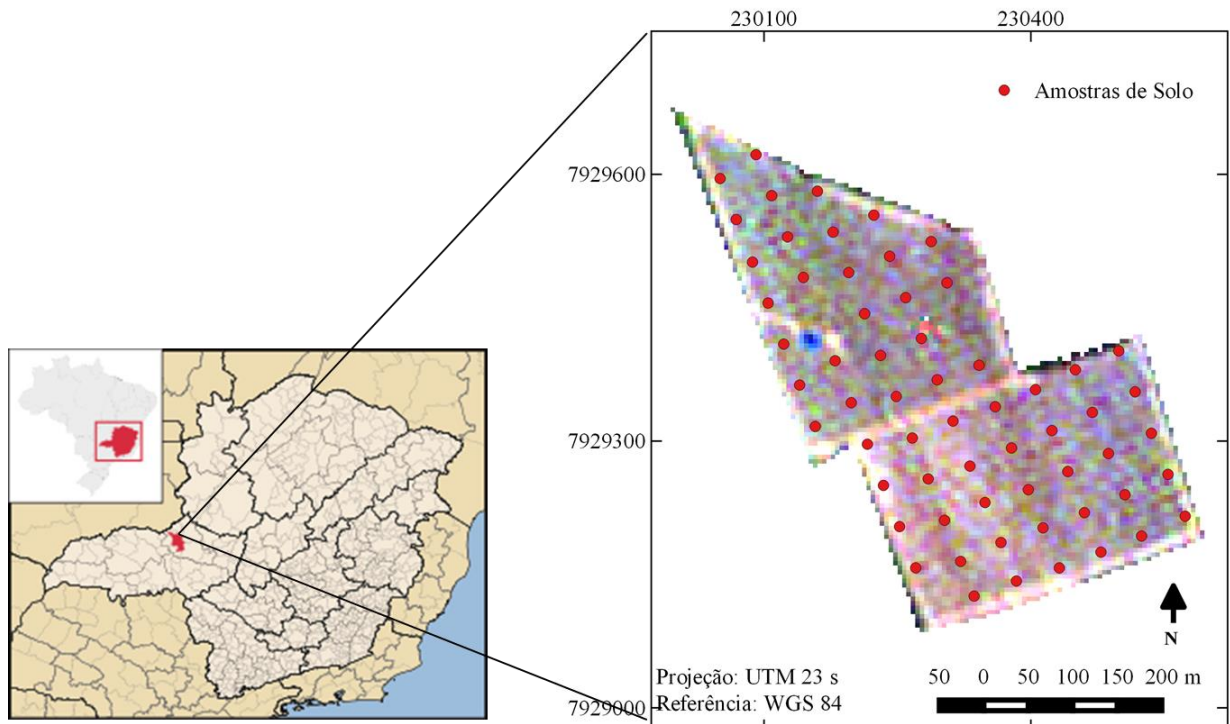
6.1.1 Área de estudos

O experimento foi conduzido em área agrícola da no município de Monte Carmelo-MG, centrada nas coordenadas cartesianas WGS84/UTM 230285,380m (E) e 7929574,141m (N), em um Latossolo Vermelho Argiloso. A área vem sendo cultivada com café arábica nos últimos anos, com plantio no espaçamento de 3,8 x 0,7 m. O talhão levantado trata-se de uma área experimental com locais com alta concentração nematoides no solo, caracterizado por

arbustos com um leve grau de desfolhamento causado pelo patógeno e sem a percepção de reboleiras.

A amostragem dos pontos foi realizada em uma única campanha de campo, realizada em 10 de março de 2015. Conforme o protocolo de aquisição definido pela Embrapa (2009), as amostras de solo foram retiradas nas profundidades de 0 a 0,1m. Os pontos de amostragem foram definidos em 61 locais, configurados em uma malha regular espaçada em 5x5m, conforme apresentado na Figura 26. A posição dos pontos foi obtida a partir de um levantamento geodésico relativo estático usando um par de receptores *GNSS Topcon Hiper LI/L2*.

Figura 26. Localização da área de estudos e configuração de amostragem de coleta de solo. Os círculos em vermelho representam os pontos amostrados (61 pontos). (Fonte: O Autor)



Após a amostragem de solo foi feita a análise nematológica, na qual, primeiramente, identificaram-se os gêneros do fitoparasita e, em um segundo momento, realizou-se a contagem da população de nematoides por cm^3 . Deve-se ressaltar que, nesse estudo, a concentração de nematoides foi estimada por número de juvenis por 150 cm^3 . Todavia, por convenção, será sempre tratada por concentração de nematoides por cm^3 .

6.1.2 Aquisição e processamento de imagem multiespectral

Com o intuito de relacionar indicadores extraídos da imagem multiespectral com a concentração de nematoides/cm³, foi utilizada uma imagem do sensor RapidEye para o desenvolvimento do experimento. Nessa condição, a opção pela imagem com resolução espacial de 5 metros é justificada pelo tamanho da área experimental, a qual é relativamente pequena (14 hectares), e pela dificuldade de relacionar geograficamente a posição dos pontos levantados *in situ* com a respectiva rotulação em imagens de média resolução espacial.

A imagem RapidEye foi tomada no dia 12 de dezembro de 2014. Vale ressaltar que a defasagem temporal entre a aquisição da cena e a realização da campanha de campo para coleta de solo foi aproximadamente de quatro meses, ou seja, relativamente expressiva para experimentos nos quais se correlacionam dados de campo com imagem. Porém, mesmo com essa defasagem temporal, alguns fatores devem ser considerados: no período de tempo entre a tomada da imagem e as aquisições *in situ*, não houve manejo agrícola sobre as áreas com sintoma de infestação; a cultura cafeeira é perene e mantém os componentes nutricionais praticamente inalteráveis na ausência do manejo agrícola; a principal causa da movimentação massiva de nematoides no solo é por intermédio de implementos agrícolas (BARROS et al., 2014).

O pré-processamento da imagem seguiu a metodologia de correção apresentada em Martins e Galo (2014), considerando-se a necessidade de aplicar um fator de escala de 1000 no processo de correção atmosférica, para que o valor da reflectância dos *pixels*, os quais têm atributos expressos em refletância de superfície, fossem positivos.

6.1.3 Definição dos modelos empíricos para estimativa da concentração de nematoides/cm³

Em aplicações em vegetação, a maioria dos modelos e índices espectrais é gerada para discriminação de espécies vegetais e estimativas de parâmetros biofísicos (biomassa, IAF e clorofila e na discriminação de doenças em cultura) (APAN et al., 2004, MAHLEIN et al., 2013). Especificamente, a formulação de modelos e índices espectrais aplicados na detecção de doenças em culturas é baseada na relação da característica da vegetação infectada com a concentração de algum nutriente específico (RAMOELO et al., 2015). Porém, na literatura, praticamente não são encontrados modelos específicos para estimar a concentração de parasitas do solo a partir da resposta espectral do dossel da cultura.

Para culturas infectadas por nematoides, a análise nematológica da concentração em nematoides/cm³ no solo pode evidenciar diretamente a sanidade do vegetal localizado na região amostrada. Ou seja, quando ocorrem altas concentrações, a vegetação apresenta sintomas da infecção (AVELINO et al., 2009). Dentro dessa perspectiva, foi avaliado o potencial de modelos empíricos na imagem RapidEye, em estimar a concentração de nematoides/cm³ a partir da reflectância do dossel da cultura cafeeira.

Para o cálculo e validação dos modelos radiométricos, considerou-se a concentração de nematoides/cm³ e a resposta espectral dos pontos amostrados em campo. A seleção dos pontos foi realizada de forma aleatória, sendo 25 pontos utilizados para o cálculo e vinte pontos para validação do desempenho dos modelos.

Dentre os potenciais canais que foram avaliados para geração dos modelos, consideraram-se as cinco bandas originais do sensor RapidEye (1-Azul; 2-Verde; 3-Vermelho; 4-Vermelho Limítrofe, 5-Infravermelho Próximo), o índice NDVI e dois índices derivados das bandas originais, definidos empiricamente: 1-NDVI_{3,4}; 2-NDVI_{4,5}. Os índices NDVI_{3,4} e NDVI_{4,5} são definidos conforme as equações 16 e 17, respectivamente:

$$NDVI_{3,4} = \frac{\rho_{\text{vermelho limítrofe}} - \rho_{\text{vermelho}}}{\rho_{\text{vermelho limítrofe}} + \rho_{\text{vermelho}}} \quad (16)$$

$$NDVI_{4,5} = \frac{\rho_{\text{infravermelho próximo}} - \rho_{\text{vermelho limítrofe}}}{\rho_{\text{infravermelho próximo}} + \rho_{\text{vermelho limítrofe}}} \quad (17)$$

Onde, $\rho_{\text{vermelho limítrofe}}$ representa a banda do vermelho limítrofe.

O processo de geração dos modelos seguiu duas abordagens, das quais, em um primeiro momento, verificou-se a possibilidade de gerar um modelo de predição a partir de duas bandas ou mais. Nesta abordagem, o critério para compor o modelo considerou os canais que apresentaram uma significativa correlação com a concentração de nematoides/cm³. Deste modo, definiu-se, como significativa, a correlação superior a 40% e um nível de significância de 5%.

No cálculo do modelo foi utilizada a técnica de regressão linear múltipla *stepwise* do tipo *forward* (passo à frente). A regressão linear múltipla *stepwise* considera, inicialmente, um modelo de regressão simples usando, como variável auxiliar (bandas e índices multiespectrais), a variável de maior coeficiente de correlação com a variável resposta (concentração de nematoides/cm³). O processo se sucede ao passo que uma nova variável

auxiliar é incorporada ao modelo, sendo interrompido quando nenhuma nova variável é incluída no modelo. O modelo final é dado quando $F_{\max} < F_{\min}$, onde F_{\max} é dado a partir da Equação 18, enquanto que F_{\min} é o quantil especificado da distribuição F, com um e $(n(\text{observações}) - m(\text{variáveis}))$ graus de liberdade (HAIR et al., 2009).

$$F_{\max} = \frac{SQReg_c - SQReg_r}{\sigma^2} \quad (18)$$

Em que $SQReg_c$ é a Soma dos quadrados dos resíduos do modelo de regressão; $SQReg_r$ é a Soma dos quadrados dos resíduos do modelo de regressão ajustado; e σ^2 é a soma dos quadrados dos erros do modelo de regressão completo.

Os parâmetros de entrada para aceitação de variáveis, no modelo de regressão linear múltipla, foram a um nível de significância de 5%, e o quantil da distribuição F no valor de 4. Deve-se ressaltar que todos os modelos de regressão linear simples e múltipla foram calculados no *software Minitab 15.0*.

A validação e a análise de acurácia dos modelos empíricos foram realizadas aplicando-se os modelos sobre a radiometria dos vinte pontos de verificação. A partir dos dados de discrepância entre a concentração de nematoides/cm³ observada e estimada, foi calculado o erro médio quadrático (RMSE) da amostra e analisada a tendência dos modelos de predição, considerando o teste de hipótese *t-Student*. O RMSE e erro RMSE(%) são calculados a partir das equações 19 e 20.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{med})^2}{n}} \quad (19)$$

$$RMSE (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{med})^2}{n}} \times \frac{100Xn}{\sum_{i=1}^n x_{med}} \quad (20)$$

Em que x_i e x_{med} representam o valor estimado e medido *in situ* de nematoides/cm³, respectivamente; e n é o número de amostras.

Genericamente, considerando-se o total de amostras por modelo e um nível de significância de 5%, os testes foram formulados da seguinte forma:

- Teste *t-Student*

H_0 : Tendência = 0

H_1 : Tendência \neq 0

Em uma segunda estratégia, verificou-se a possibilidade de gerar um modelo de predição a partir de uma única banda. Nesta etapa, o melhor modelo de predição foi estabelecido considerando a função da regressão linear simples que apresentou maior coeficiente de determinação (R^2), a partir da relação da concentração de nematoides/cm³ (variável de resposta) e da radiométrica dos canais multiespectrais da imagem (variável de predição).

Por fim, a partir dos modelos empíricos de estimativa foram gerados mapas de cor-valor da concentração de nematoides/cm³ no solo.

6.2 Resultados e discussões

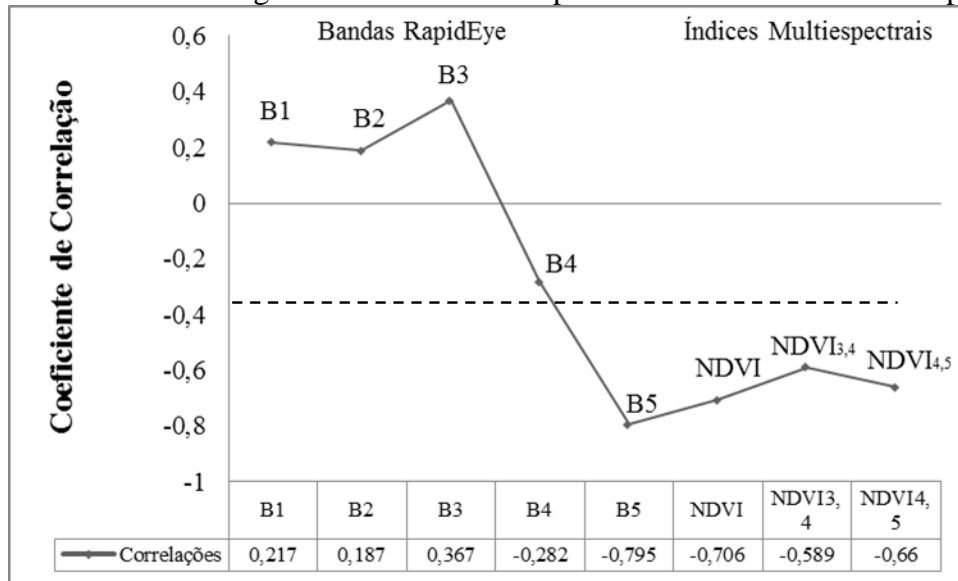
6.2.1 Análise nematológica

A partir da análise nematológica, foram constatados cinco gêneros de nematoides: *Meloidogyne*, *Pratylenchus*, *Criconemella*, *Helicotylenchus* e *Paratylenchus*.

6.2.2 Correlação entre a concentração de nematoides/cm³ no solo e a reflectância de superfície das bandas originais e os índices derivados do sensor RapidEye

O correlograma da Figura 27 apresenta a relação entre a concentração de nematoides/cm³ no solo e a reflectância de superfície das bandas originais e índices multiespectrais do sensor RapidEye.

Figura 27. Correlograma entre a concentração de nematoides/cm³ no solo e a reflectância de superfície das bandas originais e índices multiespectrais derivado do sensor RapidEye.



As correlações estatisticamente significativas (P -valor $< 0,05$) são indicadas por variáveis que estão abaixo da linha tracejada (B5, NDVI, NDVI_{3,4} e NDVI_{4,5}). As bandas do visível apresentaram uma baixa correlação com a concentração de nematoides/cm³, variando de -0,282 a 0,367. Neste intervalo, destaca-se a baixa correlação apresentada pela banda do vermelho limítrofe, em contraposição a estudos em que nesse mesmo intervalo espectral resultou em alta correlação com dados de outras culturas infectadas por patógenos diversos, tais como insetos (OUMAR E MUTANGA, 2013) e nematoides (MARTINS E GALO, 2014).

Os maiores coeficientes de correlação foram apresentados pela banda do infravermelho próximo, -0,795, e pelo índice NDVI, -0,706, sendo aqueles que, classicamente, indicam estresse vegetal causado por patógenos (Yang et al, 2009; Oumar e Mutanga, 2013). Para os novos índices, as correlações foram menores, registrando-se -0,66 para o NDVI_{4,5} e -0,589 para NDVI_{3,4}. Em Zou et al. (2014), também constatou-se alta correlação entre o estresse hídrico em pinheiros atacados por insetos e a banda original do infravermelho próximo e o índice NDVI derivado do sensor RapidEye.

Para outros sensores, como Landsat 7, Nutter et al. 2002 observa a alta correlação entre a concentração de nematoides, em culturas de soja, com as bandas do infravermelho próximo e infravermelho médio 1.

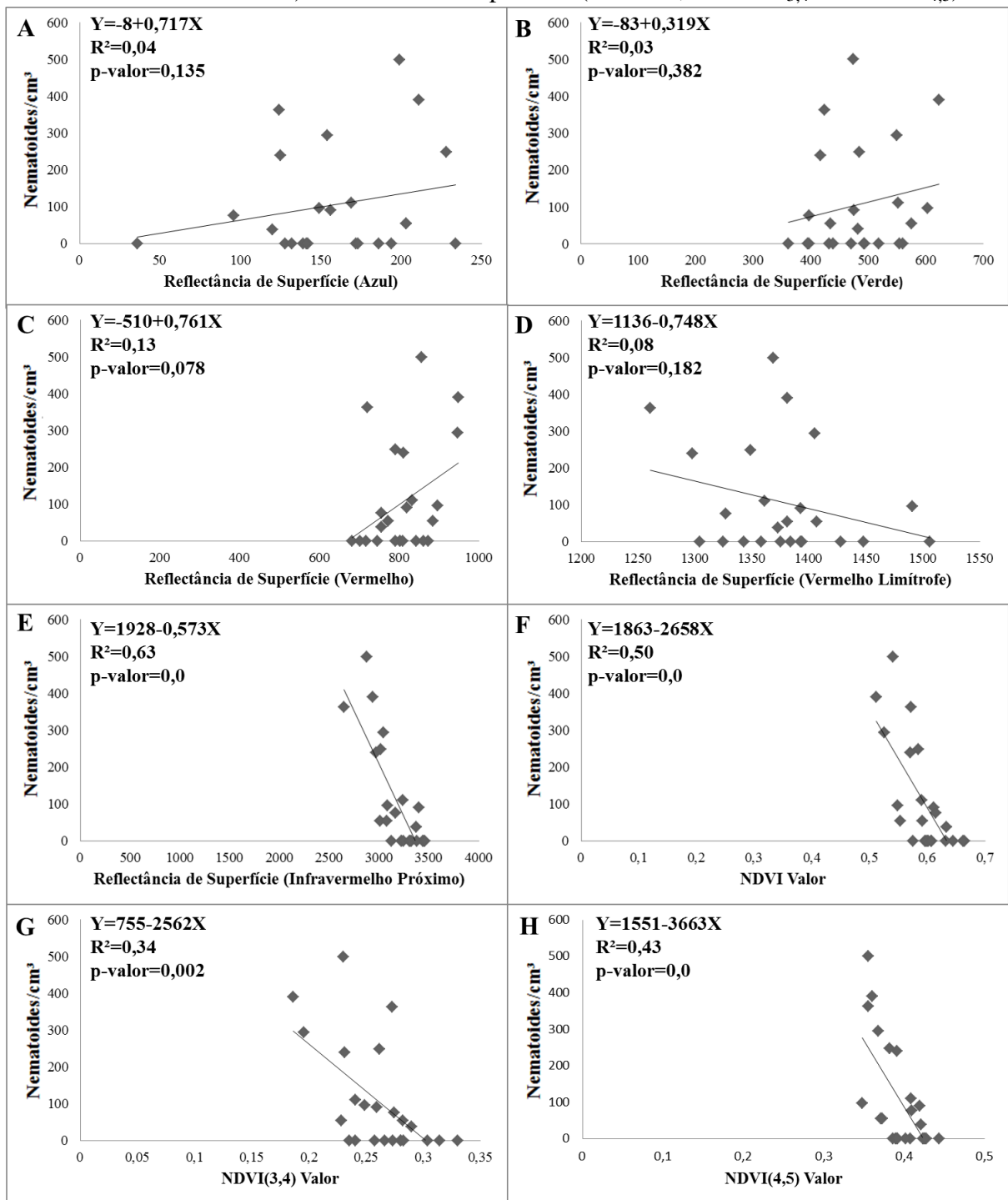
Em relação aos índices experimentais propostos, vale destacar que, mesmo sendo o menor dos índices, a correlação apresentada pelo NDVI_{3,4} foi representativa, viabilizando uma

forma alternativa de uso de bandas pouco correlacionadas para estimar a concentração de nematoides/cm³, tais como o vermelho e o vermelho limítrofe.

6.2.3 Análise dos modelos empíricos de estimativa da concentração de nematoides/cm³

Na Figura 28, são apresentados os gráficos de regressão entre a concentração de nematoides/cm³ e a reflectância de superfície das bandas originais (28A, 28B, 28C, 28D, 28E) e dos índices multiespectrais (28F, 28G e 28H). As equações de regressão linear, o coeficiente de determinação e o p-valor resultantes de cada relação são apresentados no lado esquerdo superior de cada gráfico.

Figura 28. Gráficos de regressão entre a concentração de nematoides/cm³ observada (eixo y) e as bandas originais RapidEye (A-Azul, B-Verde, C-Vermelho, D-Vermelho Limítrofe e E-Infravermelho Próximo) e índices multispectrais (F-NDVI, G-NDVI_{3,4} e H-NDVI_{4,5}).



Os gráficos de regressão A, B, C e D demonstram um alto grau de dispersão na relação da concentração de nematoides/cm³ e a reflectância de superfície das bandas do visível. A amplitude dos R² variaram de 0,03 a 0,13, sendo o menor valor para a banda do verde e o maior para a banda do vermelho. Além dos baixos valores de R², o P-valor das equações de

regressão gerada pelas bandas do visível não foram significativos, superando o nível de significância de 5%.

Segundo Ponzoni et al. (2015), as bandas do visível são capazes de discriminar culturas infectadas por patógenos e situações em que a vegetação apresenta sintomas e mudanças na sua estrutura física. Assim, a inexistência de uma relação significativa entre a concentração de nematoides/cm³ e reflectância de superfície das bandas do visível pode estar associada ao grau de infecção da cultura, o qual estava em estágio inicial e não era caracterizado por sintomas físicos na vegetação.

Os maiores valores de R² foram evidenciados na banda infravermelho próximo e nos índices multiespectrais, dos quais o menor valor registrado, para este conjunto em específico, foi do índice NDVI3,4, R²=0,34, e o maior para a banda do infravermelho próximo, R²=0,63, fato que a definiu como o melhor modelo empírico de estimativa da concentração de nematoide/cm³ no solo. Os valores de p-valor, abaixo de 5%, indicaram que os quatro modelos de regressão são singnificaticos e garantem normalidade dos dados.

Considerando-se que a concentração de nematoide/cm³ está relacionada com o grau de infecção do vegetal, o alto valor do R², para banda do infravermelho próximo, e o índice NDVI corroboram com algumas evidências apontadas no experimentos anteriores: 1- uma relação inversamente proporcional entre o nível de infecção e reflectância de superfície do infravermelho próximo e o número digital do NDVI; 2- o intervalo espectral do infravermelho próximo, aparentemente, é o mais sensível a infecção da cultura, desde o estágio inicial, quando a geometria espacial das áreas infectadas e a resposta espectral do solo exercem pouca influência na radiometria do dossel.

As mesmas constatações foram evidenciadas em Nutter et al. (2002), onde obteve-se um R² de 0,84, entre a concentração de nematoide/cm³ e a banda do infravermelho próximo do sensor Landsat 7 sobre um dossel de soja. Já para culturas arbustivas, como os pinheiros, em Wolcott et al. (2005), em um mapeamento utilizando-se uma câmera multiespectral de alta resolução espacial, o modelo de estimativa, formulado a partir da relação entre a concentração de nematoides/cm³ e o valor obtido pelo índice NDVI, apresentou um R² de 0,80.

6.2.4 Determinação dos modelos empíricos para estimativa da concentração de nematoides/cm³ no solo

A Tabela 8 apresenta o modelo empírico estimativa da concentração de nematoides/cm³ no solo e os elementos resultantes da regressão linear múltipla *stepwise* aplicada sobre a reflectância de superfície das bandas originais e valores digitais dos índices multiespectrais. O modelo de regressão considera os canais que foram significativamente correlacionados com a concentração de nematoides/cm³ no solo.

Tabela 8. Modelo de regressão da concentração de nematoides/cm³ e coeficientes

Modelo empírico	$y=1928,49+0,48*B4-1122,82*NDVI_{3,4}$
R²	0,68
P-valor/Infravermelho próximo	0
P-valor/NDVI_{3,4}	0,08
Coefficiente cp de Mallows	6

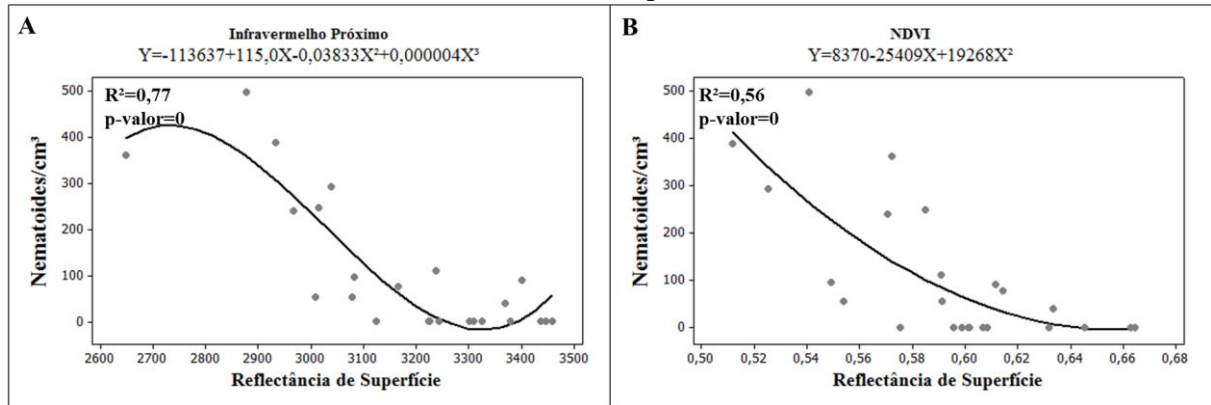
As variáveis de predição do modelo de regressão foram a banda do infravermelho próximo e o índice NDVI_{3,4}. O R² foi de 68,31% e o P-valor do infravermelho próximo e do NDVI_{3,4} foram 0,0 e de 0,08, respectivamente. Para o modelo de regressão, o coeficiente cp de *Mallows* foi de 6, sendo o menor valor para todos os modelos gerados pelo *Minitab 15.0*. Vale ressaltar que o cp de *Mallows* é um índice que compara a precisão e a tendência do modelo completo em relação a modelos gerados com um subconjunto de preditores. Normalmente devem-se priorizar modelos com cp de *Mallows* pequeno e próximo do número de preditores no modelo (Hair et al., 2009).

Outros modelos de regressão também foram gerados, considerando, como variáveis de predição, os índices multiespectrais NDVI e NDVI_{4,5}. Porém os modelos compostos pela banda IVP e os índices multiespectrais NDVI e NDVI_{4,5}, mesmo considerando R² maiores, não podem ser considerados, pois as três variáveis de predição são altamente correlacionadas entre si e podem causar um problema de multicolinearidade (Hair et al. 2009).

Vale ressaltar que modelos não lineares também foram testados para estimar a concentração de nematoides/cm³. Contudo, nos testes de acurácia, os modelos mais significativos apresentaram altos valores de erro médio quadrático. Na Figura 29, são

apresentados os modelos não lineares formados a partir da banda do infravermelho próximo ($R^2= 0,767$) e do NDVI (0,561).

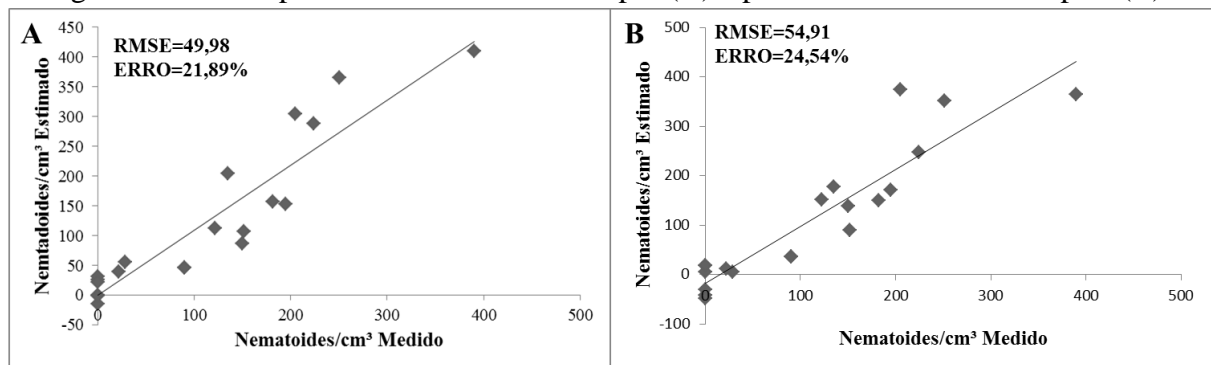
Figura 29. A- Modelo não linear de estimativa da concentração de nematoide/cm³ formado pela banda do infravermelho próximo. B- Modelo não linear de estimativa da concentração de nematoide/cm³ formado pelo índice NDVI.



6.2.5 Validação dos modelos predição e mapeamento das áreas de concentração de nematoides/cm³.

O desempenho dos modelos de predição, para concentração de nematoides/cm³ no solo expressos pelo erro médio quadrático, são apresentados nos gráficos da Figura 30. O gráfico 30A apresenta o modelo empírico gerado a partir da regressão linear múltipla e o gráfico 30B para a regressão linear simples.

Figura 30. RMSE para o modelo linear múltiplo (A) e para o modelo linear simples (B).



O modelo gerado por regressão linear múltipla apresentou um RMSE de 49,98 nematoides/cm³ e um erro de 21,89%. Já o RMSE apresentado pelo modelo linear simples foi maior, 54,91 nematoides/cm³, e com um erro de 24,54%. Diante dos valores apresentados, espera-se que o RMSE e o erro apresentado pelo modelo gerado pela regressão simples seja

de fato maiores, considerando-se que este modelo apresentou um coeficiente de determinação menor.

A Tabela 9 apresenta os parâmetros estatísticos encontrados para o teste de hipótese *t-Student* aplicado para os resíduos dos modelos empíricos.

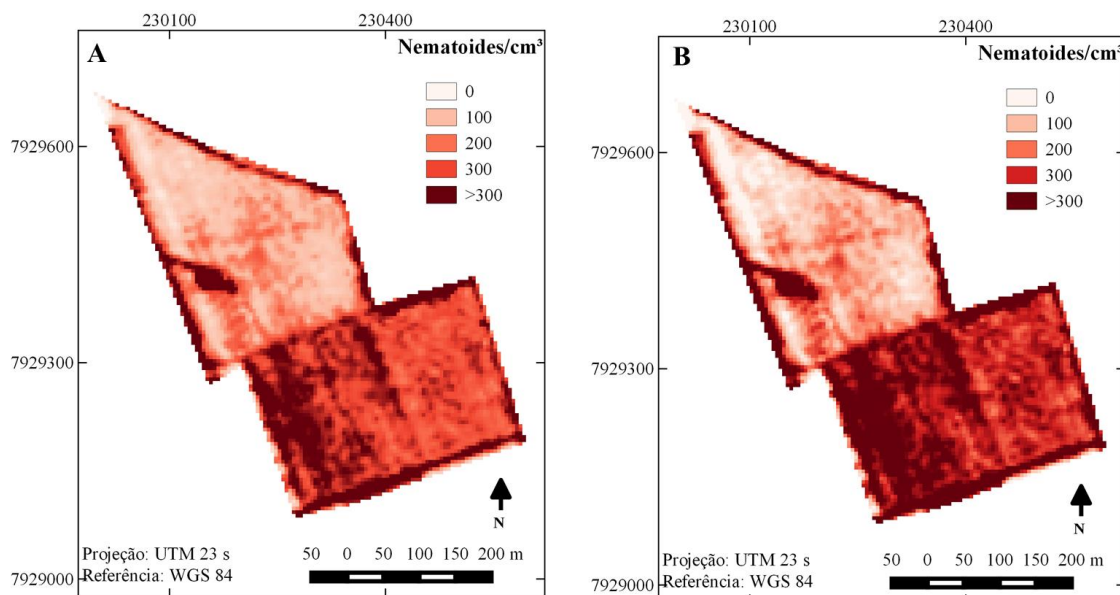
Tabela 9. Teste de normalidade para a estimativa dos modelos empíricos.

Modelo Empírico	$t_{\text{tabelado}, \alpha=5\%}$	$t_{\text{calculado}, \alpha=5\%}$	Hipótese
$y=1928,49+0,481078*B4-$ $1122,82*NDVI_{3,4}$	174,9	47,4	Aceita-se H_0
$y=1928-0,573*B4$	181,6	61,4	Aceita-se H_0

A partir do teste de hipótese *t-Student*, o $t_{\text{calculado}}$ foi menor que o tabelado para os dois modelos empíricos de estimativa. Neste caso, o teste *t-Student* não apontou tendência, aceitando-se a hipótese H_0 .

A Figura 31 apresenta os mapas cor-valor de concentração de nematoides/cm³ no solo gerado a partir dos modelos de regressão linear (31A) e linear múltipla (31B).

Figura 31 A- Mapa cor-valor de concentração de nematoides/cm³ obtido a partir do modelo empírico de regressão linear múltipla; B- Mapa cor-valor de concentração em nematoides/cm³ obtido a partir do modelo de regressão linear múltipla.



Ao analisar os dois mapas, nota-se que, na porção superior dos talhões, estão situadas as áreas de menor concentração de nematoides/cm³ e, na região inferior, as áreas com maior

concentração. Especificamente no talhão inferior, há picos de concentração (>300) na porção central, na extremidade esquerda e em áreas de solo exposto (carreadores).

Em relação à geometria das áreas de pico de concentração, observa-se, com maior nitidez no mapa A, que as manchas acompanham o traçado das linhas de cultivo, caracterizadas por linhas transversais que cortam o talhão. A causa para este padrão de dispersão pode estar associada ao uso de implementos agrícolas, que, no manejo da cultura, percorrem as linhas de cultivo disseminando o patógeno.

Em estudos como em Wolcott et al. (2005), a partir de um modelo empírico de estimava com uso de valores NDVI, as áreas de maiores concentrações de nematoide/cm³, em uma cultura de pinheiros em constante manejo agrícola, também seguiram o padrão geométrico de linhas de cultivo.

Especificamente no mapa B, observa-se que as áreas sem nematoides (concentração=0) e aquelas com concentração máxima foram mais expressivas que no mapa A. Neste último mapa, as classes de concentração foram suavizadas, e passou a predominar as áreas com concentração entre 200 a 300 nematoides/cm³. Em termos gerais, mesmo com visíveis discrepâncias observadas nos dois mapas, os dois modelos apontam ao uma mesma tendência na distribuição espacial das áreas de maior concentração de nematoides/cm³.

Considerando o elevado custo de análises nematológicas em amostras de solo e raízes, a possibilidade de estimar a concentração de nematoides/cm³ a partir da resposta espectral das folhas do cafeeiro torna-se uma alternativa viável no âmbito da agricultura de precisão, uma vez que, a partir dos modelos empíricos foi possível estimar essa concentração com um erro mínimo de 21,89% e representar de forma fiel à geometria típica da distribuição espacial da população de nematoides em uma área infestada.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O método desenvolvido e adotado nesta pesquisa, que incluiu medidas hiperespectrais em laboratório e no nível de dossel (*in situ*), além de valores de reflectância de superfície extraídos de imagens multiespectrais com resoluções espaciais diferentes, possibilitou a discriminação de dois níveis de infecção por nematoides na cultura cafeeira. Mesmo que a componente multiescala tenha sido avaliada em experimentos distintos, foi possível confirmar a hipótese de que as abordagens baseadas no sensoriamento remoto são adequadas para o monitoramento da cultura cafeeira infectada por nematoides e identificação dos estágios de infecção.

Um aspecto fundamental na agricultura de precisão, no que diz respeito ao acompanhamento das condições fitossanitárias da planta e gestão da cultura, é o mapeamento da distribuição espacial das áreas agrícolas infectados por pragas e parasitas. No caso dos nematoides, a delimitação da área infectada é impedida pela manifestação tardia dos sintomas na aérea da planta.

Para parasitas do sistema radicular, como o dano da raiz torna-se visível na folhagem em diferentes estágios de desenvolvimento da planta, o uso de índices biofísicos, como LAI, conteúdo de biomassa e SPAD, não possibilitou a diferenciação de cafeeiros sadios e infectados. As medidas hiperspectrais realizadas nas mesmas folhas, avaliadas por índices biofísicos, apontaram a possibilidade de discriminar café sadio e dois níveis de infecção por nematoides (inicial e severamente infectados) na região espectral do infravermelho próximo uma vez que esse intervalo espectral é sensível a alterações na estrutura interna de a folha. À medida que se estendeu a largura espectral dos dados espectrorradiométricos para simular bandas do sensor multiespectral RapidEye, as variações nos intervalos de comprimento de onda do espectro visível ainda permitiram diferenciar as três condições anteriores.

As curvas de reflectância, obtidas em laboratório e por radiometria de campo, para o café sadio, início de infecção e severamente infectado apresentaram diferenças em magnitude. Para as curvas obtidas em laboratório, o espectro de folhas de café sadio e em início de infecção teve um comportamento padrão, porém folhas de plantas severamente infectadas resultaram em valores médios de FRHC maiores em toda região do visível. No infravermelho próximo, café em início de infecção e severamente infectado mantiveram patamares similares de reflectância, consideravelmente menores que café sadio.

No caso das curvas obtidas por espectrorradiometria de campo, mesmo apresentando maiores valores de reflectância ao longo de todo o visível, o comportamento espectral do

cafeeiro sadio foi similar àquele em início de infecção, mas o pico de reflectância no verde foi praticamente imperceptível, principalmente no café severamente infectado. Na região de infravermelho próximo, as três condições foram separáveis, observando-se maiores valores para o café sadio e menores para severamente infectado.

A FRHC obtido em laboratório e simulado para as bandas do sensor RapidEye, apresentou alto grau de correspondência com a reflectância de superfície dessa imagem, definindo as bandas do vermelho limítrofe e do infravermelho próximo como apropriadas para a discriminação entre o café sadio e infectado por nematoides. A classificação não supervisionada dessas bandas espectrais e da imagem NDVI mapeou as três classes de interesse (além de solo exposto) com um coeficiente de concordância kappa igual a 0,71. Esse grau de concordância apenas satisfatório pode ser explicado, em grande parte, ao maior grau de confusão que ocorreu entre as classes café severamente infectado e solo exposto (acurdo produtor igual a 50%) resultante do aparecimento de clareiras nos talhões de café, em decorrência da morte de plantas pela ação drástica de nematoides.

A reflectância de superfície extraída das bandas do visível e infravermelho próximo do sensor OLI/Landsat 8 foram bastante homogêneos e discrepantes em relação aos valores de reflectância simulada obtida no nível de dossel. Considerando a resolução espacial de 30 metros do sensor OLI esse resultado era esperado, uma vez que a medida sobre o dossel foi realizada pontualmente. A classificação da imagem OLI/Landsat 8, que inclui uma banda do infravermelho médio ao invés do vermelho limítrofe, resultou em coeficiente kappa de 0,41, ou seja, apenas regular.

A partir do modelo das variações nutricionais da folha do cafeeiro infectado, detectadas pela imagem RapidEye, foi possível estimar quantitativamente a concentração de nematoides/cm³ no solo com um erro mínimo consideravelmente alto (21,89%). O modelo empírico que obteve o melhor desempenho foi formulado pela associação da banda do infravermelho próximo com o índice multiespectral formado pela diferença normalizada entre a banda do vermelho limítrofe e do vermelho.

Para uma cultura perene como o café e um patógeno com baixa mobilidade no solo como os nematoides, cujo manejo consiste, basicamente, de prevenir a sua multiplicação e o transporte do solo infectado para outros talhões, o mapeamento de áreas infectadas e identificação dos focos de infestação de nematoides é um componente essencial de controle do parasita e, nesse sentido, as imagens RapidEye atendem essa condição.

Em síntese, os resultados obtidos mostram que há diferenças significativas entre as características espectrais dentre os diferentes níveis de infecção, e que tais discrepâncias apresentam diferentes magnitudes à medida que o sensor radiométrico se distancia da superfície física por razão de fatores relacionados efeitos atmosféricos, inclinação das folhas e influência de alvos abaixo dossel.

Como recomendação para pesquisas futuras, é importante dispor de uma única área experimental na qual o conjunto de dados completo pudesse ser analisado, para os diferentes níveis de aquisição, a fim de avaliar as diferenças espectrais entre eles para um mesmo tratamento.

Sugerem-se definições de novos protocolos de aquisição de curvas espectrais *in situ*, que permita a coleta de dados hiperespectrais do dossel da vegetação de maneira mais controlada, onde as diferenças absolutas entre a reflectância hemisférica de folhas do cafeeiro e a reflectância bidirecional do dossel sejam minimizadas. Assim, em trabalhos desta natureza recomendam-se, análises das variações da resposta espectral da cultura cafeeira em função de diferentes posições e geometrias de aquisição das medidas radiométricas *in situ*.

Além do mais, o uso de imagens de alta resolução espacial tomadas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) traria uma perspectiva adicional no mapeamento de nematoides na cultura cafeeira. Nessa perspectiva, espera-se uma melhor discriminação entre as áreas de infecção severa, áreas de solo exposto e de áreas infectada por outros patógenos que causam sintomas na cultura cafeeira semelhantes àqueles causados por nematoides. Porém, para um levantamento desse tipo é fundamental dispor de um *payload* que permita adquirir imagens multiespectrais com número de bandas compatível com o sistema RapidEye (pelo menos) e sistemas de posicionamento e inercial que possibilitem a ortorretificação das imagens. No mais, é necessário prever mecanismos para realizar a calibração radiométrica das imagens e outros ajustes dessa natureza.

REFERÊNCIAS

ABAWI, G. S.; CHEN, J. Concomitant pathogen and pest interactions. **Plant and nematode interactions**. Madison: American Society of Agronomy. p. 135-158, 1998.

ADELABU, S. et al. Evaluating the impact of red-edge band from Rapideye image for classifying insect defoliation levels. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 95(0): 34-41. 2014.

ADLER-GOLDEN et al., S.M., M.W. Matthew, L.S. Bernstein, R.Y. Levine, A. Berk, S.C. Richtsmeier, P.K. Acharya, G.P. Anderson, G. Felde, J. Gardner, M. Hoke, L.S. Jeong, B. Pukall, A. Ratkowski and H.K. Burke, Atmospheric Correction for Short-wave Spectral Imagery Based on MODTRAN4, **Summaries of the Eighth Annual JPL Earth Science Workshop**, Vol. I, 1999.

ALLARD, G.b.; MOORE, D.. Heterorhabditis sp. nematodes as control agents for coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Scolytidae). **Journal Of Invertebrate Pathology**, [s.l.], v. 54, n. 1, p.45-48, jul. 1989.

ANDERSON, K. et al. On the reproducibility of field-measured reflectance factors in the context of vegetation studies. **Remote Science Of Environment**, p. 1893-1905. 15 ago. 2011.

ANTUNES, M. A. H. **Avaliação dos modelos Suits e Sail no estudo da reflectância da soja (Glycine max (L.) Merrill)**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Jose dos Campos, 1992.

APAN, A.; HELD, A.; PHINN, S.; MARKLEY, J. Detection of sugarcane ‘orange rust’ disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. **International Journal of Remote Sensing**, 25, pp. 489–498, 2004.

ASHOURLOO, Davoud et al. Developing an Index for Detection and Identification of Disease Stages. **Ieee Geoscience And Remote Sensing Letters**, [s.l.], v. 13, n. 6, p.851-855, jun. 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

AVELINO, Jacques et al. Relationships between agro-ecological factors and population densities of *Meloidogyne exigua* and *Pratylenchus coffeae* sensu lato in coffee roots, in Costa Rica. **Applied Soil Ecology**, [s.l.], v. 43, n. 1, p.95-105, set. 2009.

BARROS, A.f. et al. Root-knot nematodes, a growing problem for Conilon coffee in Espírito Santo state, Brazil. **Crop Protection**, [s.l.], v. 55, p.74-79, jan. 2014.

BARSI, J.A. *et al.* The Spectral Response of the Landsat-8 Operational Land Imager. **Remote Sensing**, v. 6, p. 10232-10251, 2014.

BATISTA, G. I.; DIAS, N. W. **Introdução ao Sensoriamento Remoto e ao Processamento Digital de Imagens**. São José dos Campos, 2005.

BELASQUE JUNIOR, J.; GASPAROTO, M. C. G.; MARCASSA, L. G.. Detection of mechanical and disease stresses in citrus plants by fluorescence spectroscopy. **Appl. Opt.**, [s.l.], v. 47, n. 11, p.1922-1926, 7 abr. 2008.

BECK, P. S. A et al., **The feasibility of detecting trees affected by Pine Wood Nematode using remote sensing**. Europe Commission. Joint Research Centre. Institute of Environment and Sustainability, Italy. 2015. 34p.

BLACKBRIDE. PLANET. RapidEye™ imagery product specifications, 2016. Disponível em: <https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/160625-RapidEye%20Image-Product-Specifications.pdf>. Acesso: 15 de novembro de 2016.

BOECHAT, Lorena Temponi. **TÉCNICA DE SENSORIAMENTO REMOTO NA DETECÇÃO DO MOFO BRANCO E DA MANCHA-ANGULAR NO FEIJOEIRO**. 2012. 128 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa, 2012.

CAMPOS, V.P. Controle de doenças causadas por nematoides. **Controle de Doenças de Plantas**. Vol. I Editora Universitária, Viçosa (MG), p.141-170. 1997

CAMPOS, V.P., SILVA, J.R.C. Management of *Meloidogyne* spp. in coffee plantations. In: Souza, R.M. (Ed.), **Plant-parasitic Nematodes of Coffee**. Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 149–164. 2008.

CARTER, G. A. Primary and Secondary effects of the water content of the spectral reflectance of leaves. **America Journal of Botany**, e.74, c.7, p.916-924, 1993.

CASTRO, J.M.C.; V.P. CAMPOS. Detecção de *Meloidogyne paranaensis* em cafeeiros do Sul de Minas Gerais. **Summa Phytopathologica**, 30 (4): 507. 2004.

CASTRO, José M.c. et al. Levantamento de Fitonematóides em Cafezais do Sul de Minas Gerais. **Nematologia Brasileira**, PIRACICABA-SP, v. 32, n. 1, p.56-64, 20 mar. 2008.

CIBULA, W. G.; CARTER, G. A. Identification of a far-red reflectance response to *Ectomycorrhizae* in Slash Pine. **International Journal of Remote Sensing**, e.13, c.5, p.925-932, 1992.

CHO, M. A.; SKIDMORE, A. K. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method. **Remote Sensing of Environment**, 101, 181–193, 2006.

CHO, Moses Azong et al. Potential utility of the spectral red-edge region of SumbandilaSat imagery for assessing indigenous forest structure and health. **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation**. p. 85-93. jan. 2012.

CHELINHO, Sónia et al. Integrated ecological risk assessment of pesticides in tropical ecosystems: A case study with carbofuran in Brazil. **Environmental Toxicology And Chemistry**, [s.l.], v. 31, n. 2, p.437-445, 21 dez. 2011.

CLEVERS, J. G. **Imaging Spectrometry in Agriculture: Plant Vitality and Yield Indicators**, Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic, 193-219, 1994.

CLEVERS, J. G. P.W.; DE JONG, S. M.; EPEM, G. F.; VAN DER MEER, F.; BAKKER, W. H.; SKIDMORE, A. K. Derivation of the red edge index using MERIS standard band setting. **International Journal of Remote Sensing**, 23 (16), 3169-3184, 2002.

COLTRI, Priscila Pereira et al. BIOMASSA DE CAFÉ ARABICA EM DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO E RADIAÇÃO SOLAR. **Xvi Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. Belo Horizonte, ago. 2009.

COLWELL, R. N. **Manual of Sensing Remote**, 2nd Edition. American Society of Photogrammetry. The Sheridan Press, New York, USA, 1985.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of Remotely sensed data: principles and practices**. Lewis publishers, Boca Raton, Florida, 137p, 1999.

DELALIEUX, Stephanie et al. Detection of biotic stress (*Venturia inaequalis*) in apple trees using hyperspectral data: Non-parametric statistical approaches and physiological implications. **European Journal Of Agronomy**, [s.l.], v. 27, n. 1, p.130-143, jul. 2007.

EITEL, J. U. H; VIERLING, L. A.; LITVAK, M. E.; LONG, D. S.; SCHULTHESS, U.; AGER, A. A.; KROFCHECK, D. J.; STOSCHECK, L. Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland. **Remote Sensing of Environment**. v. 115, i. 12, 15, p. 3640–3646, 2011.

ELBALDRI, G. A. A., et al. Evaluation of various plant extracts for their nematicidal efficacies against juveniles of *Meloidogyne incognita*. **Journal of Asia-Pacific Entomology** 11:99–102. 2008.

EMBRAPA, SILVA, Fábio Cesar da. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, Df: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 25 p

ENVI. **Atmospheric correction module: QUAC and FLAASH User's Guide**. ITT. Visual Information Solutions, 2009.

ESTEBAN-DÍEZ, I. et al. An evaluation of orthogonal signal correction methods for the characterisation of arabica and robusta coffee varieties by NIRS. **Analytica Chimica Acta**, Spain, n. , p.56-67, 3 mar. 2004.

FAVARIN, J. L. et al. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 6, p. 769-773, 2002.

FELDE, G. W.; ANDERSON, G. P.; ADLER-GOLDEN, S. M.; MATTHEW, N. W.; BERK, A. Analysis of Hyperion data with the FLAASH atmospheric correction algorithm. In: **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, Toulouse, 21–25 July. Proceedings... 2003, pp. 90–92, 2003.

FERRAZ, G. A. S.; SILVA, F. M. ; COSTA, P. A. N. da ; SILVA, A. C. ; CARVALHO, F. M. . **Agricultura de precisão no estudo de atributos químicos do solo e da produtividade de lavoura cafeeira**. *Coffee Science*, v. 7, p. 59-67, 2012.

FLUMIGNAN, D.L.; ADAMI, M.; FARIA, R.T. de. Área foliar de folhas íntegras e danificadas de cafeeiro determinada por dimensões foliares e imagem digital. **Coffee Science**, v.3, p.1-6, 2008.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3ªEdição, Inpe, 2011

GARRITY S. R.; ALLEN, C. D.; BRUMBY, S. P.; GANGODAGAMAGE, C. MACDOWELL, N. G.; CAI, D. M. Quantifying tree mortality in a mixed species woodland using multitemporal high spatial resolution satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, e. 129 p.54–65, 2013.

GERACE, A.D. *et al.* Increased potential to monitor water quality in the near-shore environment with Landsat's next-generation satellite. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 7, p. 1-18, 2013.

GRISHAM, M. P.; JOHNSON, R. M.; ZIMBA, P. V. Detecting Sugarcane yellow leaf virus infection in asymptomatic leaves with hyperspectral remote sensing and associated leaf pigment changes. **Journal of Virological Methods**. v.167, p.140–145, 2010

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; TREMBLAY, N.; ZARCO-TEJADA, P. J.; DEXTRAZE, L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v.81, p.416–426, 2002.

HAIR JR., J. F. et al. Análise multivariada de dados. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.

HILLNHÜTTER, C. et al. Remote sensing to detect plant stress induced by *Heterodera schachtii* and *Rhizoctonia solani* in sugar beet fields. **Field Crops Research**, p. 70-77. jan. 2011.

HIKISHIMA, M. CANTERI, M. G.; GODOY, C. V.; KOGA, L. J.; SILVA, A. J. Quantificação de danos e relações entre severidade, medidas de reflectância e produtividade no patossistema ferrugem asiática da soja. **Tropical plant pathology**, v. 35, n. 2, p.96-103., 2010

HAMZEH, S. et al. Estimating salinity stress in sugarcane fields with spaceborne hyperspectral vegetation indices. **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation**, [s.l.], v. 21, p.282-290, abr. 2013.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q. An Error and Sensivity Analysis of the Atmospheric and Soli-correcting Variants of the NDVI for the MODIS-EOS. **IEEE Trasactions on Geocience and Remote Sensing**. 32 (4): 897-905, 1994.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; ROFRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, G. Overview of the Radiometric and Biophysical Performace of the MODIS Vegetation Indeces. **Remote Sensing of Environment**, 83: 195- 213. 2002

HUNT, E. Raymond et al. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation**, [s.l.], v. 21, p.103-112, abr. 2013

IAC. **A luta contra a doença causada pelos nematoides parasitos do café**, Campinas, 2007.

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

JONES, Hamlyn G; VAUGHAN, Robin. **Remote sensing of vegetation**. Gra-bretanha: Oxford, Uk, 2010. 284 p.

JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. **Ecology** 50:663–666, 1969.

KAUFMAN, Y. J. The atmospheric effect on remote sensing and its correction. In: Asrar, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York: John Wiley & Sons, 1989. cap. 9, p. 336-428.

LINS, Emery C. et al. Detection of citrus canker in citrus plants using laser induced fluorescence spectroscopy. **Precision Agric**, [s.l.], v. 10, n. 4, p.319-330, 17 jun. 2009.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Editora Uniderp, Campo Grande-MS, 2007.

LIU, J.; PATTEY, E.; MILLER, J. R.; MCNAIRN, H.; SMITH, A.; HU, B. Estimating crop stresses, aboveground dry biomass and yield of corn using multi-temporal optical data combined with a radiation use efficiency model. **Remote Sensing of Environment**, e.114 p.1167–1177, 2010.

KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; DIETZ, J. B. Expert system-based mineral mapping in northern death valley, California/Nevada, using the Airbone Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). **Remote Sensing of Environment**, St. Paul, v.44, n. 2-3, p. 309 – 336, 1993.

MAHLEIN, A.K. et al. Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. **Remote Sensing Of Environment**, [s.l.], v. 128, p.21-30, jan. 2013.

MARCHIORATO, Ivo Aurélio. **MAPAS DE VARIABILIDADE DO POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE OBTIDOS POR SATÉLITES COMO INSTRUMENTOS AUXILIARES ÀS DECISÕES SOBRE O MANEJO DE NEMATÓIDES NA CULTURA DE SOJA**: Unesp. 2008. 55 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Unesp, Jaboticabal, 2008.

MARCASSA, L. G. et al. Fluorescence spectroscopy applied to orange trees. **Laser Physics**, [s.l.], v. 16, n. 5, p.884-888, maio 2006.

MARTINS, George Deroco. **CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL E ESPACIAL DE ÁREAS INFESTADAS POR NEMATOIDES E MIGDOLUS FRYANUS EM CULTURA CANAVIEIRA**. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Cartográfica, Unesp, Presidente Prudente, 2013.

MARTINS, George Deroco; GALO, Maria de Lourdes Bueno Trindade. Detecção de áreas infestadas por nematoides e *Migdolus fryanus* em cultura canavieira a partir de imagens multiespectrais Rapideye. **Revista Brasileira de Cartografia**, Brasília, v. 2, n. 66, p.285-301, 01 jun. 2014.

MARTINS, George Deroco; GALO, Maria de Lourdes Bueno Trindade. Caracterização hiperespectral in situ do cafeeiro infectado por nematoides. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015

MARTINS, George Deroco; GALO, Maria de Lourdes Bueno Trindade. **CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DA CANA-DE-AÇÚCAR INFECTADA POR**

NEMATOIDES E MIGDOLUS FRYANUS POR ESPECTRORRADIOMETRIA DE CAMPO. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, PR, v. 4, n. 21, p.783-796, 1 dez. 2015.

MARTONCHIK, J.V.; BRUEGGE, C.J.; STRAHLER A.H. A review of reflectance nomenclature used in remote sensing, **Remote Sensing Review** 19, 9-20, 2009.

MILTON, E. J. Principles of Field Spectroscopy. **Interanatioanl Journal of Remote Sensing**, e.8, c. 12, p. 1807-1827, 1987.

MILTON, E.J.; SCHAEPMAN, M.E.; ANDERSON, K.; KNEUBUHLER, M.; FOX, N. Progress in field spectroscopy. **Remote Sensing of Environment** 113 S92-S109, 2009.

MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, p. 1-14, 2012

NAUE, Carine Rosa et al. Sensoriamento remoto como ferramenta aos estudos de doenças de plantas agrícolas: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**.Recife, p. 190-195. jan. 2010.

NEVES, Orlando Sílvio Caires et al. Uso do SPAD-502 na avaliação dos teores foliares de clorofila, nitrogênio, enxofre, ferro e manganês do algodoeiro herbáceo. **Pesq. Agropec. Bras.** Brasília, p. 517-521. maio 2005.

NICODEMUS, F. E.; RICHMOND, J. C.; HSIA, J. J.; GINSBER, I. W.; LIMPERS, T. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance**. Washington, DC: National Bureau of Standards, US Department of Commerce, 1977.

NUTTER, F. W. et al. Use of Remote Sensing to Detect Soybean Cyst Nematode-Induced Plant Stress. **Journal Of Nematology**, 1, v. 34, n. 3, p.222-231, jan. 2002.

OMARJEE, J., BALANDREAU J., SPAULL, V.W.; CADE, P. Relationships between Burkholderia populations and plant parasitic nematodes in sugarcane. **Applied Soil Ecology**, Volume 39, Issue 1, P.1-14, 2008.

OLIVEIRA, D. A., Análise Geoambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Perdizes – Minas Gerais. **Trabalho de Conclusão de Curso em Geografia pela Universidade Federal de Uberlândia-MG**.123 p. 2010.

OUMAR, Z.; MUTANGA, O.; ISMAIL, R.. Predicting Thaumastocoris peregrinus damage using narrow band normalized indices and hyperspectral indices using field spectra resampled to the Hyperion sensor. **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation**, [s.l.], v. 21, p.113-121, abr. 2013.

OUMAR, Zakariyyaa; MUTANGA, Onisimo. Integrating environmental variables and WorldView-2 image data to improve the prediction and mapping of Thaumastocoris peregrinus (bronze bug) damage in plantation forests. **Isprs Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing**, [s.l.], v. 87, p.39-46, jan. 2014.

PERIN, L.; MARTINEZ-AGUILAR, L.; CASTRO-GONZALES, R.; ESTRADA-DE LOS SANTOS, P.; CABELLOS-AVELAR, T.; GUEDES, H. V.; REIS, V. M.; CABELLERO-MELLADO, J. Diazotrophic Burkholderia species associated with field- grown maize and sugarcane. *Appl. Environ. Microbiol.* 72, 3103–3110., 2006.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos, SP. Editor Parêntese, 2007.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos, SP. Editor Parêntese, 2015.

PRABHAKAR, M. et al. Use of ground based hyperspectral remote sensing for detection of stress in cotton caused by leafhopper (Hemiptera: Cicadellidae). **Computers And Electronics In Agriculture**, [s.l.], v. 79, n. 2, p.189-198, nov. 2011.

QIN, Zhihao et al. Detection of rice sheath blight for in-season disease management using multispectral remote sensing. **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation**, [s.l.], v. 7, n. 2, p.115-128, ago. 2005.

RAMOELO, Abel et al. Regional estimation of savanna grass nitrogen using the red-edge band of the spaceborne RapidEye sensor. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.19 p.151–162, 2012

RAMOELO, Abel et al. Potential to monitor plant stress using remote sensing tools. **Journal of Arid Environments**, v. 115, n. 1, p.134-144, 2015.

RICHTER, R. **Atmospheric correction algorithm for flat terrain: Model ATCOR2**. Wessling: Geosystems, 2000.

ROBINSON, B. R.; BIEHL, L. L. Calibration procedures for measurement of reflectance factor in remote sensing field research, **Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.** p.16-20, 1979.

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.

SABINS, F. F.; **Remote Sensing Principles and Interpretation**, Third Edition, Long Grove, Illinois, 2007.

SANCHES I. D.; SOUZA FILHO, C. R.; MAGALHÃES, L. A.; QUITÉRIO, G. C. M.; ALVES M. N.; OLIVEIRA, W. J. Unravelling remote sensing signatures of plants contaminated with gasoline and diesel: An approach using the red edge spectral feature. **Environmental Pollution** e.174, p.16-27, 2013.

SANCHES, Ieda Del'arco; SOUZA FILHO, Carlos Roberto; KOKALY, Raymond Floyd. Spectroscopic remote sensing of plant stress at leaf and canopy levels using the chlorophyll 680nm absorption feature with continuum removal. **Isprs Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing**, [s.l.], v. 97, p.111-122, nov. 2014.

SANTOS JUNIOR, Renato F. dos et al. DETECÇÃO DE Heterodera glycines EM PLANTIO DE SOJA MEDIANTE ESPECTRORRADIOMETRIA NO VISÍVEL E INFRAVERMELHO PRÓXIMO. **Fitopatologia Brasileira**. p. 355-360. 1 jun. 2002.

SCHAEPMAN-STRUB, G.; SCHEPMAN, M. E.; PAINTER, T. H.; DANGEL, S.; MARTONCHIK J. V.; Reflectance Quantities in Optical Remote Sensing - Definitions and Case Studies, **Remote Sensing of Environment**, 103 (1), 27-42, 2006.

SCHERLEF, M. et al., Remote Sensing of Forest Biophysical Variables Using HyMap Imaging Spectrometer Data. **Remote Sensing of Environment**, 95:177-194, 2005.

SILVA, Rodrigo V. et al. Primeiro Relato da Ocorrência de *Meloidogyne paranaensis* em Cafeeiro no Estado de Goiás. **Nematologia Brasileira**, Piracicaba, Sp, v. 2, n. 33, p.187-190, 9 dez. 2008.

SILVA, Alexandre José da et al. A refletância na estimativa do efeito de fungicidas no controle da ferrugem asiática da soja. **Summa Phytopathol.**, [s.l.], v. 35, n. 1, p.53-56, fev. 2009.

.

SHAFRI, H. Z. M.; HAMDAN N. Hyperspectral Imagery for Mapping Disease Infection in Oil Palm Plantation Using Vegetation Indices and Red Edge Techniques. **American Journal of Applied Sciences**, v.6, p.1031-1035, 2009.

SLATER, P.N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Reading, MA, Addison-Wesley, 575p, 1980

SOUZA, S.E. et al. Levantamento preliminar de *Meloidogyne* em cafeeiros do Estado da Bahia Planalto de Vitória da Conquista e Chapada Diamantina. In: **Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, I, Poços de Caldas (MG), p. 167-170, 2000.

STREIT, M.N. et al. As clorofilas. **Ciência Rural**, v.35, n.3, p.748-755, 2005.

SUGAWARA, L. M., RUDORFF, B. F. T. Sugarcane yield penalization indicator estimated by an agronomic model. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011. Vancouver. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011.

SWIADER, J.M.; MOORE, A. SPAD - chlorophyll response to nitrogen fertilization and evaluation of nitrogen status in dryland and irrigated pumpkins. **Journal of Plant Nutrition**, v. 25, p.1089-1100, 2002.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing: models and methods for image processing**. V. 3. London: Academic Press, 2006

THENKAIBAIL, P. S. et al. Hyperspectral remote sensing of vegetation. CRS PRESS. EUA, 2011, 782p.

USHA, K.; SINGH, Bhupinder. Potential applications of remote sensing in horticulture-A review. **Scientia Horticulturae**,[s.l.], v. 153, p.71-83, abr. 2013.

USGS. United States Geological Service. **Provisional Landsat 8 surface reflectances product**. 2015. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/documents/provisional_l8sr_product_guide.pdf>. Acesso em 15 de novembro de 2016.

VAAST, P. H.; CASWELL-CHEN, E. P; ZASOSKI, R. J. Effects of two endoparasitic nematodes (*Pratylenchus coffeae* and *Meloidogyne konaensis*) on ammonium and nitrate uptake by Arabica coffee (*Coffea arabica* L.). **Applied Soil Ecology**, [s.l.], v. 10, n. 1-2, p.171-178, out. 1998.

VIEIRA, T. G. C.; ALVES, H. M. R.; LACERDA, M. P. C. Parâmetros culturais para avaliação do comportamento espectral da cultura do café (*coffea arábica*) em Minas Gerais, In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SENSORIAMENTO REMOTO, **Anais XI SBSR**, Belo Horizonte: INPE, p. 247-254, 2003.

YANG, Z. et al. Using ground-based multispectral radiometry to detect stress in wheat caused by greenbug (Homoptera: Aphididae) infestation. **Computers And Electronics In Agriculture**, [s.l.], v. 47, n. 2, p.121-135, maio 2005.

VILLATE, L. et al. Spatial Distribution of the Dagger Nematode *Xiphinema* index and Its Associated Grapevine fan leaf virus in French Vineyard. **Phytopathology**, [s.l.], v. 98, n. 8, p.942-948, ago. 2008.

WOLCOTT, Maurice; OVERSTREET, Charles. EVALUATING COTTON NEMATICIDE RESPONSE ACROSS SOIL ELECTRICAL CONDUCTIVITY ZONES USING REMOTE SENSING. **Beltwide Cotton Conferences**, New Orleans, Louisiana, v. 7, n. 4, p.215-220, 7 jan. 2007.

ZHANG, Minghua et al. Detection of stress in tomatoes induced by late blight disease in California, USA, using hyperspectral remote sensing. **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation**, [s.l.], v. 4, n. 4, p.295-310, nov. 2003.

ZOTARELLI, L.; CARDOSO, E.G.; PICCINI, J.L.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; TORRES, E.; ALVES, B.J.R. **Calibração do medidor de clorofila Minolta SPAD-502 para uso na cultura do milho**. Rio de Janeiro: Embrapa Agrobiologia, 4p. (Comunicado técnico, 55). 2003.

ZULLO, J. **Correção Atmosférica de Imagens de Satélite e Aplicações**. 1994. 190 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Campinas, Campinas. 1994.