

ERNANE MIRANDA LEMES

SENSORIAMENTO REMOTO PARA DETECÇÃO DE SERINGAIS
INFESTADOS POR *Meloidogyne exigua*

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Fitotecnia, para obtenção do título de “Doutor”.

Orientador

Prof. Lísias Coelho, PhD.

UBERLÂNDIA, MG

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

L552s Lemes, Ernane Miranda, 1982
2017 Sensoriamento remoto para detecção de seringais / Ernane Miranda
Lemes. - 2017.
68 p.

Orientador: Lísias Coelho.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Agronomia.
Inclui bibliografia.

1. Agronomia - Teses. 2. Nematóide de galha - Teses. 3. Seringueira
- Doenças e pragas - Teses. 4. Sensoriamento remoto - Agricultura -
Teses. I. Coelho, Lísias. II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

CDU: 631

ERNANE MIRANDA LEMES

SENSORIAMENTO REMOTO PARA DETECÇÃO DE SERINGAIS
INFESTADOS POR *Meloidogyne exigua*

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Fitotecnia, para obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 22 de fevereiro de 2017

Prof. ^a Dra. Maria Amélia dos Santos	UFU
Prof. Dr. Roberto Rosa	UFU
Prof. Dr. José Luiz Rodrigues Torres	IFTM Uberaba
Dr. Jaime Maia dos Santos	FCAV-UNESP

Prof. Lísias Coelho, PhD.
ICIAG – UFU
(Orientador)

UBERLÂNDIA, MG

2017

AGRADECIMENTOS

É uma tarefa difícil agradecer à todos que contribuíram durante esta jornada acadêmica que se iniciou no “prézinho” e que se conclui agora com esta tese de doutorado. Ninguém se forma sozinho, nem tão pouco é moldado por só um punhado de professores e, mesmo que não seja perceptível, tenho consciência de que cada pessoa que participou dessa trajetória teve uma contribuição importante para a minha formação. Meus colegas de classe, professores, técnicos e funcionários, todos me ensinaram detalhes da vida que não se aprendem dentro da sala de aula. Mas meus agradecimentos não poderiam se iniciar sem antes prestar minhas homenagens aos meus pais, Arlindo Lemes Coelho e Nilza Maria Miranda Coelho, que me forneceram o alicerce de tudo que sou hoje. Dizer apenas “obrigado” seria pouco para expressar como sou grato por tê-los como família. Para expressar mais que só um agradecimento, é que lutei esforçadamente para atingir esta conquista.

Aos professores que cito aqui eu digo que cumpriram sua missão na minha formação, e por isso também sou grato. Obrigado professora Maria José D.C., por ser o *starting point* do pesquisador que sou hoje. Sem seus conselhos, sua crença em mim, talvez tudo seria diferente, sou eternamente agradecido. Aos professores Lawrence E. Datnoff, Regina M. Q. Lana, J. G. Mageste, Gaspar H. Korndörfer, Odair Marques, Denise Santana, Ann Blount, Césio Humberto de Brito, Carlos Machado, Gilberto F. Corrêa, José L. Torres, Joaquim de Carvalho, Nilvanira D. Tebaldi, Alison T. M. Lima, Maria Amelia dos Santos, Jim Marois, Adriane de Andrade, Cheryl Mackowiak, e Reginaldo de Camargo, muito obrigado pela experiência, pelos ensinamentos e a amizade compartilhada. Todo este agradecimento estende-se também ao meu orientador, professor Lísias Coelho, que além de um grande professor, é um excelente amigo. Ensinou-me a ter paz e serenidade em momentos conturbados, e o valor do convívio pacífico e fraternal. Obrigado pela paciência e companheirismo.

Aos amigos Lara, Diego, Daniel, Emmerson, João Eduardo, Matheus Aires, Fernando, Gaby, Ingrid, Aldeir, Luciana, Aurilene, Arthur, Douglas, Alyne, Adílio, Marcelo, Rafael, Leonardo, Roberto, Marcos, Márcia, Ariel, Erick, Morgana, Bruno Nichio, Mara, Camila, Roberta Camargos, Cezar, Thales Casemiro, Samuel, Igor Forigo, Guilherme, obrigado pelo apoio e ajuda durante este doutorado, e pela amizade. Obrigado João Ricardo pela camaradagem, parceria e convivência fraterna. Àqueles amigos da vida, Bruno Cassiano, Guilherme Silva, Túlio, Thales, Rosana Harumi,

Lúcio, Philippe, Gabrielle, Tiago, Luíza, um forte abraço e meu agradecimento por passarem ou ainda estarem em minha vida.

Contudo, existem pessoas que passam por nossas vidas e nos deixam marcas perpétuas. São pessoas que promovem grandes mudanças em nossa personalidade, na atitude que assumimos, e o que valorizar em si e na vida.

A você, RLAC, com quem aprendi muito sobre mim, sobre meus limites e o que valorizar nas pessoas, o meu agradecimento sincero e o desejo de que seja feliz aonde quer que você esteja.

Maria Júlia, minha companheira, quero expressar meu agradecimento pela parceria e suporte em todos os momentos, pela compreensão nos momentos de pressa, e pelo porto seguro que é para mim, obrigado. E minha admiração por esta pessoa incrível que é você, poucas pessoas são assim e me sinto um privilegiado.

Agradeço à CAPES, que sem a qual eu não teria condições de concluir este doutorado. Agradeço também imensamente à University of Florida que me convidou para o mestrado em Fitopatologia, e à Universidade Federal de Uberlândia que me possibilitou formar Engenheiro Agrônomo e doutor em Agronomia.

Finalmente, aos que fui ingrato em não lembrar aqui de suas inestimáveis contribuições, o meu pedido de perdão, e minha mais honesta gratidão. Obrigado, sou muito agradecido a todos que me ajudaram a ser uma pessoa melhor, um pesquisador criterioso e um formador de opinião para as gerações por virem.

Agradeço profundamente e digo que sou FELIZ pelo que todos fizeram por mim. À todos vocês, DEDICO.

SUMÁRIO

	LISTA DE FIGURAS.....	i
	LISTA DE TABELAS.....	iii
	RESUMO.....	iv
	ABSTRACT.....	v
1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1	A seringueira.....	3
2.2	Patologias da seringueira.....	7
2.3	Nematoídes.....	8
2.4	Nematoíde de galhas na seringueira.....	9
2.5	Parasitismo e ciclo do nematoíde de galhas da seringueira.....	10
2.6	Danos do nematoíde de galhas à seringueira.....	12
2.7	Sensoriamento remoto.....	14
2.8	Radiância e reflectância.....	15
2.9	Índices espectrais de vegetação.....	17
2.10	Índice de vegetação por diferença normalizada.....	18
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1	Caracterização das áreas.....	20
3.2	Clone de seringueira.....	22
3.3	Georreferenciamento e amostragem.....	22
3.4	Análise nematológica.....	25
3.5	Imagens de satélite.....	28
3.6	Análise estatística.....	29
3.7	Programas utilizados.....	30
4	RESULTADOS.....	32
5	DISCUSSÃO.....	44
5.1	Áreas experimentais e estatística descritiva.....	44
5.2	Amostragem e dispersão dos dados.....	47
5.3	Correlações com nematoídes e índices espectrais.....	49
6	CONCLUSÕES.....	53
	REFERÊNCIAS.....	54

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- FIGURA 1- Morfologia da folha, das flores e da cápsula que contém três frutos e sementes da seringueira (*H. brasiliensis*)..... 4
- FIGURA 2- Mudas de seringueira suspensas e germinadas em sacos plásticos com substrato sem solo. Essas mudas são cultivadas para serem portas-enxerto (“cavalos”) de clones (“cavaleiros”) produtivos enxertados nas plantas ainda na sacola plástica ou posteriormente a campo..... 6
- FIGURA 3- Conformações perineais de fêmeas de *Meloidogyne exigua*, raça 3, extraídos de seringueira: **A)** microscopia eletrônica de varredura evidenciando as espessas estrias; **B-D)** microscopia de luz evidenciando o arranjo das estrias. 10
- FIGURA 4- Ciclo biológico do nematoide de galhas (*Meloidogyne exigua* raça 3) na seringueira. 11
- FIGURA 5- Sintomas da infestação de *M. exigua* em seringueira: **A)** seringueiras com porte reduzido e copa rala; **B)** e **C)** raízes de seringueira com galhas e necroses. Barra: 2 cm. Fazenda A. 2015. Fonte: A: Coelho, L; B, C: Lemes, E. M. 13
- FIGURA 6- Espectro eletromagnético. Fonte: adaptado de Biro Eموke (Shutterstock). Disponível em: <<http://www.livescience.com/38169-electromagnetism.html>>..... 15
- FIGURA 7- Comportamento da reflectância de plantas saudáveis e estressadas. 16
- FIGURA 8- Localização das duas fazendas desse trabalho com *Meloidogyne exigua* em seringueira. 20
- FIGURA 9- Médias pluviométricas (mm) e de temperatura do ar (°C), mensais e anual para a Fazenda A e a Fazenda B. 21
- FIGURA 10- Mapa NDVI em cores falsas de imagem LandSat 8 (pixel 30 m) das áreas na Fazenda A e na Fazenda B. Setas vermelhas indicam anormalidades inesperadas em áreas de seringal..... 23
- FIGURA 11- Localização dos pontos amostrados para as análises nematológicas na Fazenda A e na Fazenda B. 24
- FIGURA 12- Corte perineal de *Meloidogyne exigua* ao microscópio ótico (A), e gel de eletroforese para comprovação de *Meloidogyne exigua* (B)..... 26

FIGURA 13- Desfolha prematura das seringueiras (esquerda) e presença abundante de galhas nas raízes (direita). Fazenda A e Fazenda B, 2016.	27
FIGURA 14- Boxplots dos residuais dos índices espectrais NDVI e RS e densidades de nematoides no solo, raiz e total (solo + raiz) na Fazenda A.	32
FIGURA 15- Boxplots dos residuais dos índices espectrais NDVI e RS e densidades de nematoides no solo, raiz e total (solo + raiz) da Fazenda B.	33
QUADRO 1- Dispersão do índice NDVI versus as densidades de nematoides em dois seringais comerciais.	34
QUADRO 2- Dispersão do índice RS versus as densidades de nematoides em dois seringais comerciais.	35
FIGURA 16- Imagem em RGB da Fazenda A (fevereiro, 2014).	39
FIGURA 17- Imagens (falsa cor) NDVI e RS da Fazenda A (fevereiro, 2014).	40
FIGURA 18- Imagens (falsa cor) NDVI e RS da Fazenda B (fevereiro, 2014).	41
FIGURA 19- Imagem em RGB da Fazenda B (fevereiro, 2014).	42

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Informações técnicas sobre os satélites Rapid Eye® e sensor REIS instalado nos satélites.....	28
TABELA 2. Estatística descritiva das densidades de nematoides e índices espectrais em diferentes seringais.....	36
TABELA 3. Estatística de verificação da normalidade de distribuição dos resíduos dos dados sem <i>outliers</i> originais e transformados coletados nas duas fazendas.....	37
TABELA 4. Correlações entre os índices espectrais de vegetação NDVI ou RS e a densidade de nematoides no solo, raiz e total (solo + raiz) nas duas fazendas.....	38

RESUMO

LEMES, ERNANE MIRANDA. **Sensoriamento remoto para detecção de seringais infestados por *Meloidogyne exigua***. 2017. 68 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

A produção de borracha natural de seringueira (*Hevea brasiliensis*) é uma atividade estratégica para a economia nacional. O principal fator redutor da produtividade dessa atividade é a ocorrência de doenças no seringal. O nematoide de galhas (*Meloidogyne exigua*) é a principal doença radicular dessa cultura no Brasil e sua identificação antecipada permite um melhor manejo desta epidemia no seringal e a redução de seus prejuízos. O objetivo desse estudo foi identificar áreas com a ocorrência de *M. exigua* em seringais através do uso dos índices espectrais de vegetação - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Razão Simples (RS) - gerados a partir de imagens da constelação de satélites RapidEye® (resolução de 5 metros). Seringais produtivos, com pelo menos 7 anos de plantio, em Minas Gerais (irrigado) e em Goiás (não irrigado) foram amostrados e georreferenciados na segunda metade do período das chuvas e as densidades de nematoides no solo, nas raízes e total foram estimadas. O seringal em Minas Gerais foi amostrado inicialmente seguindo as anormalidades evidenciadas pelo índice NDVI gerado através de imagens do satélite Landsat 8 (resolução de 30 metros). O seringal em Goiás foi amostrado aleatoriamente com o intuito de validar os resultados observados no seringal em Minas Gerais. Apesar de serem identificadas regressões significativas com o uso de imagens de alta resolução (RapidEye®) entre as variáveis densidades de nematoides e os índices espectrais de vegetação, nenhuma apresentou coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,31. A estatística descritiva do conjunto de dados de ambos os seringais não identificou diferenças entre as áreas para as densidades de nematoides encontradas nas raízes ou a densidade total, no entanto, a densidade de nematoides no solo foi aproximadamente 236% superior no seringal em Goiás, enquanto que ambos os índices neste seringal foram inferiores aos índices estimados para o seringal em Minas Gerais. Esta diferença foi consequência da irrigação na área em Minas Gerais. As correlações de Pearson, Spearman e Kendall foram calculadas para as densidades de nematoides e os índices espectrais. As correlações entre a densidade de nematoides do seringal e o índice NDVI foram as que apresentaram os maiores coeficientes significativos para qualquer das correlações avaliadas. Através do índice NDVI é possível diferenciar um seringal não infestado de um seringal infestado pelo nematoide de galhas *M. exigua*.

Palavras-chave: Nematoide de galha. *Hevea brasiliensis*. NDVI. Índice razão simples. RapidEye.

Orientador: Prof. Lísias Coelho, PhD. – ICIAG-UFU

ABSTRACT

LEMES, ERNANE MIRANDA. **Remote sensing to detect *Meloidogyne exigua* in rubber tree**. 2017. 68 p. Dissertation (Doctor in Agronomy) – Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG.

The production of natural rubber from rubber trees (*Hevea brasiliensis*) is a strategic activity for Brazilian economy. The main factor reducing productivity of this activity is the occurrence of diseases in the rubber plantation. The root-knot nematode (*Meloidogyne exigua*) is the main root disease of this culture in Brazil and its early identification enables better management of its outbreak in orchards and the reduction of their losses. This study identified areas with the occurrence of *M. exigua* in rubber plantations through the use of spectral vegetation indices - Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Simple Ratio Index (SR) - generated from images of the constellation RapidEye® satellites (5 meters resolution). Productive rubber plantations, at least 7 years old, in Minas Gerais (irrigated) and Goiás (non-irrigated) states were sampled and georeferenced in the second half of the rainy season and the quantities of nematodes in soil, roots and total were estimated. The rubber plantation in Minas Gerais was sampled initially following the abnormalities detected by the NDVI index generated through the images of Landsat 8 satellite (30 meters resolution). The rubber plantation in Goiás was sampled randomly to validate the results observed in the first rubber plantation (Minas Gerais). In spite of the identification of significant regressions with the use of high resolution images (RapidEye®) between the variables quantities of nematodes and spectral vegetation indices, none showed a coefficient of determination (R^2) greater than 0.31. The descriptive statistics of the data set from both surveys did not identify differences in the quantities of nematodes found in the roots or the total quantity between the areas, however, the amount of nematodes in the soil was approximately 236% greater in Goiás rubber plantation, while both spectral vegetation indices (NDVI and SR) in this rubber plantation were lower than the indices estimated for the rubber plantation in Minas Gerais. This difference was a result of irrigation in the area in Minas Gerais. The correlations of Pearson, Spearman and Kendall were calculated between the densities of nematodes and the spectral vegetation indexes. The correlations between the amount of nematodes in rubber trees plantation and NDVI index showed the best significant coefficients for any of the correlations evaluated. Through the NDVI index it is possible to differentiate an infested rubber tree plantation from a non-infested rubber tree plantation by *M. exigua* root-knot nematode.

Key-words: Root-knot nematode. *Hevea brasiliensis*. NDVI. Simple ratio index. RapidEye.

Advisor: Prof. Lísias Coelho, PhD. – ICIAG-UFU

1 INTRODUÇÃO

A seringueira [*Hevea brasiliensis* (Willd. ex ADR. de Juss.) Muell.-Arg.] é uma árvore de origem amazônica que produz o látex do qual é fabricada uma borracha natural de alto desempenho e que devido às suas características físico-químicas possui inúmeras aplicações nas diversas áreas do conhecimento. A cultura da seringueira, ou heveicultura, é importante para a economia nacional e tem o potencial de garantir a independência da produção de borracha, um produto estratégico para o país. Contudo a produção de borracha da seringueira é consideravelmente prejudicada pela ocorrência de pragas no seringal.

Entre as pragas que ocorrem na heveicultura estão os nematoides, que afetam o sistema radicular da seringueira e prejudicam o desenvolvimento da árvore reduzindo sua produção de látex. O nematoide de galhas (*Meloidogyne exigua* Goeldi) é o causador de injúrias mais destrutivo das raízes da seringueira e ocorre em ampla distribuição nos seringais de vários estados brasileiros. Seus prejuízos podem chegar, além da redução da produção de látex, à morte da seringueira em elevadas infestações pela predisposição da planta ao ataque de outras doenças e pragas oportunistas. Outro agravante no caso de uma epidemia de nematoide de galhas no seringal é que as estratégias de controle dessa praga ainda não são completamente eficientes, são caras e ainda carecem de muitos estudos.

Uma das medidas que auxiliam no manejo do seringal e na contenção dos danos causados pelo nematoide de galhas da seringueira é a sua identificação precoce na área de ocorrência. Essa diagnose pode ser feita através de avaliações *in situ* da área, mas pela distribuição do nematoide em focos, e dependendo como está sendo conduzida a amostragem, a presença do nematoide pode não ser confirmada por causa de amostragens em pontos que ainda não apresentem sua ocorrência. Outra forma de identificar plantas estressadas e a presença de fitonematoides em uma área é através do uso de imagens de satélites compostas por diferentes bandas ou faixas do espectro eletromagnético. Essas bandas são utilizadas para calcular índices que são capazes de expressar o vigor da vegetação estudada.

Entre os índices espectrais de vegetação mais comumente utilizados para a identificação de anormalidades em uma lavoura estão, a Razão Simples (RS) que é uma razão entre a banda espectral do infravermelho e o vermelho, e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que é também uma composição aritmética das

bandas espectrais do infravermelho e do vermelho. Os mapas gerados por estes índices, devido ao comportamento peculiar da vegetação, são capazes de identificar áreas com vegetação saudáveis de áreas com algum problema. Desta forma, a utilização de imagens espectrais de satélite tem grande potencial no manejo dessa praga na seringueira, pois proporcionam um monitoramento rápido de extensas áreas e a identificação de anomalias que são georreferenciadas e podem facilmente ser rastreadas a campo.

Portanto, tendo como hipótese geral que uma infestação de nematoide de galhas no seringal causaria estresse à seringueira e seria confirmado através do uso de índices espectrais de vegetação.

O objetivo geral desse estudo é determinar se o sensoriamento remoto consegue identificar áreas com a ocorrência de *M. exigua* em seringueira através de índices espectrais de vegetação. Dessa forma, os objetivos específicos foram:

- estudar a significância de diferentes associações (correlações de Pearson, Spearman e Kendall, e regressões) entre as densidades de nematoides (solo, raiz e total) e os índices espectrais de vegetação;
- verificar se amostragens pontuais para a determinação da ocorrência e quantificação do nematoide de galhas na seringueira são suficientes para o estabelecimento de associações significativas entre a densidade de nematoides e os índices espectrais de vegetação; e,
- determinar se o uso das imagens da constelação de satélites RapidEye®, com alta resolução (5 m pixel⁻¹) é suficiente para o estabelecimento de associações significativas entre a densidade de nematoides e os índices espectrais de vegetação; e,
- investigar a distinção entre áreas infestadas pelo nematoide de galhas em um seringal via índices espectrais de vegetação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A seringueira

A seringueira, também conhecida por seringa, seringa-verdadeira, árvore da borracha, pau da borracha, seringueira-preta, seringueira-branca, seringueira-rosada e cauchu, é uma árvore lactescente originária da bacia do Rio Amazonas. Sua ocorrência e dispersão natural estão localizadas entre as latitudes de 3° N e 15° S, nas florestas de clima tropical-equatorial da Amazônia brasileira e em países como Bolívia, Colômbia, Equador, Guiana, Guiana Francesa, Peru, Suriname e Venezuela (WEBSTER; BALKWILL, 1989).

O cultivo comercial da seringueira, ou heveicultura, estende-se até latitudes de 25° S, no Brasil, e latitudes de 22° N, na Ásia, destacando a versatilidade dessa espécie em diversas condições ambientais (CAMARGO et al., 2003; PRIYADARSHAN, 2011). O melhor desenvolvimento de um seringal ocorre quando a pluviosidade varia entre 1.500 e 4.000 mm, e quando a temperatura média anual é igual ou superior a 20 °C, sendo 18 °C o limite inferior para o desenvolvimento economicamente viável da heveicultura (ALVARENGA e CARMO, 2014; CAMARGO et al., 2003; TRINDADE, 1982). Temperaturas iguais ou inferiores a 16 °C afetam negativamente as atividades metabólicas da seringueira resultando em paralisia do crescimento foliar e em baixas produtividades de látex e consequentemente de borracha natural (RODRIGO, 2007).

O gênero *Hevea* pertence à família das Euforbiáceas, que comporta outros gêneros como *Ricinus* (mamona), *Schefflera* (morototó) e *Manihot* (mandioca). A seringueira possui hábito arbóreo e pode atingir até 40 metros de altura, assim como outras espécies do gênero *Hevea*. É uma planta dicotiledônea, monóica, e semidecídua na estação seca. Sua madeira é branca, macia, leve (0,45 g cm⁻³) e de baixa durabilidade natural. As folhas são compostas, trifoliadas, pecioladas, as flores brancas a bege-claro, são unissexuais, diminutas e estão reunidas em amplas panículas do tipo racemo (Figura 1). O fruto da seringueira é uma grande cápsula com três sementes ricas em óleo. A produção de sementes se inicia a partir dos quatro anos da enxertia (LORENZI, 2002; WEBSTER; BALKWILL, 1989).

FIGURA 1 - Morfologia da folha, das flores e da cápsula que contém três frutos e sementes da seringueira (*Hevea brasiliensis*).



Fonte: ilustração de Franz Eugen Köhler, alemão. Data: 31 de dezembro de 1896 (domínio público). Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Seringueira>.

Um seringal rentável é formado a partir de mudas sadias e vigorosas. Estas mudas são produzidas a partir de sementes germinadas em sementeiras e são finalizadas no viveiro por diferentes técnicas, como mudas de raízes nuas (plantio direto no solo), mudas porta-enxerto em sacos plásticos (Figura 2) e mudas enxertadas com clones em sacos plásticos (BORELLI, 2016; PEREIRA; PEREIRA, 1986). Um clone é uma planta obtida através da propagação vegetativa de uma planta matriz selecionada, onde todas as plantas resultantes terão uma composição genética uniforme.

Os clones de seringueira são classificados de acordo com os parentais utilizados para a obtenção de ortete (árvore matriz) e são classificados em primários, secundários e terciários. Clones primários são oriundos de parentais desconhecidos, em geral, são seringueiras que possuem caracteres desejáveis. Os clones secundários são ortetes obtidos através de cruzamentos de dois clones primários e os clones terciários são obtidos do cruzamento em que um dos parentais é secundário. Para os três tipos de clones as mudas são obtidas através da propagação vegetativa da planta matriz.

No caso da produção de clones de seringueira via enxertia, o porta-enxerto (hipobioto), ou “cavalo”, é uma variedade de seringueira que deve apresentar boas qualidades no desenvolvimento do sistema radicular, resistência a estresses e boa compatibilidade com o enxerto, ou “cavaleiro” (epibioto) que neste caso é o clone de seringueira propriamente dito, e geralmente selecionado por sua elevada produtividade de látex. No entanto, devido ao uso de porta-enxertos oriundos de sementes de seringueiras sem seleção (grande variabilidade genética) é comum observar algumas variações fenotípicas em campos clonais formados por essa técnica de enxertia (GONÇALVES et al., 2001).

É recomendado que o substrato para a produção das mudas, tanto na sementeira quanto posteriormente no viveiro, tenha boa aeração e elevada capacidade de retenção de umidade para facilitar germinação das sementes, sendo inclusive indicado o uso do solo da camada de 0 a 20 cm de profundidade (PEREIRA, 1992; IAC, 2016a). Apesar da produção de mudas da seringueira seguir a Instrução Normativa nº 29 de 2009 (IN 29), que permite o uso de solo como substrato para a germinação e desenvolvimento da seringueira, há na IN 29, o artigo 32 que determina que as mudas estejam livres de pragas limitantes à cultura da seringueira como nematoides *Meloidogyne* spp. e *Pratylenchus* spp. (BRASIL, 2009). Para contornar essa problemática, a Coordenadoria de Defesa Agropecuária do estado de São Paulo, por meio da Resolução 154 da Secretaria de Agricultura e Abastecimento, de 22 de novembro de 2013 (SÃO PAULO,

2013), aprimorou a IN 29, determinando que toda a produção de mudas de seringueira deve ser feita em viveiros suspensos, com a utilização de substrato sem a mistura com solo e livre de pragas e plantas invasoras (Figura 2).

FIGURA 2 - Mudanças de seringueira suspensas e germinadas em sacos plásticos com substrato sem solo. Essas mudas são cultivadas para serem portas-enxerto (“cavalos”) de clones (“cavaleiros”) produtivos enxertados nas plantas ainda na sacola plástica ou posteriormente a campo.



Fonte: Revista Campo e Negócios. Créditos: Paulo Fernando de Brito.

As mudas prontas vão para o campo no início da estação das chuvas. O espaçamento de plantio de um seringal é variável, mas geralmente está entre 7 e 8 m entre linhas por 2,5 a 3 m entre plantas, estabelecendo cerca de 500 árvores por hectare. Após o plantio a campo e enxertia, a seringueira inicia a produção comercial de látex aos 6-8 anos e tem uma vida útil de 20 a 40 anos, sendo a intensidade de extração de látex o principal fator determinante desse período. A extração do látex da seringueira ocorre pela sangria da árvore. A sangria é o corte geralmente hemiperimetral da casca da seringueira que visa romper os vasos lactíferos que liberarão o látex para formar a borracha natural (ALVARENGA; CARMO, 2014).

A borracha natural extraída a partir da seringueira é uma commodity de importância mundial principalmente devido às suas propriedades elásticas e tenazes, e suas aplicações diversificadas - destacam-se os usos farmacêuticos e hospitalares, militares e civis, industriais e domiciliares da borracha, que é empregada em mais de 40.000 produtos e utensílios (KOHJIYA; IKEDA, 2014; MOOIBROEK; CORNISH, 2000). Outro aspecto positivo da borracha natural está no seu processo de produção, que não é mecanizado e não requer grande esforço físico; a sangria, por exemplo, é uma atividade que exige especialização, habilidade e sensibilidade e é preferencialmente executada pelo trabalho feminino (VIRGENS FILHO, 2005). Devido a todas essas características, a demanda mundial por borracha natural extraída da seringueira é crescente, o que torna estratégica a sua produção.

Atualmente, cerca de 11,7 milhões toneladas de borracha natural de seringueira são produzidas no mundo (IRSG, 2016), e mais de 80% dessa borracha é produzida no sudeste asiático, em países como Tailândia, Indonésia, Malásia, Índia e Vietnã, enquanto que a produção brasileira é inferior a 3% da produção mundial (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2014; IAC, 2016a). No Brasil, o estado de São Paulo produz aproximadamente 55% (185.000 toneladas) da borracha natural, e juntamente com os estados do Mato Grosso, Minas Gerais e Espírito Santo somam mais de 90% de toda a produção nacional de borracha (CAMARGO et al., 2003; IBGE, 2014; NOGUEIRA et al., 2015). A produtividade de látex de um seringal depende do clone, da região e da idade do plantio, no entanto, a média nacional de látex em seringal em plena produção é de 1.300 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (IAC, 2016a).

2.2 Patologias da seringueira

A principal causa da redução da produção de látex em uma seringueira é a ocorrência de doenças, sejam elas de origem biológica ou edafoclimática. As doenças causadas por condições edafoclimáticas, ou doenças abióticas, são todos os estresses da seringueira que não são causados por microrganismos, e são fundamentalmente devido a distúrbios na nutrição (excessos ou deficiências) fitotoxidez, insolação e extremos de pH do solo, temperatura, umidade e salinidade (GASPAROTTO et al., 2016; GASPAROTTO; PEREIRA, 2012; OGLE, 1997). As doenças biológicas, ou bióticas, são todas as doenças causadas por microrganismos; na seringueira cerca de 20 doenças

bióticas ocorrem nas folhas, tronco e raízes e a maioria delas é causada por fungos (GASPAROTTO et al., 2016; GASPAROTTO; PEREIRA, 2012).

O mal das folhas da seringueira, causado pelo fungo Ascomycota *Microcyclus ulei* (P.Henn) v. Arx, é a doença foliar mais destrutiva da heveicultura e um sério problema à expansão desse cultivo. Essa doença é favorecida por tempo quente, orvalho e elevada umidade relativa do ar, que são condições típicas do clima tropical-equatorial. Terrenos baixos e mal drenados, expostos por longos períodos a condições úmidas, também favorecem o desenvolvimento e a dispersão do mal das folhas da seringueira (CAMARGO et al., 2003). Outras doenças potencialmente destrutivas da parte aérea da seringueira são a requeima ou cancro estriado (*Phytophthora* spp.) a mancha aureolada (*Thanatephorus cucumeris* (A.B. Frank) Donk.), a antracnose (*Colletotrichum* spp.) e a crosta negra (*Phyllachora huberi* P. Henn.). Entre as patologias do sistema radicular da seringueira, aquelas causadas pelos nematoides do gênero *Meloidogyne*, são uma das mais debilitantes da seringueira (GASPAROTTO et al., 2016; GASPAROTTO; PEREIRA, 2012).

2.3 Nematoides

Os nematoides são um filo (Nematoda) de animais microscópicos, cilíndricos, alongados, de corpo não segmentado, pseudocelomado e revestido de uma cutícula resistente e quitinosa (FERRAZ; BROWN 2016). Atualmente, mais de 4.100 espécies de nematoides (15% do filo Nematoda) que parasitam plantas (fitonematoides) já foram descritas (DECRAEMER; HUNT, 2006), e novas espécies são regularmente descobertas. Os fitonematoides têm de 0,2 a 3 mm de comprimento, por 50 a 250 µm de largura, e seus danos às culturas agrícolas causam perdas mundiais entre 80 e 125 bilhões de dólares anualmente (CHITWOOD, 2003; DECRAEMER; HUNT, 2006; NICOL et al., 2011). A ocorrência, a predominância e a extensão de dano de um fitonematoide estão relacionadas com a sua população inicial, a susceptibilidade da planta hospedeira, o manejo cultural predominante, as características do solo e as condições climáticas (NICOL, 2002).

Atualmente, espécies de 9 gêneros de fitonematoides parasitam a seringueira, e os principais gêneros encontrados em seringais são *Meloidogyne*, *Pratylenchus*, *Xiphinema*, *Helicotylenchus* e *Rotylenchulus* (FREIRE, 1976; SANTOS et al., 1992; SILVEIRA, 1992; WILCKEN et al., 2015). Na Malásia, um dos maiores produtores de

borracha do mundo, as espécies *Meloidogyne* spp., *Pratylenchus brachyurus* (Godfrey) Filipjev e S. Stekhoven, e *Rotylenchulus reniformis* Linford e Oliveira, são consideradas grandes problemas para a heveicultura (RAZAK, 1978).

2.4 Nematóide de galhas na seringueira

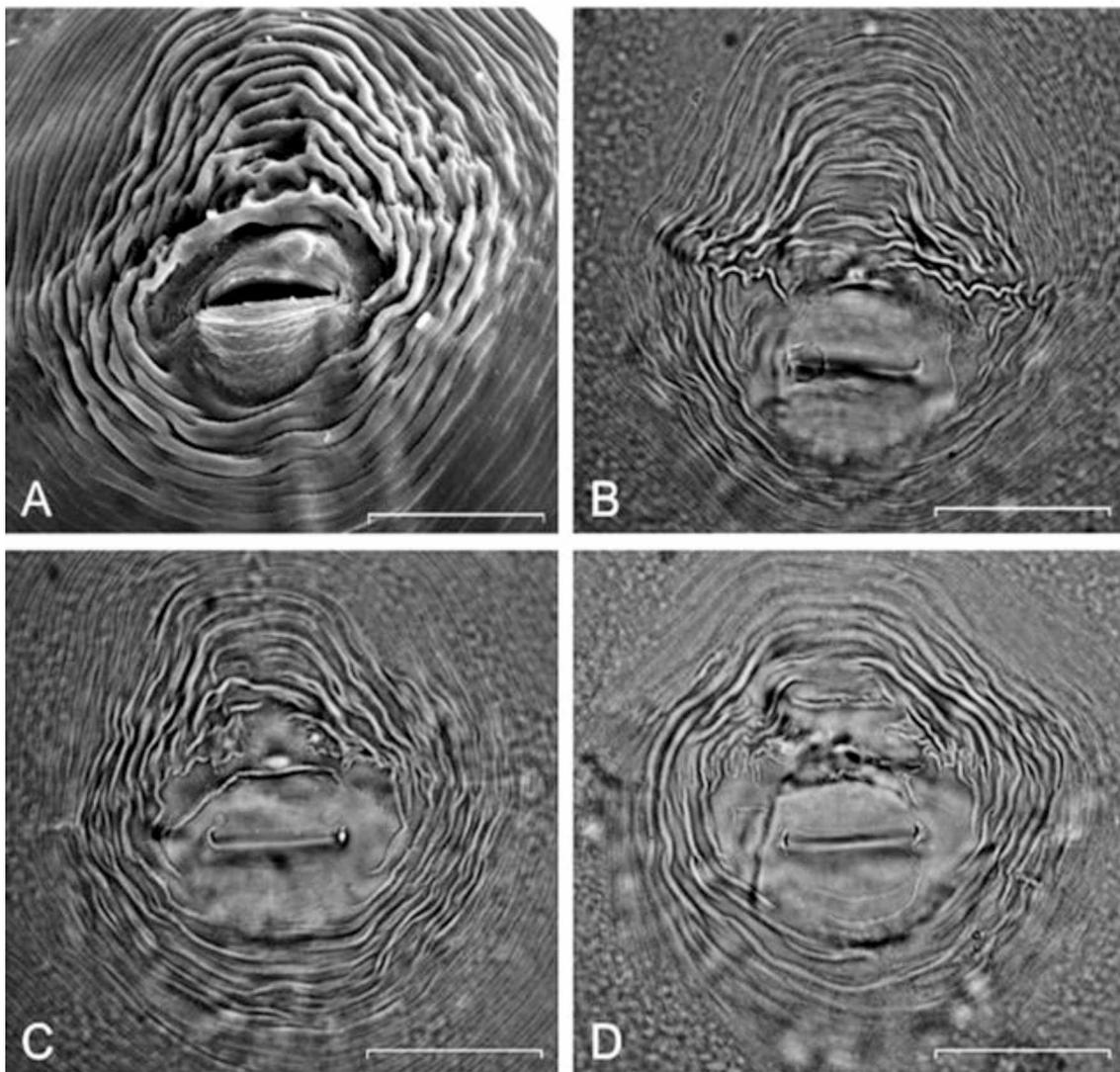
Entre os fitonematóides mais prejudiciais e destrutivos estão os causadores de galhas nas raízes (*root-knot nematodes*) do gênero *Meloidogyne* - do grego, *melon* (cabaça, melão, maçã), *oides* ou *oid* (semelhante), e *gyne* (fêmea), resultando em *fêmea semelhante a cabaça* (TAYLOR, 1978). Mais de 5.500 espécies de plantas são hospedeiras das 98 espécies desse gênero, e o limite de dano econômico de certas espécies de *Meloidogyne* pode ser tão baixo quanto 1 ovo por 100 cm³ de solo (GHULE; SINGH; KHAN, 2014; GRECO; DI VITO, 2009; MOENS et al., 2009). Apesar do impacto econômico do gênero *Meloidogyne* ser maior em áreas tropicais, existem espécies que causam danos em todas as regiões do mundo.

Os sintomas gerais de uma infestação de nematóide de galhas em plantas incluem deformação das raízes, paralisia do desenvolvimento da planta, clorose foliar, desfolha precoce e a morte prematura da planta hospedeira (KARSSSEN, 2002; JONES et al., 2013). No Brasil, a principal espécie de nematóide de seringueira é *Meloidogyne exigua*, cujos primeiros relatos de ocorrência no Brasil foram em seringais do estado da Bahia (SHARMA, 1971; SHARMA; LOOF, 1973). Santos (1992) e Santos et al. (1992) posteriormente confirmaram que os relatos de *Meloidogyne* em seringueiras na década de 70 eram da espécie *M. exigua*. Outras espécies, como *M. javanica* e *M. incognita* também parasitam a seringueira, mas são menos destrutivas que o *M. exigua* (FONSECA et al., 1999; FONSECA et al., 2003; LORDELLO et al., 1988; LORDELLO; VEIGA, 1983).

Sharma e Junqueira (1996) e Lordello e Lordello (2004) relataram que a população de *M. exigua* que parasita a seringueira é incapaz de parasitar o café (*Coffea* sp.), ou qualquer outro hospedeiro além da seringueira. A partir dessa observação foi proposta uma classificação de *M. exigua* em raças fisiológicas. Esta classificação foi baseada na capacidade de reprodução de *M. exigua* em variedades específicas de quatro espécies de plantas (CARNEIRO; ALMEIDA, 2000; MUNIZ et al. 2008). Na espécie *M. exigua*, os indivíduos que infectam plantas de pimentão e o cafeeiro, mas não infectam o tomateiro, são da raça 1; indivíduos que infectam plantas de pimentão, o

cafeeiro e o tomateiro, são da raça 2, e os indivíduos da raça 3 parasitam apenas a seringueira (Figura 3) não infectando o tomateiro, o pimentão, ou o cafeeiro.

FIGURA 3. Conformações perineais de fêmeas de *Meloidogyne exigua*, raça 3, extraídos de seringueira: **A)** eletromicrografia de varredura evidenciando as espessas estrias; **B-D)** fotomicrografia evidenciando o arranjo das estrias. Barras = 25 μ m.



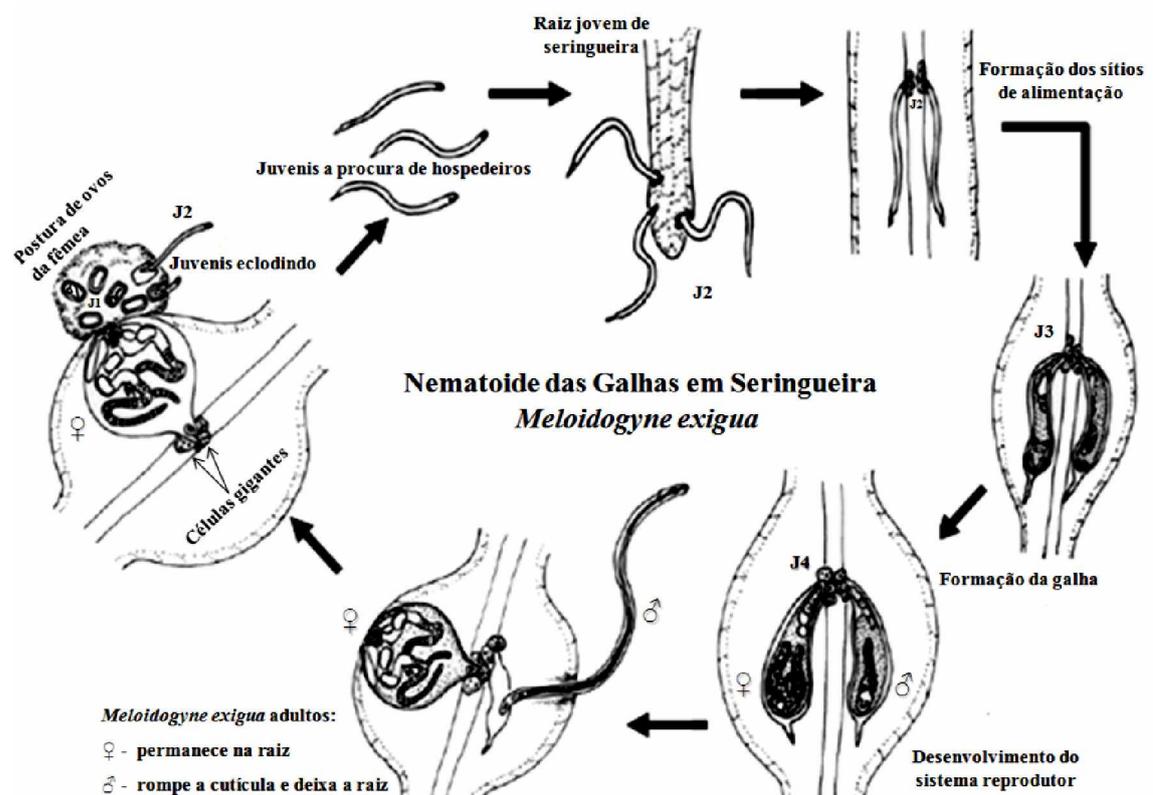
Fonte: Muniz et al. (2009).

2.5 Parasitismo e ciclo do nematoide de galhas da seringueira

O ciclo biológico do *M. exigua* pode durar entre 24 e 35 dias em temperaturas de 25 a 30 °C, e consiste de seis estádios fenológicos que se iniciam pelo ovo, passando por quatro estádios juvenis (J1, J2, J3 e J4) até o estágio adulto (KARSSSEN, 2002;

MOENS et al., 2009). Os ovos de *M. exigua* são postos em uma massa com 400 a 500 ovos produzidos pela fêmea e podem ser gerados por partenogênese. Essa massa de ovos é depositada no parênquima cortical da raiz, ou em sua superfície em uma matriz gelatinosa, que a protege da desidratação e do ataque de fungos e bactérias do solo (BLUM, 2006). No ovo, o embrião se desenvolve a juvenil de primeiro estágio (J1) e posteriormente a juvenil de segundo estágio (J2) após a ecdise ainda no ovo. Em condições favoráveis, o estágio J2 eclode dos ovos através da força mecânica de seu estilete e por ação enzimática de quitinases produzidas pelo nematoide (ABAD et al., 2009). O J2 de *M. exigua* é a fase infectiva do nematoide de galhas da seringueira, que logo após eclodirem já iniciam a procura pelas pontas das raízes jovens da seringueira (Figura 4). Nesta fase o nematoide não se alimenta, sobrevivendo apenas de suas reservas.

FIGURA 4. Ciclo biológico do nematoide de galhas (*Meloidogyne exigua* raça 3) na seringueira.



Adaptado de Agrios (2005).

Para penetrar a raiz, o nematoide faz uso de enzimas celulolíticas e pectolíticas, e do estilete, uma estrutura protuberante que age como uma seringa injetando toxinas e

sugando alimento. Na raiz da seringueira os J2 de *M exigua* penetram entre as células do córtex até o cilindro vascular onde estabelecem seu sítio de alimentação. Neste local, as secreções esofagianas do nematoide resultam na hipertrofia e hiperplasia das células corticais formando as galhas (KARSSSEN; MOENS, 2006). A galha de nematoide em seringueira é o engrossamento anormal das raízes jovens, que podem atingir até 0,8 cm de diâmetro, e são os primeiros sintomas de uma infecção por *M. exigua* (MOENS et al., 2009; SANTOS, 1992; WILLIAMSON; GLEASON, 2003).

No sítio de alimentação, células multinucleadas e gigantes se desenvolvem para a alimentação do nematoide, que sofre ecdises até juvenil de quarto estágio (J4). Na ecdise de J4 para adulto, a metamorfose é mais pronunciada e ocorre a distinção entre os sexos. O macho vermiforme de *M. exigua* rompe a cutícula do J4, sai para o solo e não se alimenta mais, podendo cumprir função na reprodução, apesar dessa espécie poder se reproduzir por partenogênese meiótica; a fêmea permanece sedentária na raiz e se tornará globosa (piriforme), enquanto amadurece, o que ressalta o dimorfismo sexual da espécie (GHULE et al., 2014; KARSSSEN; MOENS, 2006).

2.6 Danos do nematoide de galhas à seringueira

O nematoide *Meloidogyne exigua* (raça 3) se alimenta das células das raízes da seringueira induzindo a formação de galhas, necroses do tecido radicular, e alterações fisiológicas (GASPAROTTO; PEREIRA, 2012; PERRY; MOENS, 2005) (Figura 5). As alterações morfológicas nas raízes e a diminuição das raízes absorventes na seringueira afetam negativamente a absorção de água, de nutrientes e a produção de látex da seringueira (SANTOS et al., 1992; SIJMONS et al., 1994).

Estudos histológicos identificaram em uma seção da raiz de seringueira infectada com até 12 locais de alimentação com fêmeas e machos (J4) maduros de *M. exigua* (SANTOS, 1992). Os sintomas reflexos mais notáveis dessa infestação que debilita o sistema radicular são a clorose foliar e desfolhamento prematuro. As plantas atacadas apresentam sintomas similares de deficiência nutricional, principalmente deficiência de nitrogênio e de nutrientes com baixa mobilidade (GASPAROTTO et al., 2016).

FIGURA 5. Sintomas da infestação de *Meloidogyne exigua* em seringueira: **A)** seringueiras com porte reduzido e copa rala; **B)** e **C)** raízes de seringueira com galhas e necroses. Barra: 2 cm. Fazenda A. 2015. Fonte: (A): Coelho, L.; (B, C): Lemes, E. M.



Fonte: (A): Coelho, L.; (B, C): Lemes, E. M.

Os danos provocados pelos nematoides do gênero *Meloidogyne* são mais severos quando a planta hospedeira passa por condições estressantes causadas por razões abióticas (falta de água, deficiências nutricionais, geada, etc), ou bióticas (pragas e doenças) (GASPAROTTO; PEREIRA, 2012; MOENS, 2005; MOURA, 1997; PERRY). O reenfolhamento dos seringais no final da estação seca, período que a seringueira apresenta os folíolos com coloração antociânica mais intensa - entre setembro e outubro no Cerrado - é a fase mais crítica para o surgimento de pragas e doenças na seringueira, onde o lançamento de brotações é grande e as condições climáticas ainda podem ser estressantes (GASPAROTTO; PEREIRA, 2012).

O estabelecimento de uma infestação de nematoides de galhas na seringueira geralmente precede o definhamento geral da árvore, o que também, aumenta a predisposição à ocorrência de pragas (SHARMA et al. 1992) e doenças no seringal (GASPAROTTO, 1997; GASPAROTTO; PEREIRA, 2012). O fungo Ascomycota *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griffon e Maublanc (sinônimo: *Botryodiplodia*

theobromae Pat.), por exemplo, é um fungo polífago e oportunista que pode ocorrer em seringais debilitados por nematoides, principalmente *Meloidogyne* sp. e *Pratylenchus* sp., causando uma doença conhecida como morte descendente da seringueira (GASPAROTTO et al., 2016; PAES et al., 2012; PEREIRA et al., 2006). A morte descendente da seringueira, causada pela combinação de *M. exigua* e *L. theobromae*, foi responsável pelo extermínio de 3% dos seringais do estado do Mato Grosso, entre 1979 e 1986, não se observando distinção de resistência entre os genótipos avaliados (SANTOS, 1995; SANTOS et al., 1992).

Durante a seleção de genótipos para porta-enxerto, pouca importância foi dada à descendência e procedência das mudas de seringueira, bastando que o porta-enxerto não apresentasse incompatibilidade com o enxerto e já seria indicado para o cultivo comercial (MARTINS et al., 2000). Entre os principais clones de seringueira cultivados no Brasil, como porta-enxerto ou enxerto, estão: “RRIM 600” (Rubber Research Institute of Malaysia) com 44% da área total cultivada (IAC, 2016b), “PB 235” (Prang Besar, Malásia), “GT 1” (Gondang Tapen, Indonésia), “PR 255” (Proefstation voor Rubber, Indonésia), “IAN 873” (Instituto Agrônômico do Norte, Brasil), e as séries “IAC” (Instituto Agrônômico de Campinas, Brasil). No entanto, apesar desses clones apresentarem características fisiológicas e morfológicas distintas, todos eles apresentam em comum elevada susceptibilidade ao *M. exigua* (FONSECA et al., 1999; PAES-TAKAHASHI et al., 2015).

2.7 Sensoriamento remoto

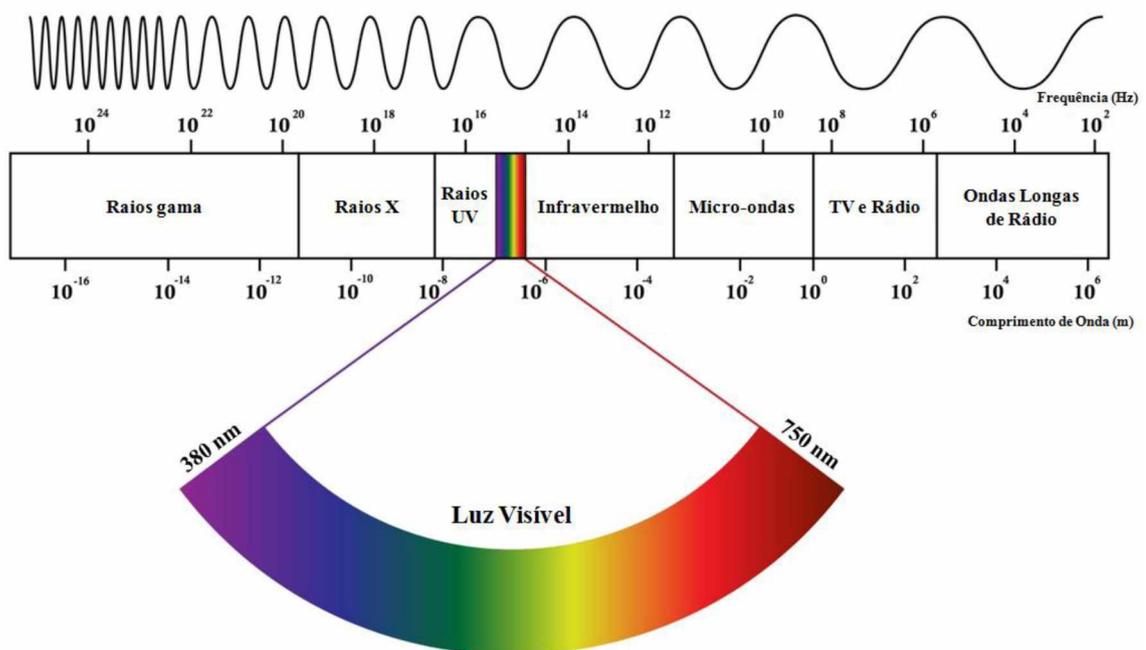
O sensoriamento remoto (SR) envolve a aquisição, o processamento e a análise da radiação eletromagnética (REM) refletida, ou emitida de alvos sobre o plano terrestre, sem que haja o contato físico direto entre o sensor e o objeto avaliado (FLORENZANO, 2002; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). Esta característica permite a realização de medições *in vivo* possibilitando o monitoramento, o mapeamento e a fiscalização de características físicas, químicas e biológicas na superfície da Terra (CURRAN, 2001; HATFIELD et al., 2008; JENSEN, 2009).

Os métodos tradicionais de pesquisa a campo apresentam limitações no tempo para leitura e resposta das variáveis analisadas e muitas vezes problemas com acesso às áreas avaliadas. O SR, devido à cobertura rápida de extensas áreas, à repetibilidade de informações espaciais e temporais e à disponibilidade imediata de informações sobre o

componente de estudo, pode facilitar a pesquisa e amparar as tomadas de decisão. A utilização racional das informações provenientes do SR proporciona maior eficiência no manejo da produção agrícola, redução de impactos ambientais pela aplicação precisa de insumos e aumento da produtividade das culturas (INAMASU, BERNARDI, 2014).

No ambiente rural o sensoriamento remoto é basicamente o registro da REM proveniente do solo e da vegetação (MULLA, 2012). A REM captada por sensores em cada pixel é traduzida em números digitais (NDs) que estão distribuídos em bandas (*id.q.* intervalos de comprimentos de onda) no espectro eletromagnético (Figura 6). Os sensores podem identificar poucas e discretas, ou diversas e contínuas bandas do espectro eletromagnético, constituindo as imagens multiespectrais e hiperespectrais, respectivamente. A conversão de uma imagem espectral em NDs que traduziram parâmetros como a radiância e a reflectância é um processo que possibilita a caracterização espectral de alvos na superfície e a utilização de operações matemáticas entre diferentes bandas espectrais (SCHOWENGERDT, 2006).

FIGURA 6. Espectro eletromagnético.



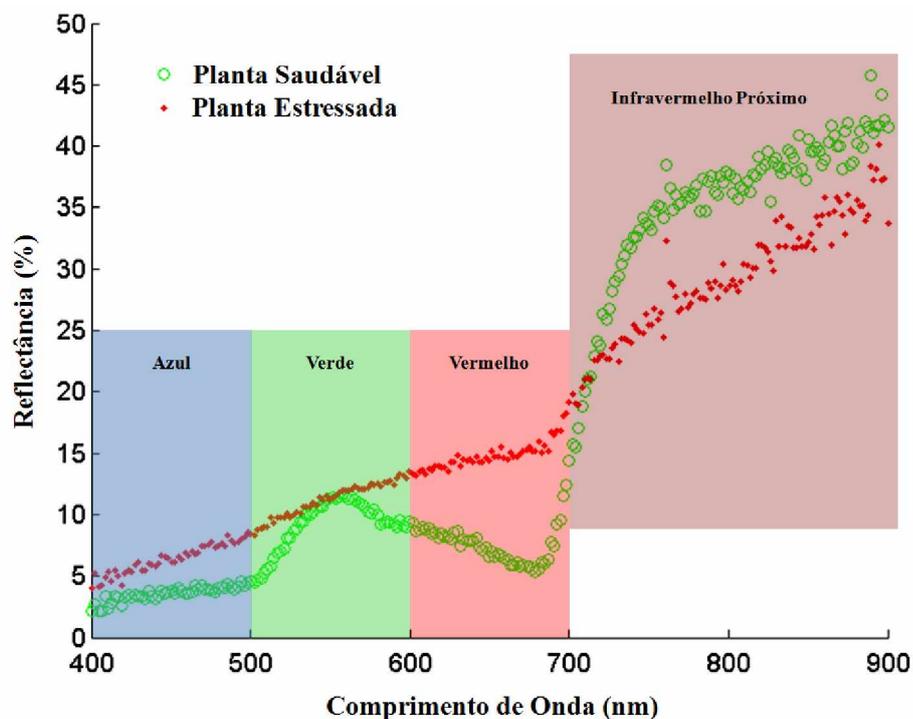
Fonte: adaptado de Biro Eموke (Shutterstock).

2.8 Radiância e reflectância

Os sensores eletromagnéticos possuem resoluções radiométricas para discretizar bandas do espectro de acordo com a energia que é captada por eles. Esta energia pode ser emitida ou refletida pelo alvo em estudo na forma de diferentes tipos de ondas eletromagnéticas. As imagens geradas por um sensor, em diferentes bandas do espectro, não apresentam necessariamente compatibilidade entre os NDs registrados, o que impossibilita a comparação entre NDs de bandas diferentes (CURRAN, 1994).

A radiância espectral, definida como a energia emitida por uma superfície em determinado período e temperatura, é um parâmetro dependente da intensidade de irradiação a que a superfície foi sujeita previamente à sua medição. Portanto a radiância não é o melhor parâmetro para as avaliações das propriedades espectrais dos alvos estudados, visto que a radiância depende de situações, como o tempo a que a copa de uma árvore foi exposta à luz solar. Desta maneira, a reflectância (fração refletida da REM total incidente - NICODEMUS et al., 1977) passa a ser de extrema importância para estudos com sensoriamento remoto por representar melhor as propriedades espectrais dos objetos (PONZONI et al., 2012). A reflectância, por exemplo, varia com a condição da planta, principalmente quando esta sofre ou sofreu algum estresse ambiental (Figura 7).

FIGURA 7. Comportamento da reflectância de plantas saudáveis e estressadas.



Fonte: adaptado de Hogan et al., 2012.

A reflectância é um parâmetro intrínseco dos objetos na superfície terrestre - no caso da vegetação, a reflexão da energia nas folhas é difusa, ou não especular (MOREIRA, 2007). Condições estressantes geralmente reduzem as quantidades de clorofilas, diminuindo a quantidade de energia absorvida nas regiões espectrais do azul e do vermelho, produzindo uma reflectância que gera um aspecto clorótico nas folhas (CARTER; KNAPP, 2001; CIBULA; CARTER, 1992).

O espectro do infravermelho próximo é grandemente refletido a partir do parênquima esponjoso foliar e em uma folha saudável pouco do vermelho e azul é refletido (planta saudável, Figura 8). Este comportamento característico das folhas é importante para distinguir a vegetação em uma imagem espectral (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

2.9 Índices espectrais de vegetação

Devido às peculiaridades da reflectância das folhas das plantas nas bandas do vermelho e infravermelho próximo, suas informações são convertidas aritmeticamente em vários índices de vegetação (GÜRTLER et al., 2005; HIRD; JENSEN, 2009; McDERMID, 2009; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; TUCKER, 1979). Essas bandas espectrais são reconhecidas por discriminar a vegetação dos demais alvos na superfície, por indicar processos fisiológicos, por identificar vegetação verde e sadia e distingui-la da vegetação sob condições estressantes (BASSO et al., 2004; HABOUDANE et al., 2004; JENSEN, 2009; MAHLEIN, 2016; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; WANG et al., 2012).

Os principais objetivos dos índices de vegetação são (i) ampliar a sensibilidade das respostas espectrais às respostas das plantas, (ii) modelar os efeitos extremos de forma a permitir comparações, (iii) normalizar interferências atmosféricas, do terreno, solo e vegetação, e (iv) interagir com parâmetros biológicos mensuráveis. Os índices de vegetação são, portanto, elaborados para estabelecerem relação funcional entre processos nas plantas e suas respostas espectrais (BASSO et al., 2004; WIEGAND et al., 1990).

De acordo com as respostas da vegetação, os índices podem identificar importantes respostas das plantas, como a presença de insetos (HAVAŠOVÁ et al., 2015) e plantas daninhas (LAMB; WEEDON, 1998), variações nas características do solo (BARNES et al., 2003), a fenologia da vegetação (FAN et al., 2015; MARSHALL

et al., 2016), o conteúdo de água das folhas (CECCATO et al., 2001; JACKSON et al., 2004) e estresses hídricos (AGHAKOUCHAK et al., 2015), pigmentos foliares (BLACKBURN, 2007; CARMONA et al., 2015; HUANG et al., 2015), o índice de área foliar (LIU et al., 2016; VIÑA et al., 2011), e a detecção de doenças nas plantas (LI et al., 2014; MAHLEIN, 2016; WÓJTOWICZ et al., 2016).

Os índices de vegetação são desenvolvidos desde o final da década de 60, quando imagens de satélite começaram a se tornar disponíveis. Mesmo os índices desenvolvidos àquela data ainda continuam sendo regularmente utilizados para uma grande diversidade de aplicações na agricultura, com seus propósitos potenciais ainda por serem explorados. Um dos primeiros índices de vegetação desenvolvidos foi a *razão simples* [$RS = NIR/RED$, onde, NIR (*near-infrared*) é a reflectância do infravermelho próximo, e RED é a reflectância do vermelho (BIRTH; MCVEY, 1968; JORDAN, 1969)] que é um índice útil para distinguir vegetação sadia de demais alvos em uma imagem espectral, mas que não permite uma correção dos efeitos de topografia e ângulo de incidência da luz solar.

Muitos índices de vegetação foram subsequentemente desenvolvidos e melhorados, como o *índice transformado* (DEERING et al., 1975), o *índice perpendicular* (RICHARDSON; WIEGAND, 1977), o *índice ajustado de solo* (HUETE, 1988), o *índice da diferença* (RICHARDSON; EVERITT, 1992), o *índice de deficiência hídrica* (MORAN et al., 1994), o *índice termal normalizado* (PARK et al., 2004), entre outros (BASSO et al., 2004; LE MAIRE et al., 2012; MAHLEIN, 2016; MAHLEIN et al., 2013; SILLEOS et al., 2006).

2.10 Índice de vegetação por diferença normalizada

Entre os índices espectrais utilizados para o estudo da vegetação, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (KRIEGLER et al., 1969; ROUSE et al., 1973), ou NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), é um dos mais empregados para a detecção de variações nas respostas das plantas. O NDVI é obtido a partir da razão normalizada entre a reflectância do vermelho e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, segundo a fórmula: $NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$. A escala do NDVI varia entre menos um (-1) e mais um (+1). Observando a fórmula do NDVI e a Figura 7 pode-se deduzir que valores de NDVI próximos de “+1” indicam maior densidade e vigor da cobertura vegetal. O zero (0) no NDVI representa a ausência de

vegetação fotossintetizante, enquanto que valores inferiores a “0” indicam a presença de corpos d’água (PETORRELLI et al., 2005; ROSA, 2009).

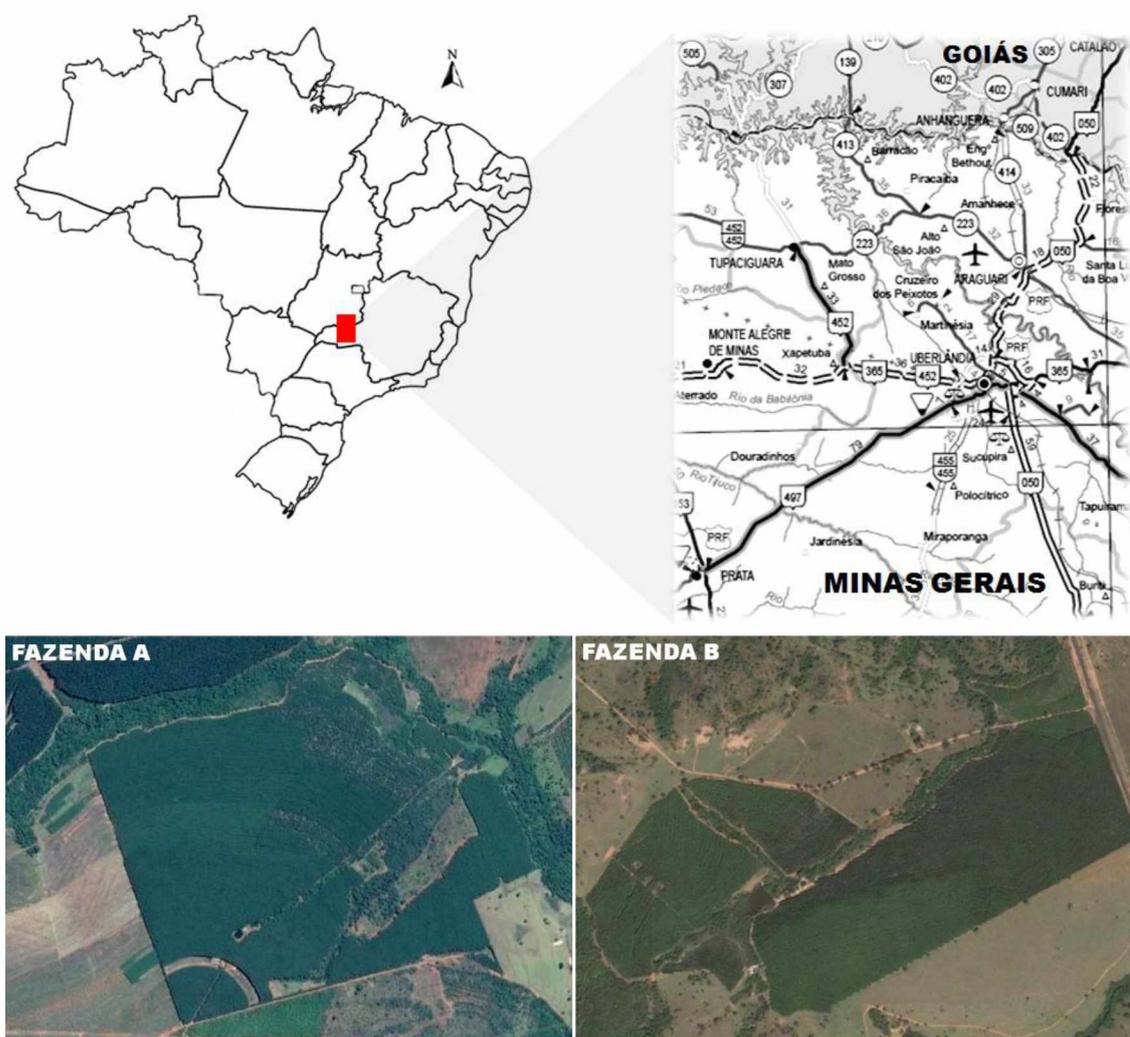
O índice NDVI pode ser utilizado para o monitoramento espacial e temporal da vegetação, distinguindo o solo, as rochas e desertos de alvos fotossintetizantes, identificando extratos vegetais e seus estresses e permitindo comparações sazonais com grande acurácia (CHIBA et al., 2014; HATFIELD et al., 2008; HIRD; MCDERMID, 2001; PETORRELLI et al., 2005; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; YENGOH et al., 2014). Alguns empregos específicos do NDVI, são a detecção de desmatamentos (BAYMA; SANO, 2015; KUMAR et al., 2010), secas (AGHAKOUCHAK et al., 2015) e queimadas (MASELLI et al., 2003; MOHLER; GOODIN, 2013), a determinação do conteúdo de nitrogênio foliar (SOLARI et al., 2008) e clorofilas (SOLBERG et al., 2005; ZHAO et al., 2007), a produção de biomassa (GOSWAMI et al., 2015), a qualidade de forragem (RYAN et al., 2012), assim como a produtividade agrícola (DUNCAN et al., 2015; SHANAHAN et al., 2001) e diversas fitopatologias (MAHLEIN, 2016). As aplicações do índice NDVI são diversas e fornecem importantes informações sobre o comportamento da flora em uma escala regional e global (BASSO et al., 2004; KAWABATA et al., 2001; MALMSTRÖM et al., 1997; PETORRELLI et al., 2005; WÓJTOWICZ et al., 2016; YENGOH et al., 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização das áreas

Este trabalho foi conduzido em dois seringais comerciais, sendo um localizado no município do Prata, no Triângulo Mineiro (Fazenda A) e o outro no município de Cumari, no sudeste de Goiás (Fazenda B) (Figura 8). As áreas estão cerca de 170 km distantes uma da outra.

FIGURA 8. Fazendas estudadas com *Meloidogyne exigua* em seringueira.



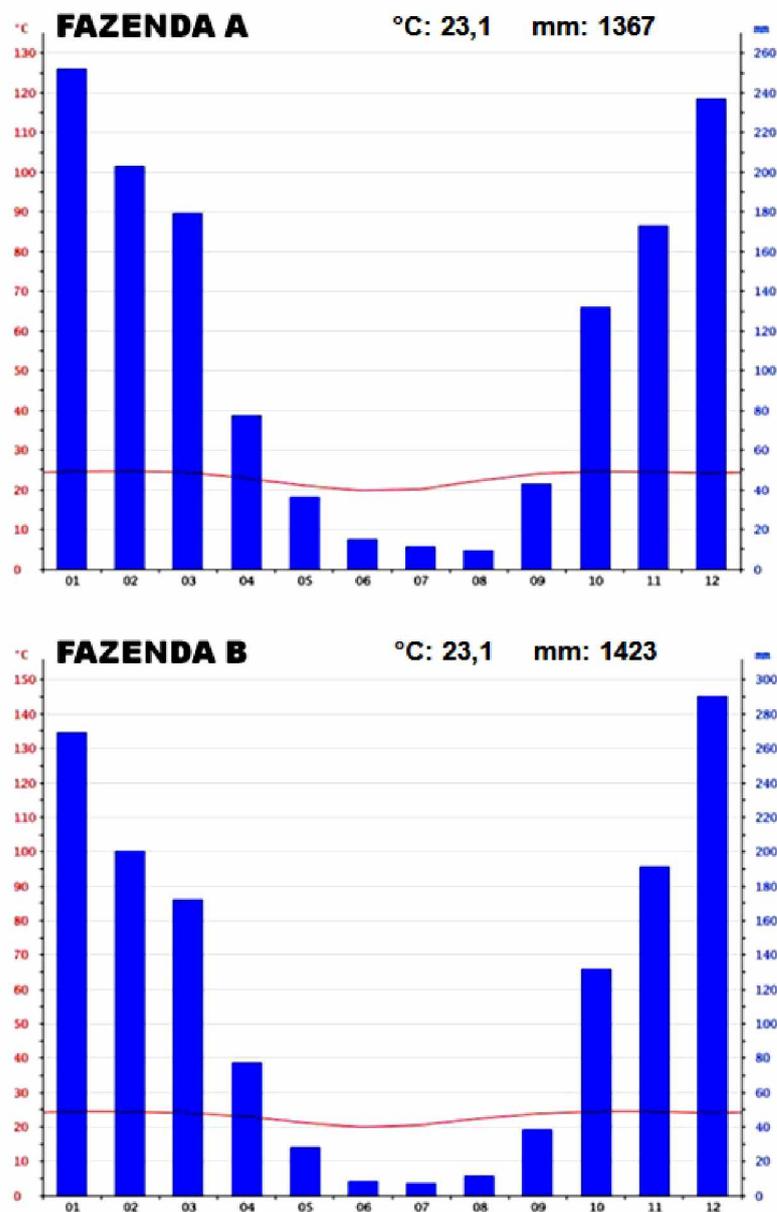
Fonte: Google Earth (2015).

A área do seringal da Fazenda A é de cerca de 130 hectares, irrigada, está próxima à divisa entre as bacias hidrográficas regionais do rio Paranaíba e do rio Grande, centrada nas coordenadas UTM: 722.266,02 mE, e 7.864.183,24 mN, a 650

metros de altitude. A área do seringal da Fazenda B tem cerca de 50 hectares, sem irrigação, está na bacia hidrográfica regional do rio Paranaíba, centrada nas coordenadas UTM: 802.389,14 mE, e 7.969.025,79 mN, a 720 metros de altitude.

O clima em ambas as localidades é classificado como Aw (tropical com inverno seco e verão chuvoso) (KÖPPEN; GEIGER, 1928). As médias pluviométricas e de temperatura do ar para os municípios desse trabalho são apresentadas na Figura 9.

FIGURA 9. Médias pluviométricas (mm) e de temperatura do ar (°C), mensais e anual, para a Fazenda A e a Fazenda B.



Fonte: Climate-Data.org (2016).

O solo em ambas as áreas é classificado como Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2013), e o relevo predominante é levemente inclinado (< 5%). A textura do solo da área na Fazenda A é mais arenosa que o solo da área na Fazenda B.

3.2 Clone de seringueira

A população média de árvores na Fazenda A e na Fazenda B é de aproximadamente 480 árvores ha⁻¹, e a idade média das árvores varia de 7 a 10 anos. Em ambas as áreas estudadas o clone utilizado para a produção de látex (epibioto) é o clone RRIM600. No entanto, os proprietários não têm informação do clone utilizado como hipobioto. O manejo de pragas, doenças e plantas daninhas, assim como da adubação nessas áreas, foram realizados conforme necessidade e o critério dos proprietários.

O RRIM600 é um clone secundário (parentais: Tjir 1 e PB 86), desenvolvido pela “Rubber Research Institute of Malaysia”, e é o clone mais plantado no Brasil (IAC, 2016b). A produção elevada de látex faz com que o clone RRIM600 ainda seja escolhido para plantios em larga escala, apesar de ser um clone antigo e com algumas características indesejáveis. O RRIM600, além de produtivo, é um clone com vigor mediano e boa renovação do painel após o período de sangria, no entanto, é um clone sensível à quebra por ventos, pouco tolerante ao frio, susceptível à *Phytophthora* spp. (PBRRIM, 1970; HO et al., 1974; IRCA, 1976), e a *M. exigua* (FONSECA et al., 1999; PAES-TAKAHASHI et al., 2015).

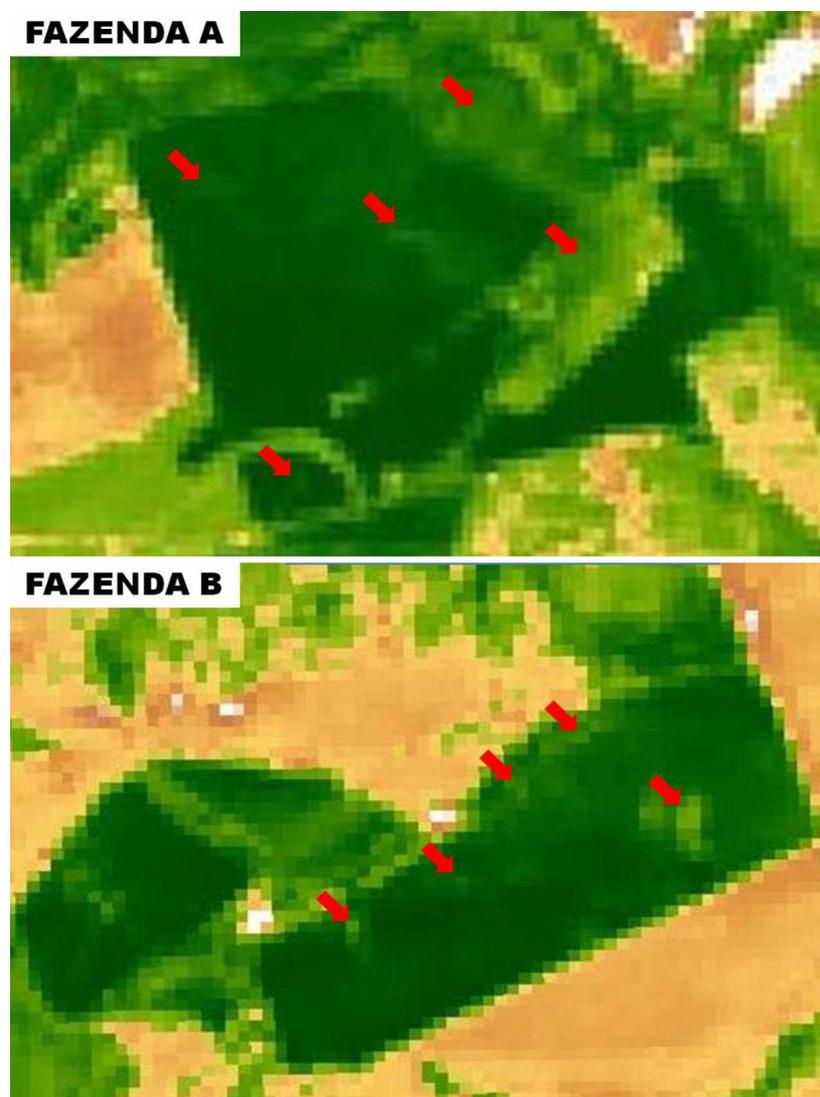
3.3 Georreferenciamento e amostragem

Todos os pontos para a amostragem de solo e raízes de seringueira foram georreferenciados. Os pontos foram pré-selecionados para representar áreas que apresentassem alguma anormalidade nas imagens de satélite geradas a partir do índice espectral de vegetação NDVI. Esta amostragem direcionada foi com o intuito de representar as diversas condições de uma infestação agregada, irregular, como ocorre em uma epidemia de fitonematoides.

Para a pré-seleção dos pontos nas áreas foram utilizadas imagens do satélite LandSat 8 (Land Remote Sensing Satellite) fornecidas pelo USGS Earth Explorer (United States Geological Survey). A resolução espacial do LandSat 8 é de 30 metros

por pixel, resolução radiométrica de 16 bits, e sua órbita é de 16 dias. A construção do mapa NDVI a partir da imagem LandSat 8, ocorreu com o auxílio do software on-line Google Earth Engine (Google Inc.) e da linguagem de programação Java. A avaliação do mapa em cores falsas do NDVI da imagem de 7 de outubro de 2015 (cena LandSat 8: LC82210732015280LGN00) apresentou consideráveis anormalidades na tonalidade de cores de certas áreas dentro do seringal para ambas as áreas estudadas (Figura 10).

FIGURA 10. Mapa NDVI em cores falsas de imagem LandSat 8 (pixel: 30 m) das áreas na Fazenda A e na Fazenda B. Setas vermelhas indicam anormalidades inesperadas em áreas de seringal.

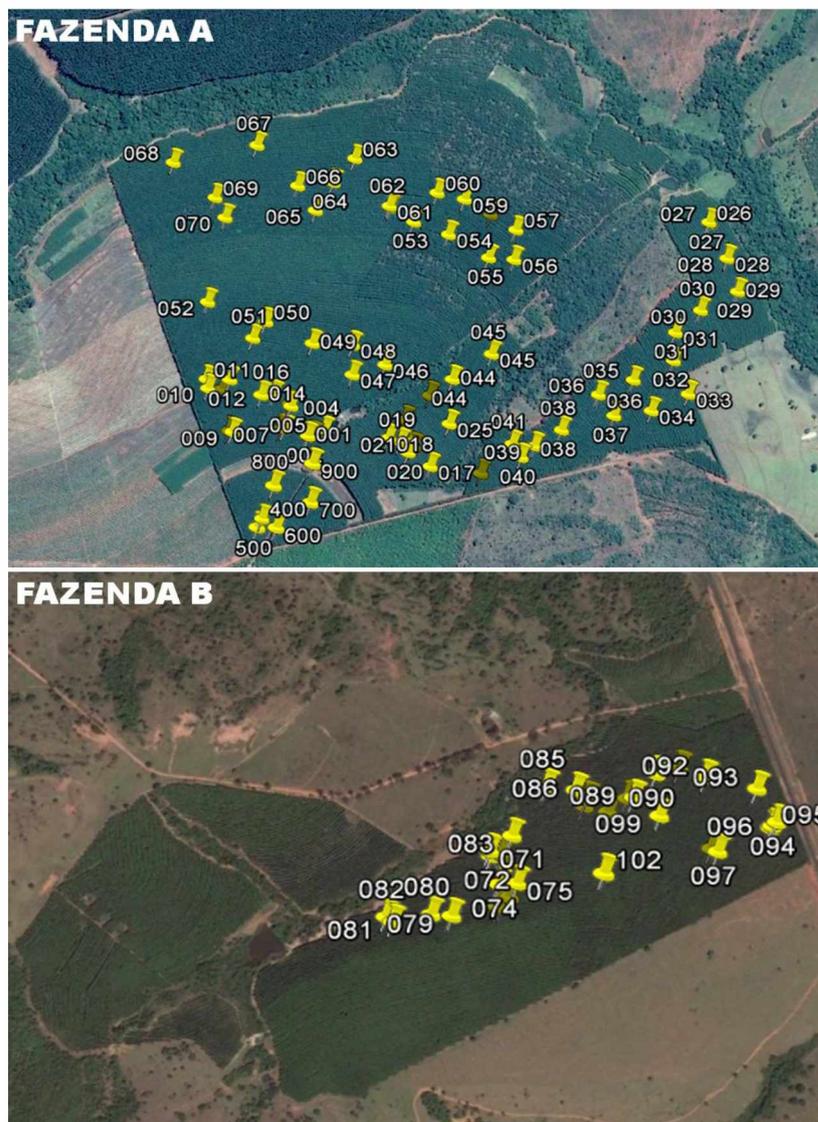


Data da imagem: 7 outubro de 2015.

Para o georreferenciamento dos pontos de amostragem a campo foi utilizado um GPS de trilha (Garmin - eTrex® Legend HCx. Chicago, EUA) com precisão inferior a

15 m (Figura 11). As amostragens foram realizadas no mês de janeiro de 2016 na Fazenda A (74 amostras direcionadas) e no mês de março de 2016 na Fazenda B (32 amostras aleatorizadas). Em cada ponto georreferenciado cerca de 0,5 kg de solo e 0,1 kg de raízes de seringueira foram coletados de 0 a 0,3 m de profundidade no solo. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos transparentes (1 L), mantidas à sombra e encaminhadas para o Laboratório de Nematologia Agrícola (LANEM) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

FIGURA 11. Localização dos pontos amostrados para análises nematológicas na Fazenda A (janeiro 2016) e na Fazenda B (março 2016).



Fontes: Google Earth.

3.4 Análise nematológica

A análise nematológica das amostras de solo e raízes de seringueira seguiu a metodologia proposta por Bonetti e Ferraz (1981) e Jenkins (1964) respectivamente.

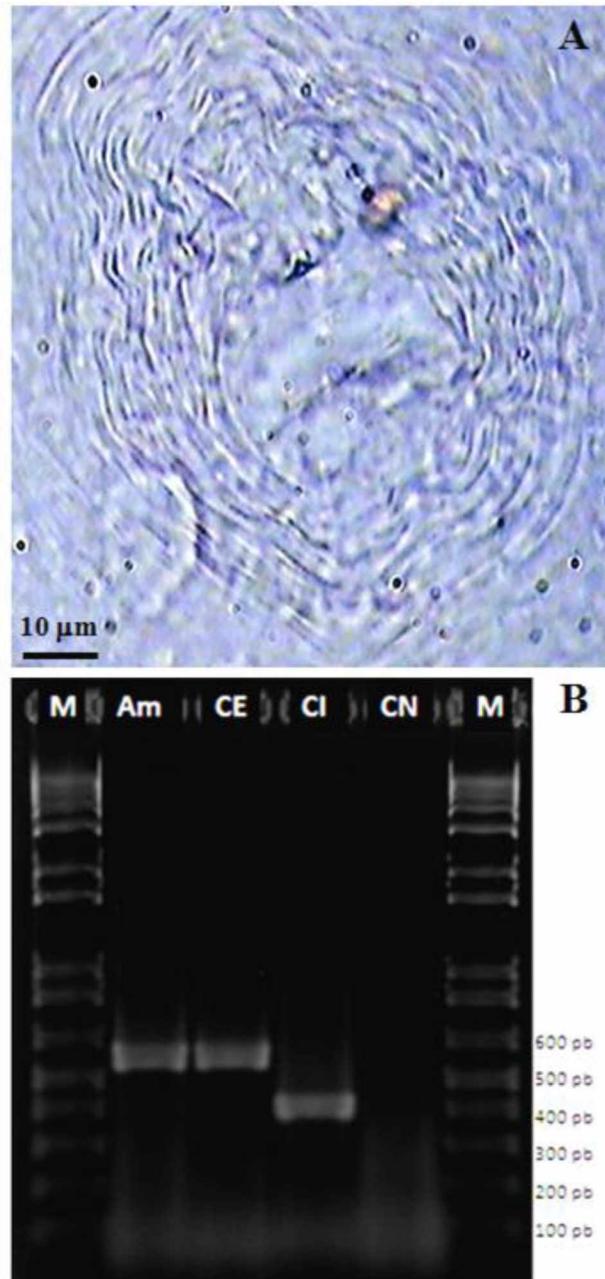
Uma alíquota de 150 cm³ de solo foi retirada da amostra de solo homogeneizada que veio do campo. Esta alíquota foi misturada em aproximadamente 2 L de água e após a suspensão descansar por cerca de 15 segundos foi vertida em peneiras sobrepostas de 20 e 400 mesh. O material retido na peneira de 400 mesh foi recolhido em tubos (cerca de 40 mL) e centrifugado a 650 gravidades por 5 min. O sobrenadante desta centrifugação foi cuidadosamente descartado para preservar o material que assentou no fundo do tubo de centrifugação, nesse caso misturado em solução de sacarose (454 g L⁻¹ açúcar cristal). A solução resultante foi novamente centrifugada a 650 gravidades agora por 1 minuto. O sobrenadante desta centrifugação foi cuidadosamente vertido sobre peneira de 500 mesh, e o resíduo da peneira foi recolhido em aproximadamente 40 mL para compor a suspensão final da amostra nematológica do solo.

Para a análise nematológica de raiz, a amostra coletada a campo foi lavada em água corrente, seca à sombra por aproximadamente 2 h e cortada em comprimentos de aproximadamente 1 cm. As raízes foram trituradas em solução de hipoclorito de sódio (NaClO, aproximadamente 0,5% ativo) na menor rotação de um liquidificador doméstico por cerca de 20 segundos. A suspensão resultante foi vertida sobre peneira de 60 mesh sobreposta a de 500 mesh, o resíduo da peneira foi recolhido em aproximadamente 40 mL para compor a suspensão final da amostra nematológica de raiz.

Uma alíquota de 1 mL da suspensão final foi avaliada em câmara de contagem de Peters, ao microscópio óptico para a contagem de ovos e juvenis de segundo estágio de *M. exigua* nos pontos amostrados.

Uma amostra de raízes coletada na Fazenda A foi utilizada para extrair o corte perineal do nematoide fêmea de *M. exigua* e observação das características relativas ao arranjo de suas estrias. Concomitantemente a amostra foi avaliada pela técnica de marcadores SCAR (Sequence Characterized Amplified Regions) (PARAN; MICHELMORE, 1993), realizada pela EMBRAPA Recursos Genéticos e Biotecnologia, confirmando que população de *Meloidogyne* encontrada na Fazenda A é de *M. exigua* (Figura 12).

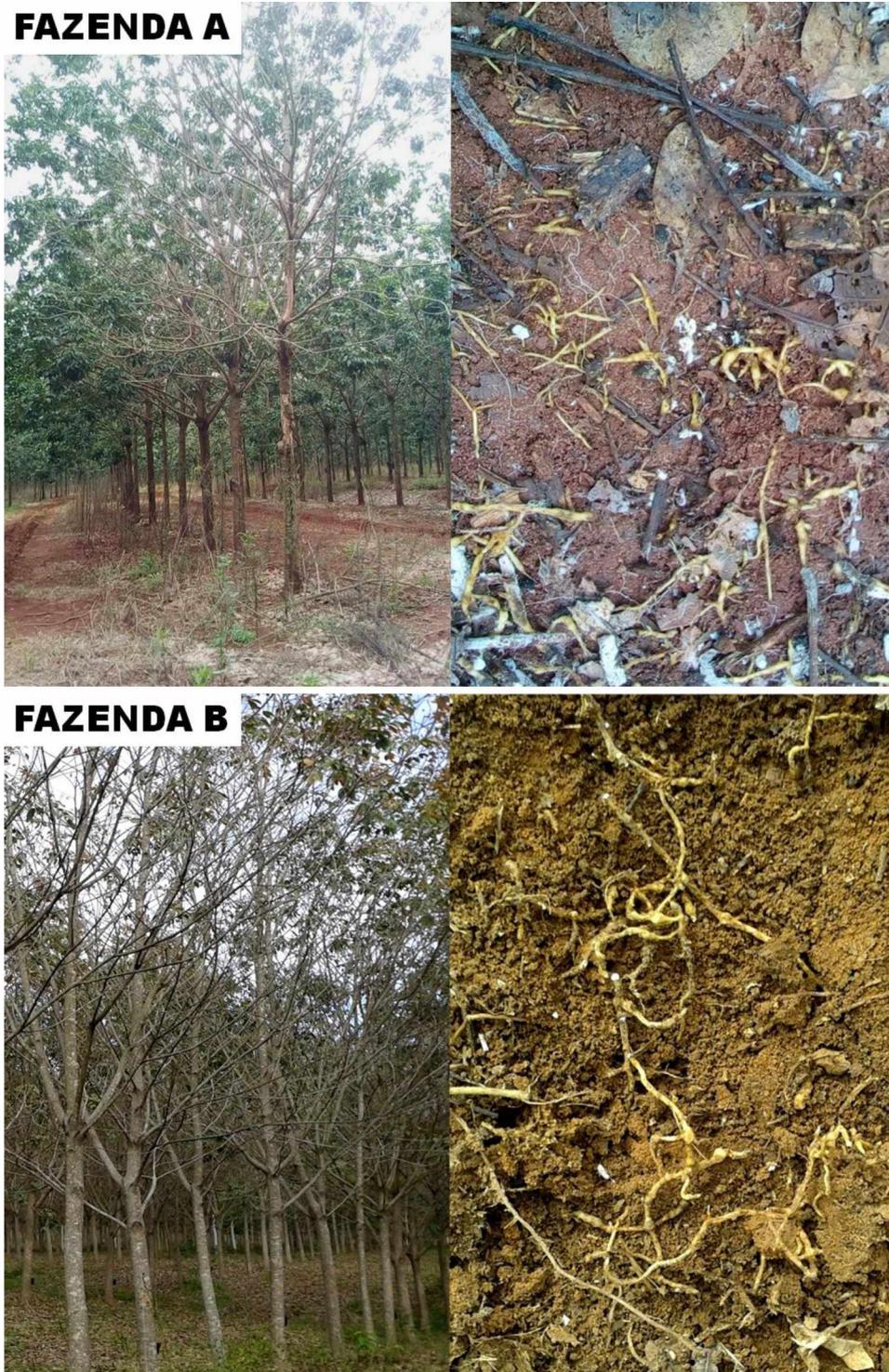
FIGURA 12. Fotomicrografia de corte perineal de *Meloidogyne exigua* (A) (Foto: Gontijo, L. N.), e gel de eletroforese para comprovação de *Meloidogyne exigua* (B) - M: marcador de DNA 1Kb; Am: amostra de DNA da Fazenda A; CE- controle (+) *M. exigua* (562 pb); CI: Controle (+) *M. incognita* (399 pb); CN: Controle (-), sem DNA.



O seringal da Fazenda B foi plantado com mudas provenientes do mesmo fornecedor de partes das mudas para o seringal da Fazenda A. Existiu ainda o fato de ocorrerem desfolhas prematuras no seringal e a grande semelhança entre as lesões ao

sistema radicular das seringueiras afetadas nas duas fazendas (Figura 13) sugerindo que ambas as áreas estão infestadas pelo *M. exigua*, raça 3.

FIGURA 13. Desfolha prematura das seringueiras (esquerda) e presença abundante de galhas nas raízes (direita). Fazenda A e Fazenda B, 2016.



Fotos: Lemes, E. M.

3.5 Imagens de satélite

As imagens utilizadas para composição dos índices espectrais de vegetação utilizados nesse trabalho foram captadas por sensores a bordo da constelação dos satélites alemães Rapid Eye® (sensor REIS – RapidEye Earth Imaging System) oferecidas no Geocatálogo do Ministério do Meio Ambiente.

Os sensores nos satélites Rapid Eye® obtêm imagens da Terra em cinco faixas espectrais: azul (blue, 440-510 nm), verde (green, 520-590 nm), vermelho (red, 630-685 nm), vermelho de borda (red edge, 690-730 nm), e infravermelho próximo (near infrared, 760-850 nm). Na Tabela 1 são apresentadas outras características técnicas dos satélites Rapid Eye® e do sensor REIS a bordo.

TABELA 1 - Informações técnicas sobre os satélites Rapid Eye® e sensor REIS instalado nos satélites.

Lançamento	29 de agosto de 2008
Tipo de órbita	LEO (low earth orbit), hélio síncrona quase polar
Altitude orbital média	634 km
Velocidade orbital	27.000 km h ⁻¹
Período orbital	96,7 minutos
Faixa de imageamento (<i>swath</i>)	77 km
Aquisição dos 5 satélites	4.500.000 km ² por dia
Número de órbitas por dia	14,9
Cruzamento com o Equador	11:00 h
Revisita <i>nadir</i>	5,5 dias
Revisita <i>off-nadir</i>	diária
Resolução espacial (<i>nadir</i>)	6,5 m
Tamanho do pixel (ortorretificado)	5 m
Profundidade de cor	12 bits (4.096 cores)

Fonte: Amskepler (<<http://www.amskepler.com/rapideye-info/>>).

As imagens juntamente com os pontos georeferenciados foram trabalhados no software ENVI® Classic (Environment for Visualizing Images) e o procedimento gráfico no software Arc Gis® 10.1. Ao se importar a imagem para o software ENVI® Classic, foram executadas as operações para cálculo do índice NDVI e a razão simples:

$(\text{float } (b5) - b3) / (\text{float } (b5) + b3)$, e $(b5) / (b3)$, respectivamente, onde “b3” corresponde à banda “red”, e “b5” e à banda “near infrared”.

As datas das imagens foram definidas conforme a disponibilidade das imagens RapidEye®, sendo usadas imagens de fevereiro de 2014. As imagens RapidEye® foram processadas para a redução de considerável parte dos ruídos (FELIX, 2009), no entanto nenhum tratamento foi aplicado para reduzir a interferência da atmosfera. Segundo Schowengerdt (2006) para caracterizar espectralmente um alvo da superfície terrestre é essencial eliminar ou minimizar os efeitos da atmosfera (vapor d’água, ozônio, aerossóis, poluição, etc) sobre os pixels de uma imagem. Neste trabalho, a correção dos ruídos de origem atmosférica nas imagens RapidEye® foi realizada pelo software ENVI® Classic com o uso do módulo de correção FLASH.

3.6 Análise estatística

A relação entre as respostas espectrais (NDVI e RS) da copa da seringueira e a densidade de nematoides no solo, na raiz e total (solo + raiz) presentes nos pontos amostrados foi estimada através de (i) gráficos de dispersão e (ii) regressões, obtidos com o auxílio do software Sigma Plot® v. 12, e dos (iii) coeficientes de correlação de, Pearson (1892), Spearman (1904) e Kendall (1938) e calculados com o auxílio do software SPSS Statistics®. As correlações são medidas adimensionais de associação entre duas variáveis e variam entre “-1” (relação perfeitamente inversa) e “+1” (relação perfeitamente direta), sendo “0” a ausência de correlação ou um indicativo de correlação não linear.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) é utilizado para expressar quanto uma associação de variáveis quantitativas pode ser descrita por uma função linear. Esta correlação é calculada através da razão entre a variância conjunta, ou covariância, das duas variáveis e o produto de seus respectivos desvios padrão. Para evitar erros associados ao cálculo e à interpretação da correlação de Pearson é importante que os dados estejam normalmente distribuídos e ausentes de *outliers* (valores extremos) (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009).

O coeficiente de correlação de Spearman (ρ) é uma medida de dependência estatística não-paramétrica entre duas variáveis ordinais que indica o quão bem uma relação pode ser descrita em uma função monotônica (função constante, crescente ou decrescente) que não necessariamente é linear. Diferentemente do coeficiente de

correlação de Pearson (r), o coeficiente de correlação de Spearman não exige que as variáveis apresentem distribuição normal dos resíduos e nem a presença de *outliers* prejudica a dependência entre variáveis (SIEGEL, 1975).

O coeficiente de correlação de Kendall (τ), assim como o coeficiente de correlação de Spearman (ρ), é uma medida de correlação não paramétrica para dados ordinais. No entanto, nesta correlação os dados de ambas as variáveis são posicionados em ranques e a concordância entre os ranques dos respectivos dados é utilizada para calcular o coeficiente. O coeficiente de correlação de Kendall representa, portanto, a probabilidade de ocorrência de pares de dados das variáveis que são concordantes das variáveis (KENDALL, 1970; SIEGEL, 1975).

3.7 Programas utilizados

Para a seleção das áreas, a obtenção dos dados e o seu processamento foram utilizados os seguintes programas computacionais:

Google Earth Engine (Google Inc.): utilizado para a construção dos mapas de índices espectrais de vegetação a partir das imagens LandSat 8;

Google Earth (Google Inc.): utilizado para uma pré-seleção dos pontos a serem georreferenciados no mapa que foi então impresso para auxiliar na localização dos pontos nas áreas do trabalho, e para localizar os pontos após o georreferenciamento;

TrackMaker®: utilizado para download dos pontos georreferenciados com GPS na amostragem de solo e raízes de seringueira, e transformação dos pontos coletados para o formato “.kmz”, que é o formato de reconhecimento do Google Earth;

Windows Office® EXCEL: utilizado para organizar as informações sobre os pontos georreferenciados, para cálculos aritméticos dos índices espectrais e da estatística descritiva dos dados;

RapidEye®: utilizado para gerar os dados das imagens e respectivas bandas espectrais das áreas desse trabalho;

ENVI® Classic: utilizado para correção dos ruídos atmosféricos nas imagens provenientes da composição RapidEye®;

ArcGIS® versão 10.2.1: utilizado para limitar e registrar os pontos georreferenciados nas imagens; converter os números digitais das banda espectrais para valores comparáveis, e elaboração dos mapas dos índices NDVI e razão simples. As

cores utilizadas na escala dos mapas NDVI e razão simples foram elaboradas para melhor interpretação visual do mapa;

Sigma Plot® v. 12: utilizado para plotar os gráficos de dispersão entre os índices de vegetação (NDVI e razão simples) e a densidade de nematoides no solo, raiz e total (solo + raiz);

SPSS Statistics®: utilizado para identificar valores *outliers* através de gráficos boxplot dos residuais (CHAMBERS et al., 1983) avaliar a normalidade de distribuição dos resíduos dos dados [Kolmogorov-Smirnov (KOLMOGOROV, 1956; SMIRNOV, 1936) ou Shpauro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965) ambas ao nível de probabilidade de $p < 0,01$], calcular as regressões e as correlações (Pearson, Spermann e Kendall) entre os índices espectrais de vegetação e as densidades de nematoides; e,

SISVAR (FERREIRA, 2011) versão 5.6: utilizado para a análise de variância e teste de médias de Tukey ($p < 0,05$) entre as variáveis das fazendas.

4 RESULTADOS

A identificação de *outliers* entre as medidas das variáveis avaliadas em ambas as localidades foi executada com o auxílio de gráficos boxplots de distribuição dos resíduos. Os boxplots das variáveis avaliadas na Fazenda A e Fazenda B são apresentados nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

FIGURA 14. Boxplots dos residuais dos índices espectrais NDVI e RS, e das densidades de nematoides no solo, raiz e total (solo + raiz) na Fazenda A. Os círculos são *outliers* e asteriscos são *outliers* extremos, com valores superiores a três vezes a altura do box. Os números indicam linhas no conjunto de dados que são *outliers*.

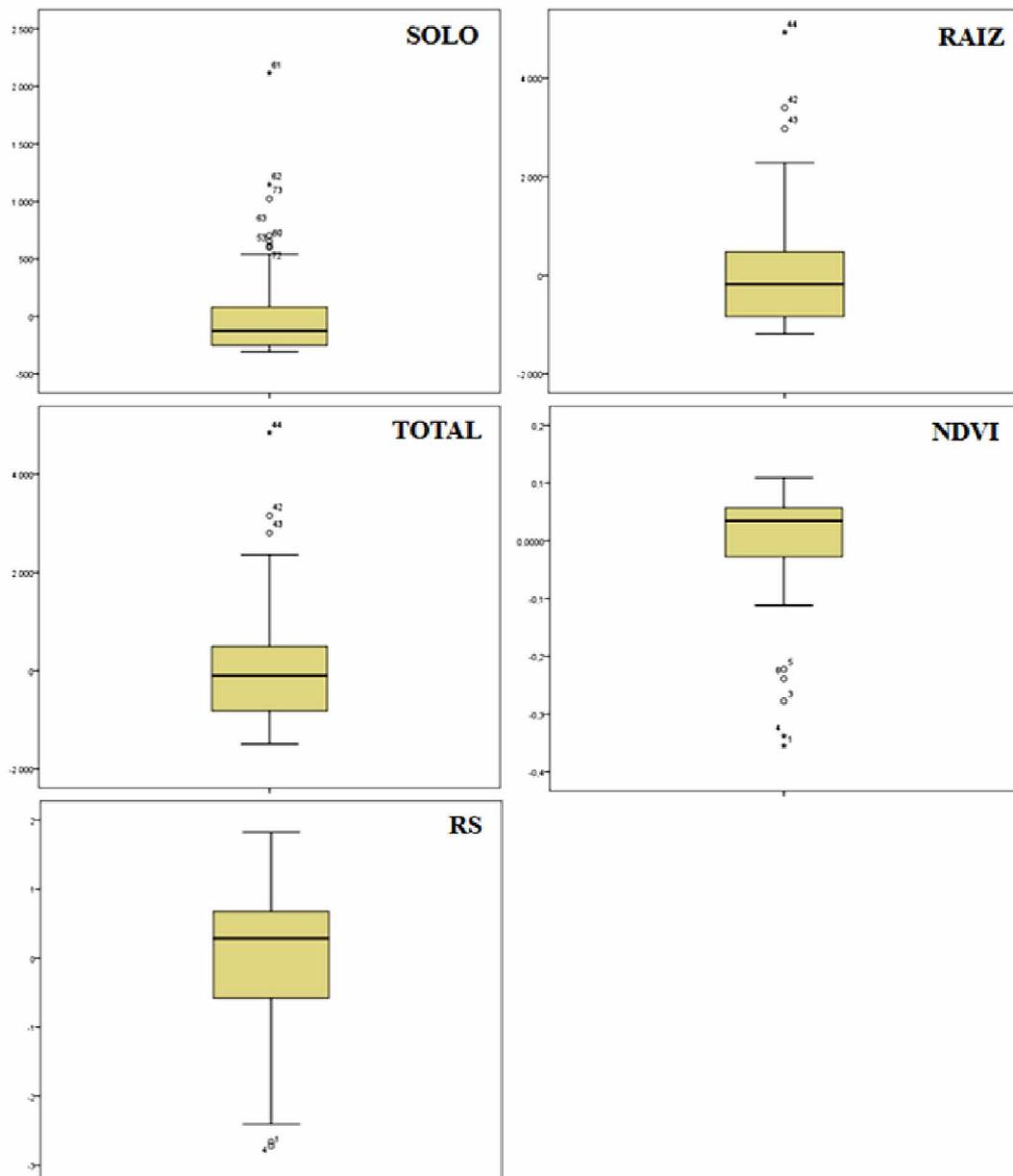
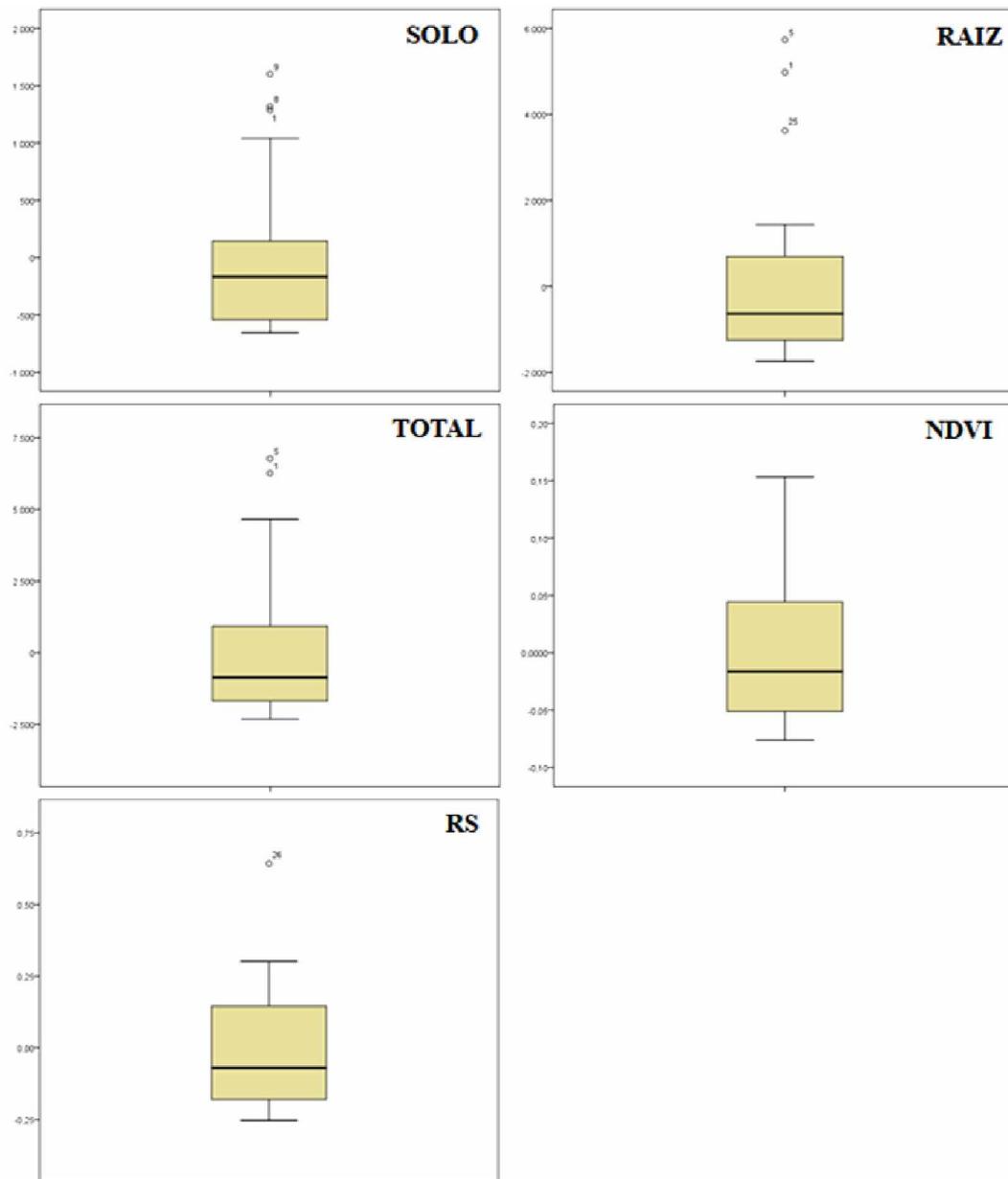


FIGURA 15. Boxplots dos residuais dos índices espectrais NDVI e RS, e das densidades de nematoides no solo, raiz e total (solo + raiz) da Fazenda B. Os círculos são *outliers* e números indicam linhas no conjunto de dados que são *outliers*.

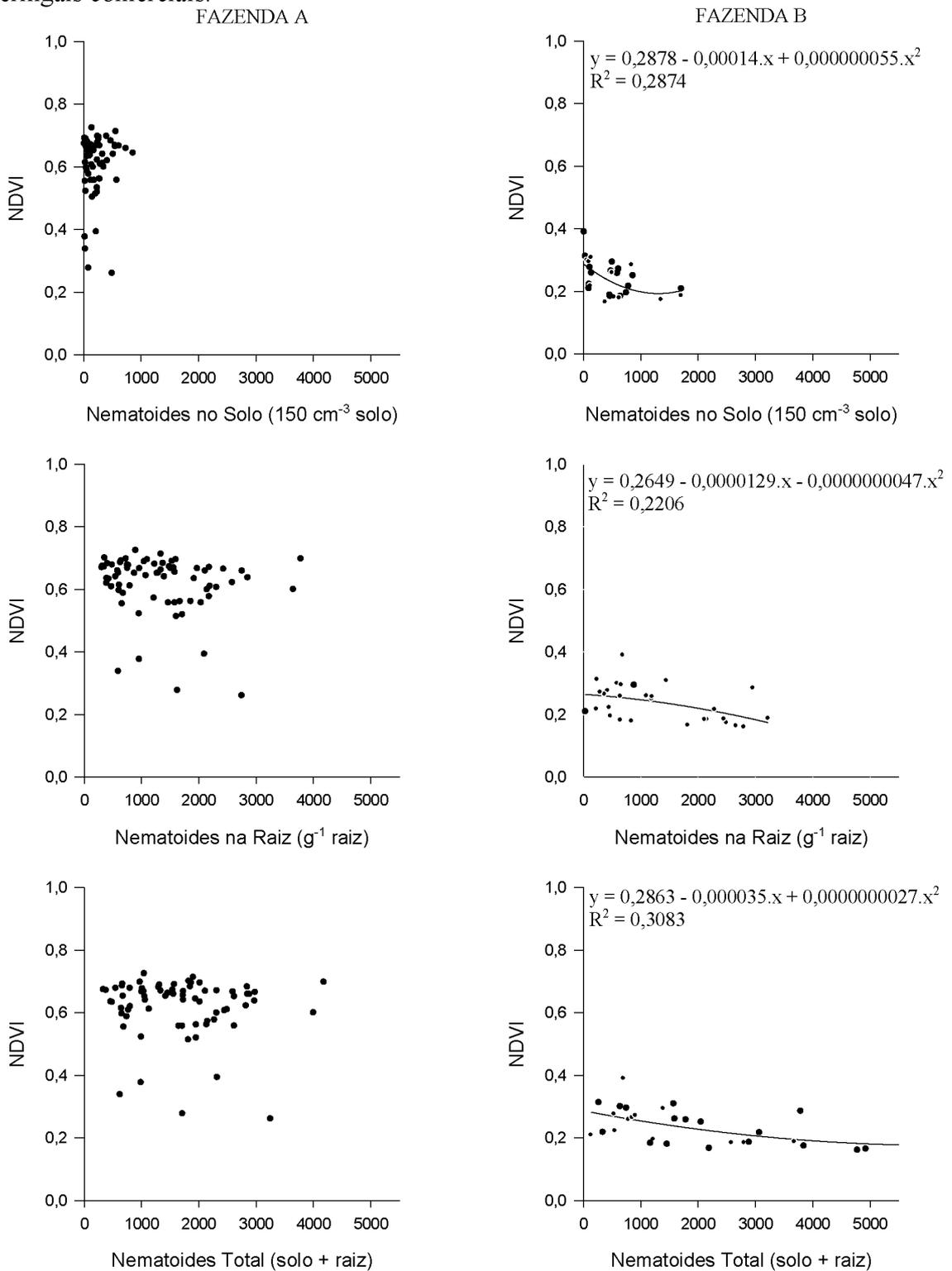


As avaliações extremas identificadas pelos boxplots foram excluídas e o conjunto resultante de dados foi utilizado para a estimativa da normalidade dos resíduos, a composição dos gráficos de dispersão, o cálculo da estatística descritiva e das correlações entre os índices espectrais e as densidades de nematoides.

Os gráficos de dispersão dos dados do índice espectral de vegetação NDVI (variável dependente) versus as densidades de nematoides (variáveis independentes)

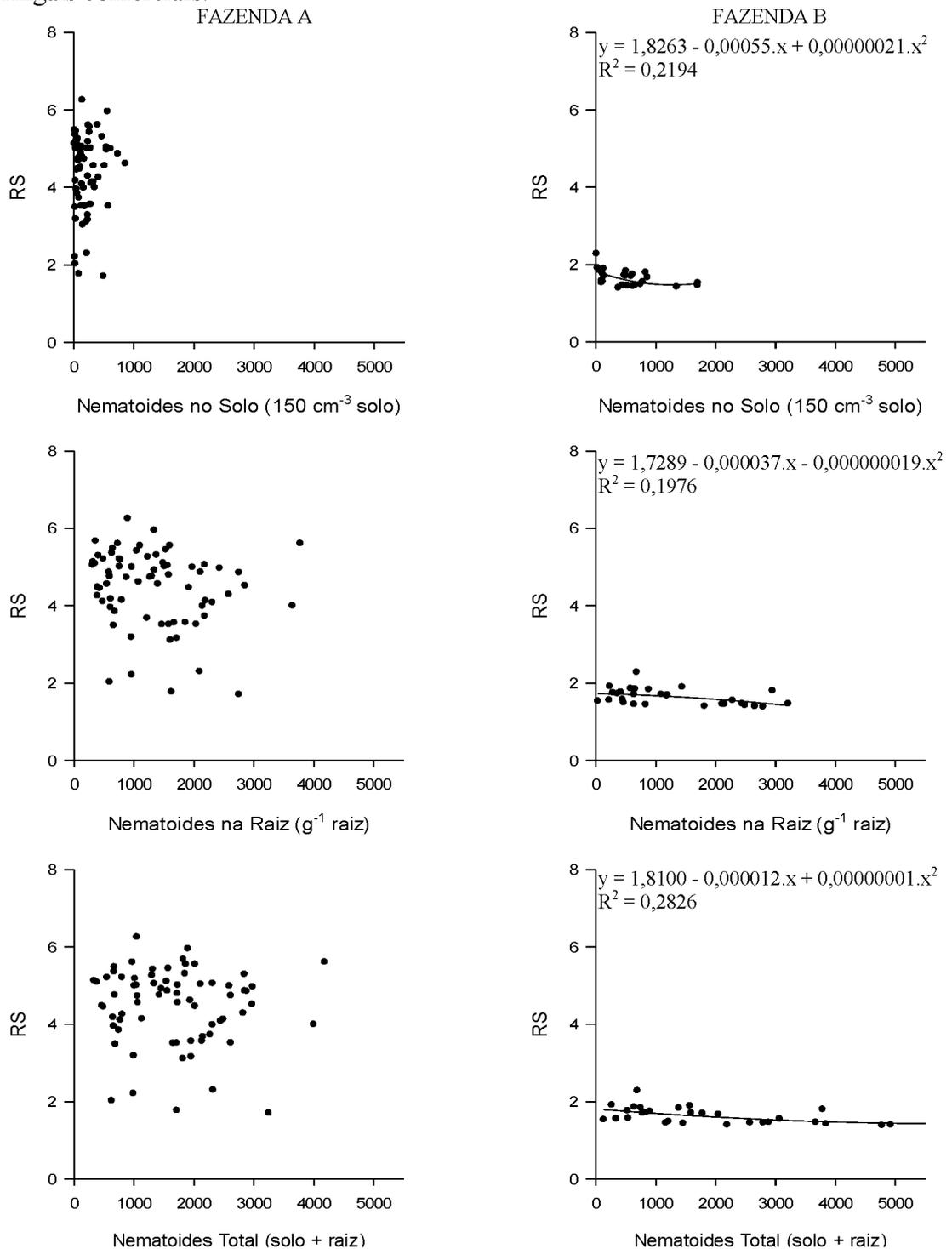
para ambas as fazendas são apresentados no Gráfico 1. As regressões apresentadas são significativas pelo teste F (Fisher-Snedecor) da análise de variância ($p < 0,05$).

GRÁFICO 1. Dispersão do índice NDVI versus as densidades de nematoides em dois seringais comerciais.



Os gráficos de dispersão dos dados do índice espectral de vegetação RS (variável dependente) versus as densidades de nematoides (variáveis independentes) para ambas as fazendas são apresentados no Quadro 2. As regressões apresentadas são significativas pelo teste F (Fisher-Snedecor) da análise de variância ($p < 0,05$).

GRÁFICO 2. Dispersão do índice RS versus as densidades de nematoides em dois seringais comerciais.



Para ambos os índices espectrais avaliados apenas as observações realizadas na Fazenda B (sudeste do Goiás) foram significativas ($p < 0,05$) para a composição da regressão polinomial quadrática (Figuras 16 e 17). No entanto, o coeficiente de determinação (R^2) dessas regressões foi capaz de explicar menos de um terço ($R^2 < 0,31$) da variação das densidades de nematoides (variável independente, ou endógena) em função variação nos índices espectrais de vegetação (variável dependente ou exógena).

A estatística descritiva das observações (sem *outliers*) das densidades de nematoides em ambas as localidades desse estudo e de seus respectivos índices espectrais é apresentada na Tabela 2.

TABELA 2. Estatística descritiva das densidades de nematoides e índices espectrais em diferentes seringais.

Medidas	Solo ¹	Raiz ²	Total ³	NDVI ⁴	RS ⁵
FAZENDA A					
Máximo	862	3780	4182	0,7241	6,2477
Mínimo	16	312	335	0,5031	2,0191
Média	220 ^a	1340 ^a	1670 ^a	0,6357 ^a	4,4983 ^a
CV (%)	87,46	59,44	51,87	8,43	19,83
Desv. Padrão	191,30	791,02	859,91	0,0532	0,8858
FAZENDA B					
Máximo	1708	3215	4926	0,3897	1,9351
Mínimo	12	36	132	0,1601	1,3811
Média	521 ^b	1285 ^a	2012 ^a	0,2363 ^b	1,6134 ^b
CV (%)	24,36	10,98	87,13	75,63	82,39
Desv. Padrão	446,81	955,20	1629,63	0,0567	0,1743

1: Nematoides no solo (150 cm⁻³ solo). 2: Nematoides na raiz de seringueira (g⁻¹ raiz). 3: Nematoides total (solo + raiz). 4: Índice de vegetação por diferença normalizada. 5: Índice razão simples. a, b: letras distintas diferem pelo teste de médias de Tukey ($p < 0,05$) entre as fazendas após constatar significância na análise de variância ($p < 0,05$).

Os valores de máximo e mínimo são ilustrativos das dimensões que a população de nematoides, ou os índices espectrais, podem atingir. Porém, estes extremos dizem menos a respeito da população do nematoide nas duas fazendas e do comportamento espectral da copa das seringueiras como o podem a média, o coeficiente de variação (CV) e o desvio padrão. A densidade de nematoides no solo foi cerca de 236% superior na Fazenda B – apesar do elevado CV da densidade de nematoide no solo na Fazenda A

- enquanto que as médias dos índices espectrais de vegetação, NDVI e RS, foram superiores nesta última fazenda ($p < 0,05$). As médias de nematoides nas raízes e total foram similares entre os seringais ($p < 0,05$).

A estatística utilizada para avaliar a normalidade de distribuição dos resíduos dos dados coletados nas duas fazendas é apresentada na Tabela 3. Para os dados da Fazenda A foi aplicada a estatística de Kolmogorov-Smirnov ($p < 0,01$), a medida que na Fazenda B foi aplicada a estatística de Shpauro-Wilk ($p < 0,01$).

TABELA 3. Estatística de verificação da normalidade de distribuição dos resíduos dos dados (sem *outliers*) originais e transformados coletados nas duas fazendas.

		Originais	Raiz (x + 1)	Log (x + 10)
		Estatística K-S ^K		
FAZENDA A	Solo ¹	0,144	0,082*	0,093*
	n	67	67	67
	Raiz ²	0,103*	0,087*	0,093*
	n	71	71	71
	Total ³	0,109*	0,087*	0,126
	n	71	71	71
	NDVI ⁴	0,146	0,148	0,151
	n	69	69	69
	SR ⁵	0,115*	0,126	0,123
	n	72	72	72
		Estatística S-W ^S		
FAZENDA B	Solo	0,854	0,944*	0,920*
	n	29	29	29
	Raiz	0,894	0,948*	0,924*
	n	29	29	29
	Total	0,880	0,971*	0,970*
	n	30	30	30
	NDVI	0,927*	0,930*	0,927*
	n	32	32	32
	SR	0,909*	0,910*	0,910*
	n	31	31	31

1: Nematoides no solo (150 cm^{-3} solo). 2: Nematoides na raiz de seringueira (g^{-1} raiz). 3: Nematoides total (solo + raiz). 4: Índice de vegetação por diferença normalizada. 5: Índice razão simples. K: Estatística Kolmogorov-Smirnov ($p < 0,01$) corrigida pela significância de Lilliefors. S: Estatística Shpauro-Wilk ($p < 0,01$). *: Normalidade na distribuição dos resíduos ($p < 0,01$). n: número de parcelas úteis (sem *outliers*).

O uso de diferentes testes estatísticos para a verificação da normalidade de distribuição dos resíduos é uma função do número de pontos de avaliação, ou do tamanho da amostragem (n). A amostragem na Fazenda A foi maior ($n > 50$), portanto é recomendada a aplicação da estatística de Kolmogorov-Smirnov, para amostragens com menor número de pontos, como é o caso da Fazenda B ($n < 50$), é recomendada a estatística de Shpauro-Wilk (AHAD et al., 2011; SHAPIRO; WILK, 1965; ELLIOTT; WOODWARD, 2007).

Os dados originais foram transformados em “raiz (x + 1)” e em “log (x + 10)” como alternativa para a identificação de normalidade na distribuição dos resíduos das variáveis. Para variáveis em que somente alguma transformação apresentasse normalidade, a correlação seria calculada com o correspondente conjunto de dados transformados dos índices espectrais. A existência de normalidade na distribuição dos resíduos é um requisito importante para uma forte correlação de Pearson (r), visto que essa correlação é afetada consideravelmente por valores extremos (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009). Para as correlações não paramétricas de Spearman e Kendall não há a exigência de normalidade na distribuição dos resíduos e são, portanto utilizados os dados originais para gerar estas correlações (Tabela 4).

TABELA 4. Correlações entre os índices espectrais de vegetação NDVI ou RS e a densidade de nematoides no solo, raiz e total (solo + raiz) nas duas fazendas.

Correlações	NDVI ¹			RS ²		
	Solo ³	Raiz ⁴	Total ⁵	Solo	Raiz	Total
FAZENDA A						
Pearson ^P	-0,318**	-0,322*	-0,249*	0,216	-0,222	-0,101
Spearman ^S	0,066	-0,288*	-0,174	0,130	-0,250*	-0,122
Kendall ^K	0,048	-0,183*	-0,105	0,093	-0,159*	-0,072
FAZENDA B						
Pearson ^P	-0,485**	-0,262	-0,337	-0,396*	-0,225	-0,287
Spearman ^S	-0,471**	-0,341	-0,451**	-0,419*	-0,333	-0,422*
Kendall ^K	-0,345**	-0,228	-0,313*	-0,303*	-0,230	-0,295*

1: Índice de vegetação por diferença normalizada. 2: Índice razão simples. 3: Nematoides no solo (150 cm⁻³ solo). 4: Nematoides na raiz de seringueira (g⁻¹ raiz). 5: Nematoides total (solo + raiz). P: Correlação dos índices espectrais com as densidades de nematoides originais, ou transformadas quando atenderam à pressuposição de normalidade dos resíduos. S e K: Correlação dos índices espectrais com as densidades de nematoides originais. *: Correlação significativa a $p < 0,05$. **: Correlação significativa ($p < 0,01$).

A correlação de Pearson foi significativa ($p < 0,05$), entre o NDVI e qualquer das densidades de nematoides (solo, raiz e total) na Fazenda A, enquanto que na Fazenda B, apenas a correlação de Pearson entre o NDVI, ou RS, e a densidade de nematoides no solo foi significativa ($p < 0,05$). As correlações não paramétricas (Spearman e Kendall) foram significativas ($p < 0,05$), entre o NDVI, ou a RS, e a densidade de nematoides na raiz da seringueira na Fazenda A, ao passo que na Fazenda B essas correlações foram significativas para a densidade de nematoides no solo e total ($p < 0,05$).

Os mapas das áreas das fazendas, em cores RGB (red, green, blue) (Figuras 16 e 19), em falsas cores gerados pelos índices espectrais de vegetação (NDVI e RS) (Figuras 17 e 18), ilustram como estava o comportamento da copa das árvores em fevereiro de 2014.

FIGURA 16. Imagem em RGB da Fazenda A (fevereiro, 2014).



FIGURA 17. Imagens (falsa cor) NDVI e RS da Fazenda A (fevereiro, 2014).

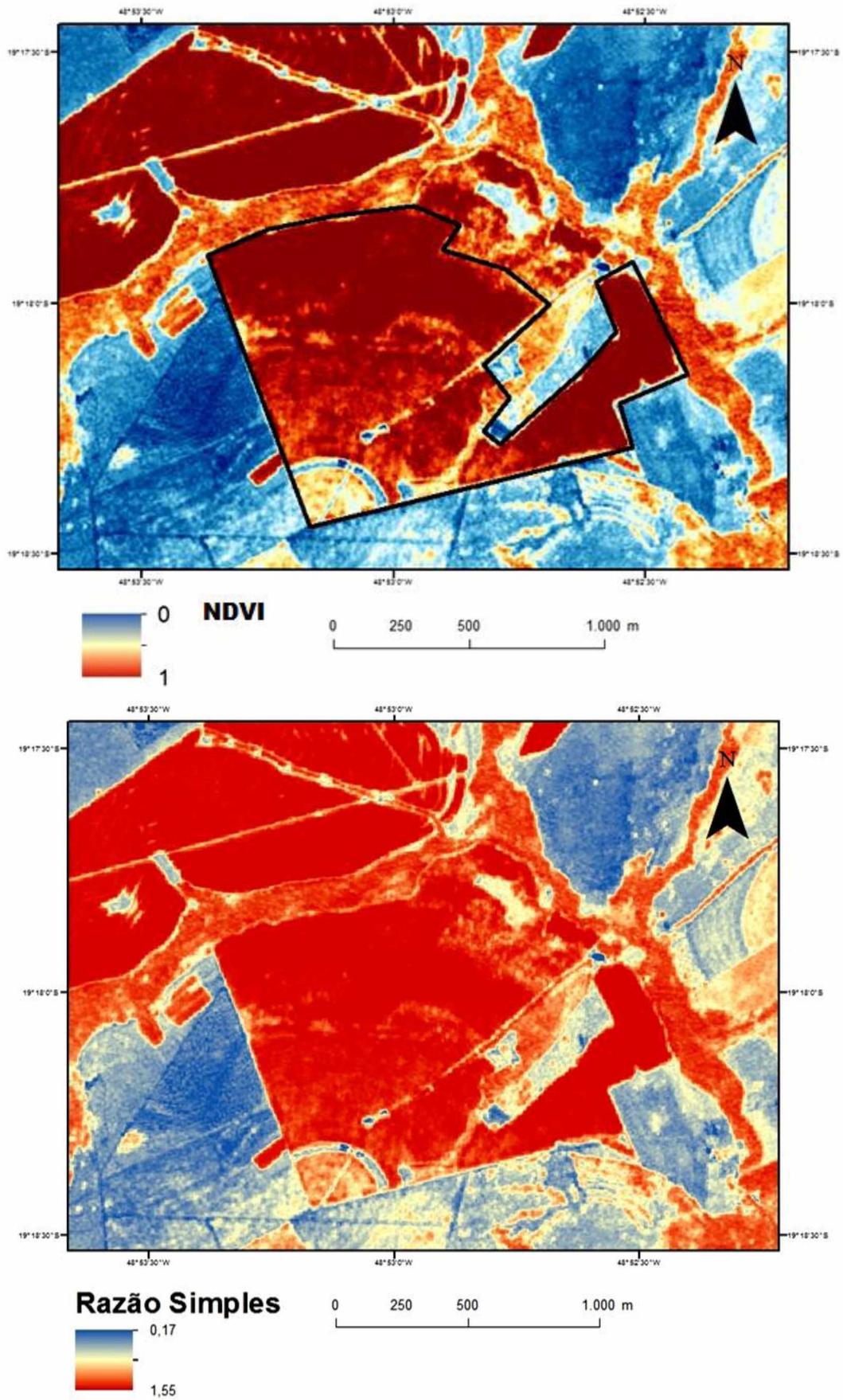


FIGURA 18. Imagens (falsa cor) NDVI e RS da Fazenda B (fevereiro, 2014).

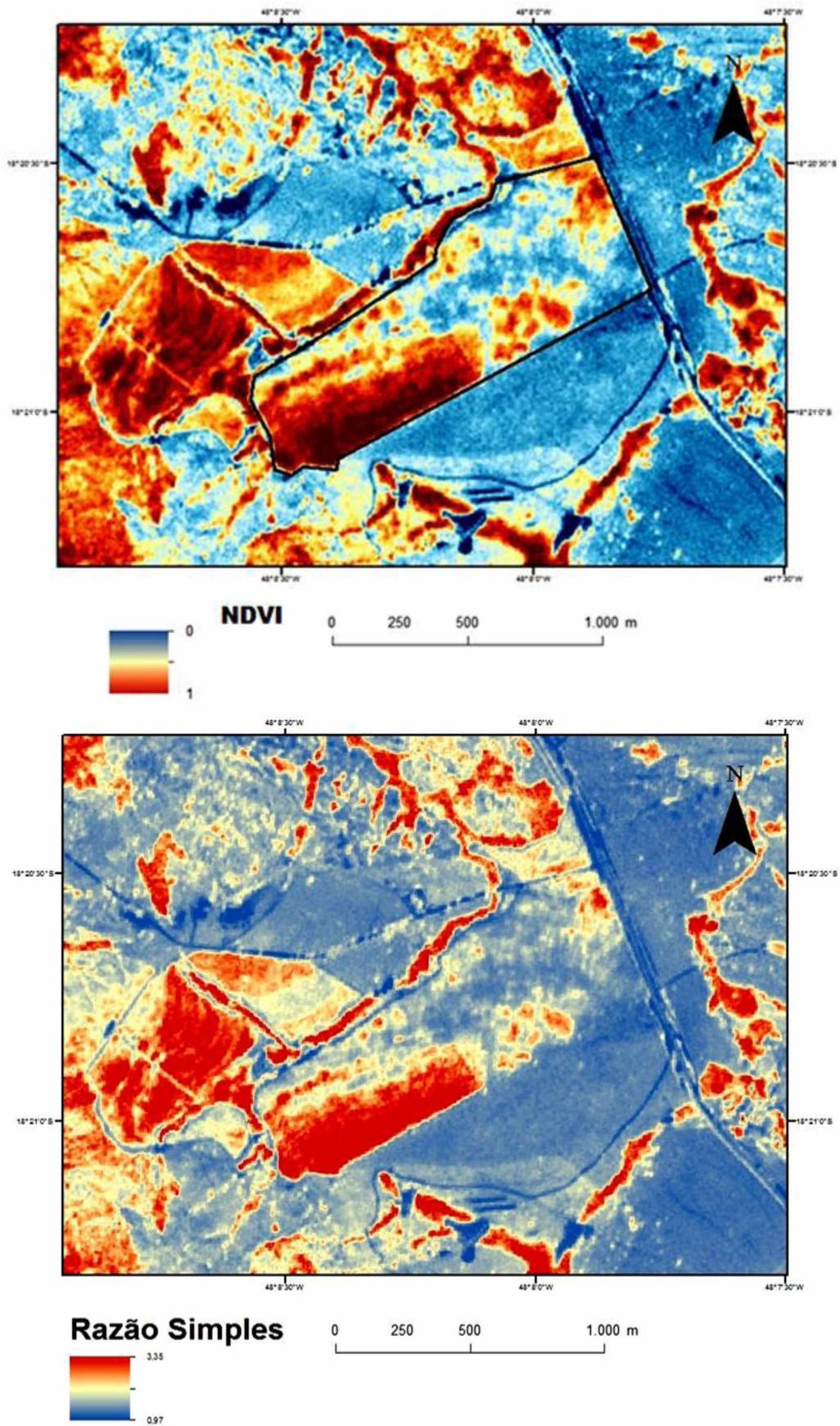
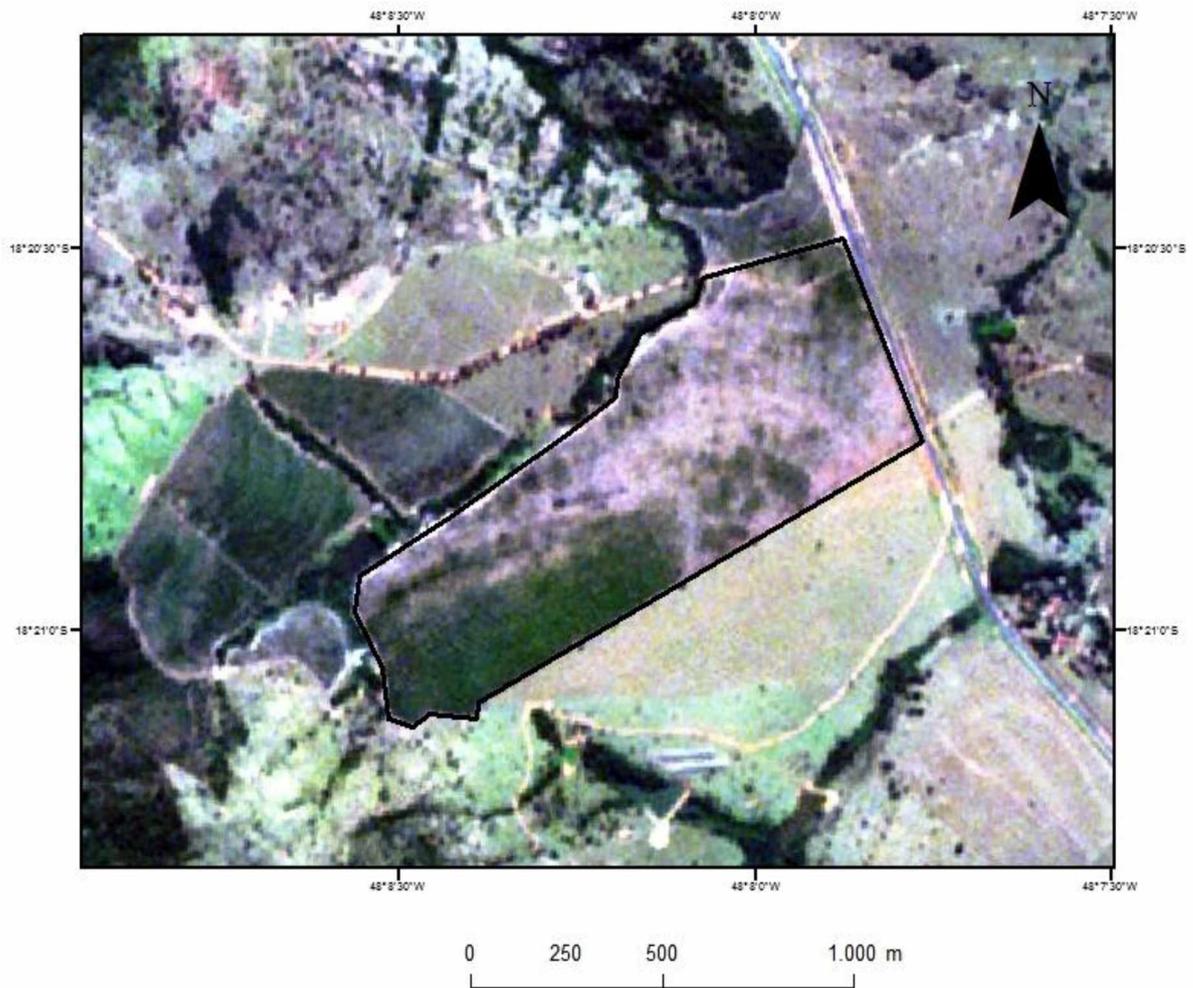


FIGURA 19. Imagem em RGB da Fazenda B (fevereiro, 2014).



As imagens em falsas cores, geradas a partir dos índices espectrais de vegetação NDVI e RS (Figuras 18 e 19), realçam gradações e diferenças que não se destacam nas imagens em RGB (Figuras 16 e 17). Em comparação as imagens geradas pelos índices espectrais das duas fazendas é possível notar que a área do seringal na Fazenda A é mais homogênea (tons de vermelho) que a área do seringal da Fazenda B (tons de vermelho e azul). Esta resposta dissimilar entre as imagens geradas pelos índices espectrais das áreas estudadas, especialmente na Fazenda B, está em consonância com as médias inferiores dos índices NDVI e RS, e o elevado CV (%) dessas medidas nessa fazenda (Tabela 2).

Outra característica notável a partir dos mapas gerados pelos índices espectrais é que os mapas do índice NDVI ou do índice RS apresentam respostas bastante similares, sem nenhuma das imagens se despontarem na detecção de áreas com vegetação. Em contraste com suas respectivas imagens RGB, o índice NDVI parece destacar mais

nitidamente as áreas com vegetação ainda fotossintetizante das áreas com desfolha acentuada.

5 DISCUSSÃO

Todas as informações obtidas a partir dos pontos selecionados para amostragem nas duas fazendas foram processadas para a maior representatividade possível do pixel correspondente e de seus respectivos índices espectrais. Os dados das densidades de nematoides e dos índices espectrais tiveram seus *outliers* identificados e excluídos na análise gráfica de boxplot com o objetivo de minimizar os efeitos da presença de dados extremos e elevar a confiabilidade das avaliações e conclusões conseguintes.

Apesar das imagens da constelação RapidEye® serem defasadas dois anos em relação à coleta das informações nematológicas, elas possuem resolução consideravelmente superior (5 m) à resolução do satélite Landsat 8 (30 m), embora este disponibilize imagens atualizadas a cada 16 dias. No caso das duas propriedades, há uma forte suspeita que a entrada do *M. exigua* nos seringais ocorreu através de mudas infectadas oriundas do mesmo fornecedor. Como as áreas amostradas para este estudo, em ambas as fazendas, eram áreas produtivas (áreas em sangria), então o nematoide já estava presente nas áreas há, pelo menos, sete anos.

Considerando essa entrada prematura do nematoide na área, as variações observadas nos índices espectrais gerados pelas imagens da constelação RapidEye® são esperadas que se perpetuem até o início de 2016 (época da amostragem para avaliação nematológica), em outras palavras, uma região do seringal que era altamente infestada pelo *M. exigua* em 2014, permanecerá também altamente infestada em 2016, e provavelmente em uma reboleira ainda maior devido às atividades culturais que envolvem o tráfego de máquinas e o trânsito de pessoas no seringal.

5.1 Áreas experimentais e estatística descritiva

Apesar de não haver informações sobre os hipobiotos utilizados nas fazendas estudadas, o que poderia sugerir a existência de diferenças na resistência ao ataque do nematoide de galhas pelos diferentes hipobiotos utilizados, Fonseca et al. (1999) e Paes-Takahashi et al. (2015) não observaram nenhuma diferença significativa na resistência ao *M. exigua* entre os vários clones avaliados, indicando que qualquer que tenha sido o hipobio utilizado para a produção das mudas em ambas as fazendas provavelmente ele seja suscetível.

Esta falta de genótipos de seringueira resistentes ao *M. exigua* demonstra que pouca ou nenhuma atenção foi dada à seleção de materiais, bastando que o hipobioto fosse compatível com o epibioto e o material já seria selecionado para a produção de mudas de seringueira (MARTINS et al. 2000). Nas culturas cítricas (CARLOS et al., 1997; SEMPIONATO et al., 1997), café (BARBOSA et al., 2014; SERA et al., 2006) e hortaliças (PEIL, 2003), por exemplo, já existem materiais em estágio mais avançado de seleção para resistência do hipobioto a doenças, especialmente aquelas que afetam o sistema radicular.

Os valores de nematoides encontrados neste estudo (Tabela 2) são similares aos encontrados por Pezzoni-Filho (2014) no estado do Mato Grosso e por Machado et al. (2014) em Minas Gerais, no entanto, são valores superiores aos encontrados por Wilken et al. (2015) em seringais no estado de São Paulo. Essas diferenças são provavelmente consequência da diversidade edafoclimática, da densidade de inóculo inicial e do manejo aplicado a esses seringais. Entretanto, estes relatos também ilustram outra situação, que é a ampla distribuição desse nematoide. Estes relatos recentes são, no mínimo, preocupantes uma vez que a literatura descreve os danos causados por uma infestação de *M. exigua* e pouco tem sido discutido sobre os reais impactos dessa doença na produção de borracha, como detectá-la antecipadamente, quais as formas de controle ou se este nematoide pode ser a causa primária da morte de seringueiras em áreas infestadas, assim como foi observado nas áreas desse estudo.

Os principais sintomas da morte descendente da seringueira são a seca e morte das ponteiros e galhos mais novos, o definhamento geral da seringueira e a morte da árvore. Apesar disso, estes sintomas típicos são reportados como sendo consequência da associação entre os danos causados pelo *M. exigua* e o fungo *L. theobromae* (SANTOS, 1995; SANTOS et al., 1992), ou da associação entre fungos como o *L. theobromae* e insetos das sub-famílias Scolytinae e Platypodinae (Coleoptera, Curculionidae) (GONÇALVES et al., 2014) apontando que a morte descendente não seria uma consequência exclusiva de uma infestação de *M. exigua*.

Contudo, durante as visitas e amostragens nos seringais desse estudo não foram observados os sintomas do ataque de coleobrocas nem as descolorações típicas de colonização por *L. theobromae*, exceto nas seringueiras mortas ou moribundas. Os danos causados por coleobrocas são geralmente ocasionados pelas fêmeas que ovipositam em madeira recém cortada, ou em árvores decadentes. Estas coleobrocas

abrem entradas para fungos que lhe servem de alimento e que aceleram a decomposição da madeira (COSTA et al., 2013).

Os valores dos índices espectrais observados foram superiores na Fazenda A, porém, apenas a densidade de nematoides no solo diferiu entre as áreas deste estudo, sendo superior na Fazenda B (Tabela 2). No momento das coletas das amostras de solo e raízes, em 2016, as seringueiras da Fazenda A estavam mais enfolhadas que as seringueiras da Fazenda B, uma situação similar àquela apresentada pelas imagens do mesmo período em 2014 (Figuras 18 e 19).

A elevada desfolha observada no seringal na Fazenda B foi uma situação também expressada pelas imagens desuniformes dos índices espectrais e seus baixos valores (Figura 19 e Tabela 2). Esta desfolha prematura do seringal na Fazenda B, juntamente ao número superior de nematoides no solo, pode indicar uma relação entre os danos causados à seringueira e a densidade de nematoides presentes no solo. Porém, está é uma situação (elevada densidade do nematoide no solo e baixos valores dos índices espectrais) que foi agravada pela falta da irrigação da área da Fazenda B, o que reduziu consideravelmente o volume de raízes novas e o aumento da densidade do nematoide no solo.

A densidade de nematoides em um solo é dependente da umidade presente e temperatura predominante, assim como da textura, química e microbiota do solo, e também da interação entre essas variáveis determina a sobrevivência dos fitonematoides (McKENRY; ROBERTS, 1985; FERRIS et al., 1990). Todavia, a distribuição vertical e horizontal de fitonematoides no solo de uma área é essencialmente uma função da presença de alimento (raízes jovens), cuja disponibilidade é influenciada por uma série de fatores determinantes, como as condições climáticas prevalentes, as espécies de plantas hospedeiras presentes, a arquitetura do sistema radicular, o espaçamento de plantio e o manejo aplicado à cultura (YEATS, 1987; FERRIS et al., 1990; PERRY; MOENS, 2005; VAN der STOEL et al., 2006; FERRAZ; BROWN 2016).

Entre os seringais deste estudo existem similaridades na idade e nas condições geográficas e climáticas, e estas semelhanças se refletiram nas densidades de nematoides na raiz e total entre os dois seringais. No entanto, a densidade superior de nematoides *M. exigua* no solo da Fazenda B, em relação à Fazenda A, foi provavelmente devido à falta de irrigação nessa fazenda. Condições momentâneas de estresses, como por exemplo, veranicos, infligiram ao seringal da Fazenda B uma intensa desfolha devido ao sistema radicular comprometido pela presença do nematoide

de galhas nesta fazenda. Essa desfolha prematura reduziu a quantidade de raízes e a disponibilidade de alimento para o *M. exigua* o que elevou sua população no solo no período da amostragem. A irrigação da Fazenda A, contudo, não foi suficiente para suprimir as perdas causadas pelo *M. exigua* ao seringal e muitas áreas dentro da fazenda apresentaram considerável desfolha e árvores mortas. Entretanto, a irrigação homogeneizou as respostas da Fazenda A, que além de apresentar um baixo CV (%) para os índices espectrais e conseqüentemente, uma imagem mais homogênea (Figura 18) ainda apresentou elevados valores para estes índices quando comparados com os índices gerados na Fazenda B.

5.2 Amostragem e dispersão dos dados

A amostragem das fazendas foi programada para a segunda metade do período chuvoso da região para que maiores quantidades de galhas pudessem ser encontradas, segundo o que foi observado por Souza et al. (1998) para o *M. exigua* no cafeeiro. No caso da seringueira, os períodos de amostragem para nematoide entre os meses de junho a agosto devem ser evitados, pois é quando a seringueira hiberna e perde todas as folhas e parte do sistema radicular (MORAES, 1982) semelhante ao que ocorre com o cafeeiro (ALMEIDA et al., 1987). Esta hibernação ajuda na redução da população de *M. exigua* no sistema até o início do período chuvoso, quando novas raízes (alimento para o nematoide) são produzidas e infectadas pelo inóculo latente (PEZZONI-FILHO, 2014), sendo, portanto, o período de hibernação da seringueira e os meses iniciais do período das chuvas menos recomendados para a amostragem de nematoides.

Os pontos de amostragem da Fazenda A foram direcionados pelos índices espectrais gerados pelas imagens Landsat 8 de outubro de 2015, com o intuito de amostrar áreas extremas, com intensa desfolha e a presença considerável de galhas, bem como as áreas com aparente enfolhamento normal da copa da seringueira e com poucas, ou nenhuma galha presente nas raízes. Essa amostragem foi realizada de modo que houvesse uma representatividade maior das situações extremas de um seringal infestado por *M. exigua*. A amostragem da Fazenda B, no entanto, foi completamente aleatorizada com o intuito de convalidar a existência de alguma relação significativa entre os índices espectrais observados e qualquer das densidades de nematoides presentes na seringueira.

Pela dispersão das densidades de nematoides no solo, raiz e total (Quadros 1 e 2) foi possível notar uma elevada difusão dos dados, especialmente na Fazenda A, o que também pode ser observado pelos elevados coeficientes de variação (Tabela 2). Notavelmente, apenas os gráficos de dispersão das densidades de nematoides pelos índices espectrais (NDVI ou RS) da Fazenda B apresentaram regressões quadráticas significativas, apesar de baixos coeficientes de determinação ($R^2 < 0,31$).

A identificação de significância de uma regressão quadrática das densidades de nematoides avaliadas na Fazenda B indica que entre os pares de dados (densidade de nematoides vs. índices espectrais) há uma relação de expoente 2 e que pode ser parcialmente explicada por uma função polinomial através de seu coeficiente de determinação (R^2). Porém essa função não necessariamente reflete uma condição fisiológica natural.

As funções polinomiais quadráticas apresentam um ponto de mínimo, ou máximo e após este ponto de inflexão as respostas previstas pelas variáveis se invertem, por exemplo, as funções polinomiais das densidades de nematoides na raiz e total para ambos os índices espectrais na Fazenda B apresentam o coeficiente “a” da regressão quadrática positivo, portanto, indicando que em certo momento haverá um “ponto de mínimo” para a densidade de nematoides e que a partir desse ponto é previsto pela regressão quadrática que o número de nematoides aumentaria e o valor do índice espectral também. Este comportamento previsto pelas funções quadráticas é biologicamente um contrassenso visto que um maior número de nematoides presentes no sistema indica que as raízes de seringueira serão mais prejudicadas e que, logo, deveria reduzir o valor do índice espectral observado.

A maioria dos parasitas de plantas está disformemente distribuída na área agrícola, sendo caracterizados pela formação de padrões espaciais de reboleiras de plantas subdesenvolvidas ao longo da área de cultivo. Uma infestação de nematoides geralmente ocorre em reboleiras que se expandem na área até os limites do campo agrícola, e uma função polinomial quadrática talvez não seja a melhor forma de expressar a relação que existe entre o valor do índice espectral de um pixel e as quantidades pontuais de nematoides. Esta inobservância de maior adequação de um modelo matemático à interação nematoide de galhas \times índice espectral também pode ser devido a existir um nível tolerado de nematoides pela seringueira que não seja suficiente para causar reduções significativas nos índices espectrais.

5.3 Correlações com nematoides e índices espectrais

Na análise da regressão foi possível estudar funções que pretendem descrever em termos matemáticos o relacionamento entre as variáveis: densidade de nematoides e índices espectrais. Embora fossem identificadas regressões significativas somente para o conjunto de dados da Fazenda B, as funções polinomiais justificaram pouco do comportamento dessas variáveis. Já nas correlações foi possível medir o grau, ou a força de associação entre duas variáveis.

Todas as correlações significativas ($p < 0,05$) paramétricas ou não paramétricas, entre as densidades de nematoides e os índices espectrais de vegetação neste estudo foram negativas. Esta resposta unânime não foi inesperada por causa do aumento da densidade de nematoides de galhas na seringueira prejudicaria o desenvolvimento do sistema radicular e afetaria negativamente a qualidade fisiológica folhagem na copa e conseqüentemente os índices espectrais de vegetação.

As densidades de nematoides tiveram correlações significativas, paramétricas e não paramétricas, com os índices NDVI ou RS em alguma das fazendas deste estudo. A correlação de Pearson assume que a associação entre estas variáveis seja uma função linear de resposta, enquanto que as correlações não paramétricas de Spearman e Kendall são correlações ordinais, que não são interpretadas como a correlação de Pearson. A correlação de Spearman é um índice de monotonicidade (função monotônica), ou seja, avalia a relação entre duas variáveis seja ela linear, ou não, enquanto que a correlação de Kendall avalia o pareamento dos dados ranqueados.

Entretanto, apesar das peculiaridades das correlações estudadas, o que destacou dos resultados foi que o índice NDVI, apresentou mais e maiores correlações significativas e muitas correlações significativas a 1% ($p < 0,01$) demonstrando que esse índice se correlacionou melhor com as densidades de nematoides observadas neste estudo.

As correlações significativas entre as densidades de nematoides e os índices espectrais avaliados neste estudo diferiram de acordo com a fazenda estudada. A Fazenda A apresentou mais correlações significativas entre a densidade de nematoide na raiz, à medida que a densidade de nematoide no solo foi predominantemente significativa na Fazenda B. Essa diferença é devido à irrigação na Fazenda A, o que permite a manutenção de raízes novas de seringueira e um ambiente radicular favorável para o nematoide sobreviver. Na Fazenda B os nematoides têm menor oferta de

alimento (raízes jovens de seringueira) uma vez que a oferta de água é natural via chuva, por conseguinte a densidade do nematoide no solo é maior.

Diferentemente dos processos tradicionais de pesquisa e testes de tratamentos com avaliações *in situ*, as avaliações possibilitadas pelos índices espectrais de vegetação são relativamente simples de se obter e interpretar, e efetivas quando amparadas por uma estatística apropriada. Os índices espectrais de vegetação são, portanto, vias de analisar as plantas de uma forma não destrutiva e remotamente através da interpretação da radiação refletida em bandas espectrais específicas (BROGE; LEBLANC, 2000; HATFIELD et al., 2008; JENSEN, 2009; LE MARIE et al., 2012; MAHLEIN, 2016).

Diversas avaliações da sanidade das plantas são feitas pela comparação da quantidade de radiação refletida pela folhagem no espectro vermelho (RED) e no espectro do infravermelho próximo (NIR). Uma vegetação densa e fotossinteticamente ativa, apresenta uma assinatura espectral típica onde absorve grandes quantidades de radiação vermelha (0,6 a 0,7 μm) e em contraste reflete grandes quantidades de radiação infravermelha (0,7 a 0,9 μm) devido ao espalhamento das células no mesófilo foliar (FEDERER; TANNER, 1966; NOBEL, 1991; PONZONI et al., 2012). Quanto maior for essa diferença maior será o vigor observado na vegetação, este é o princípio que norteia a maioria dos índices espectrais de vegetação.

Os índices selecionados para avaliação neste estudo foram escolhidos por apresentarem relação direta com a fisiologia vegetal (ROSA, 2009; PEZZONI-FILHO 2014; MARTINS; GALO, 2015). O índice razão simples (NIR / RED) foi elaborado para expressar uma condição natural da vegetação sadia (baixa reflectância do RED e alta reflectância do NIR) e reduzir os efeitos de albedo que poderiam causar interpretações errôneas da vegetação caso fosse utilizada apenas uma banda espectral.

Outro índice bastante utilizado é o NDVI (MAHLEIN, 2016). Este índice tem sido questionado na literatura por saturar em valores próximos a +1, quando ocorre um elevado índice de área foliar e que, conseqüentemente, o NDVI não forneceria informações precisas em valores elevados. No caso deste estudo, os maiores valores encontrados para NDVI foram da Fazenda A, em torno de +0,7, o que não são valores extremamente elevados e não prejudicam a interpretação desse índice neste estudo.

Os mapas de índices de vegetação NDVI e RS gerados a partir de imagens com resolução de 5 m (RapidEye®) permitiu a identificação de correlações significativas moderadamente fortes entre as densidades de nematoides e estes índices. Já o estudo realizado por Pezoni-Filho (2014) não identificou correlações significativas entre o

índice NDVI e as densidades de *M. exigua* em diversos clones de seringueira para duas épocas do ano. Entretanto, o autor utilizou informações espectrais do satélite Landsat 5, que possui resolução espacial de 30 metros, ou 900 m² por pixel. A elevada área do pixel, quando comparada à área do pixel gerado pelo satélite RapidEye® (25 m²), provavelmente comprometeu a identificação de uma correlação entre o índice NDVI e a ocorrência do *M. exigua* entre os clones de seringueira estudados para qualquer das épocas avaliadas.

A utilização de imagens multiespectrais, mesmo com resoluções maiores como as oferecidas pela constelação RapidEye®, ainda envolve uma variabilidade intrínseca difícil de ser controlada. A amostragem para a ocorrência e a identificação de fitonematoides é pontual e amostrar um ponto em 25 m² é um complicador, pois nessa área pode haver volumes de solo que não contém raízes de seringueira, e devido à aleatorização, poderão ser volumes amostrados que conseqüentemente superestimarão a correlação com os respectivos índices espectrais de vegetação naquele pixel.

Outro complicador para o estabelecimento de uma correlação mais forte entre uma amostragem pontual de nematoides e um índice espectral de vegetação gerado por uma imagem aérea, mesmo para resoluções muito altas, é que a seringueira não definha e morre imediatamente por conta da infestação de *M. exigua*, e galhos verdes ou folhas ainda fotossinteticamente ativas podem ocorrer acima do ponto amostrado gerando um índice espectral elevado e indicar que o ponto é “não infestado”, enquanto que a análise nematológica desse ponto indicaria outra situação.

Porém este estudo demonstrou que o aumento da resolução espacial melhora consideravelmente a predição dos modelos matemáticos aplicados ao patossistema, identificando correlações significativas e mais coerentes com os índices espectrais de vegetação, principalmente o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.

A heveicultura necessita de um monitoramento contínuo de suas áreas cultivadas por meio de inventário que relate o acompanhamento dos estágios de desenvolvimento de cada talhão, o ataque de pragas e a ocorrência de problemas fitossanitários, para que a tomada de decisão seja rápida e a mais adequada possível. Contudo, problemas sérios enfrentados na heveicultura, como o nematoide *M. exigua* (GASPAROTTO; PEREIRA, 2012) somente são identificados quando já está em avançado estágio de desenvolvimento e dano.

A utilização do sensoriamento remoto e de índices espectrais de vegetação na identificação de uma possível epidemia de nematoide de galhas no seringal é prática e

econômica no tempo gasto para sua identificação. Informações de acesso livre e atuais como as imagens geradas pela série Landsat podem ajudar no monitoramento de áreas florestadas permitindo uma resposta rápida a eventuais problemas (TOWNSHEND et al. 2012).

Este estudo contribui para a operacionalização de grandes áreas de seringais devido à sua relevância e fundamentação aplicada na identificação de um problema com grande potencial destrutivo da heveicultura, encorajando o uso do sensoriamento remoto e de índices espectrais de vegetação como ferramentas para a identificação prematura de pragas como o nematoide de galha.

6 CONCLUSÕES

A relação entre a densidade de nematoide e os índices espectrais de vegetação é melhor expressa pelas correlações, paramétricas e não paramétricas, do que pelas regressões polinomiais. O índice espectral de vegetação que apresentou maiores correlações com as densidades de nematoides foi o NDVI.

A metodologia de amostragem pontual para análise nematológica do seringal não é impeditiva para o estabelecimento de correlações significativas entre as densidades de *M. exigua* e os índices espectrais de vegetação calculados a partir de imagens de satélite. A identificação de correlações significativas entre as densidades de nematoides *M. exigua* e índices espectrais de vegetação pode ser feita através do uso de imagens de satélite de alta resolução, como as da constelação RapidEye®.

Os resultados encontrados neste estudo indicam que o sensoriamento remoto é capaz de diferenciar um seringal não infestado de um seringal infestado pelo nematoide de galhas *M. exigua* através de índices espectrais de vegetação, especialmente o índice NDVI.

REFERÊNCIAS

- ABAD, P.; CASTAGNONE-SERENO, P.; ROSSO, M. N.; ENGLER, J. A.; FAVERY, B. Invasion, feeding and development. In: PERRY R., MOENS M., STARR J. L. (Ed.). **Root-knot nematodes**. Cambridge, USA: CABI International, 2009. p. 163-181.
- AGHAKOUCHAK, A.; FARAHMAND, A.; TEIXEIRA, J.; WARDLOW, B. D.; MELTON F. S.; ANDERSON, M. C.; HAIN, C. R. Remote Sensing of Drought: Progress, Challenges and Opportunities. **Reviews of Geophysics**, Malden, MA, v. 53, n. 2, p. 452-480, 2015.
- AGRIOS, G. N. **Plant pathology**. San Diego, USA: Academic Press, 2005. 922 p.
- AHAD, N. A; YIN, S. T.; OTHMAN, A. R.; DAN YAACOB, C. H. Sensitivity of normality tests to non-normal data. **Sains Malaysiana, Banji**, Malásia, v. 40, n. 6, p. 637-641, 2011.
- ALMEIDA, V. F.; CAMPOS, V. P.; LIMA, R. D. Flutuação populacional de *Meloidogyne exigua* na rizosfera do cafeeiro. **Nematologia Brasileira**, Piracicaba, SP, v. 11, p. 159-175, 1987.
- ALVARENGA, A. de P.; CARMO, C. A. F. de S. do. **Seringueira**. 2. ed. Viçosa, MG: EPAMIG, 2014. 1056 p.
- BARBOSA, R. G. H. S.; VIEIRA, H. D.; RODRIGUES, W. P.; RODRIGUES FILHO, J. C.; BARROSO, D. G.; SILVA, T. R. C. Efeito da enxertia e do nematoide *Meloidogyne exigua* sobre o crescimento radicular e a produtividade de cafeeiros. **Coffee Science**, Lavras, MG, v. 9, p. 427-434, 2014.
- BARNES, E.M., SUDDUTH, K.A. HUMMEL, J.W. LESCH, S.M. CORWIN, D.L. YANG, C. DAUGHTRY, C.S.T. BAUSCH, W.C. Remote- and ground-based sensor techniques to map soil properties. **Photogrammetric Engineering e Remote Sensing**, Bethesda, MD, v. 69, n. 6, p. 619-630, 2003.
- BASSO, B.; CAMMARANO, D.; De VITA, P. Remotely sensed vegetation indices: theory and applications for crop management. **Italian Journal of Agrometeorology**, Torino, ITA, v. 53, p. 36-53, 2004.
- BAYMA, A. P.; SANO, E. E. Séries temporais de índices de vegetação (NDVI E EVI) do sensor MODIS para detecção de desmatamentos no bioma Cerrado. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, PR, v. 21, n. 4, p. 797-813, 2015.
- BIRTH, G. S.; MCVEY, G. R., Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer. **Agronomy Journal**, Madison, WI, USA, v. 60, p. 640-643, 1968.
- BLACKBURN, G. A. Hyperspectral remote sensing of plant pigments. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, GB, v. 58, p. 855-867, 2007.

- BLUM, L. E. B. **Fitopatologia**: o estudo das doenças de plantas. Brasília, DF: Editora Otimismo, 2006. 258 p.
- BONETTI, J. I. S.; FERRAZ, S. Modificação do método de Hussey e Barker para extração de ovos de *Meloidogyne exigua* de raízes de cafeeiro. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 6, p. 553, 1981.
- BORELLI, K. **Produção de mudas de seringueira em viveiro suspenso**. 2016. 87 f. Dissertação (Mestrado em Silvicultura e Manejo Florestal) – Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba, 2016.
- BRASIL, MAPA – Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 29**, de 05 de agosto de 2009. Dispõe sobre as normas para a produção de sementes e de mudas de seringueira (*Hevea* spp). Disponível em: <<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=consultarLegislacaoFederal>>. Acesso em: 10 out. 2016.
- BROGE, N. H.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 76, p. 156-172, 2000.
- CAMARGO, A. P. de; MARIN, F. R.; CAMARGO, M. B. O. de. **Zoneamento climático da heveicultura no Brasil**. Campinas, SP: EMBRAPA Monitoramento por Satélite, 2003. 19 p. (Documentos 24).
- CARLOS, E. F.; STUCHI, E. S.; DONADIO, L. C. **Porta-enxertos para a citricultura paulista**. Jaboticabal, SP: FUNEP, 1997. 47 p. (Boletim Citrícola, 1).
- CARMONA, F.; RIVAS, R.; FONNEGRA, Y. D. Vegetation Index to estimate chlorophyll content from multispectral remote sensing data. **European Journal of Remote Sensing**, v. 48, p. 319-326, 2015.
- CARNEIRO, R. M. D. G.; ALMEIDA, M. R. A. Caracterização isoenzimática e variabilidade intraespecífica dos nematoides de galhas do cafeeiro no Brasil. In: **Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, 2000, Poços de Caldas, MG. Resumos. Poços de Caldas: Resumo Expandido. p. 280-282, 2000.
- CARTER, G. A. Primary and Secondary effects of the water content of the spectral reflectance of leaves. **American Journal of Botany**, Columbus, OH, v. 74, n. 7, p. 916-924. 1993.
- CARTER, G. A.; KNAPP, A. K. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. **American Journal of Botany**, Columbus, OH, v. 88, p. 677-684. 2001.
- CECCATO, P.; FLASSEE, S.; TARANTOLA, S.; JACQUEMOUD, S.; GREGOIRE, J.M. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 77, p. 22-33. 2001.

CHAMBERS, J.; CLEVELAND, W.; KLEINER, B.; TUKEY, P. **Graphical methods for data analysis**. Pacific Grove, CA: Wadsworth e Brooks/Cole, 1983. 395 p.

CHIBA, K.; KAMEI, T.; ITO, T.; SUGAI, S.; OHTA, S.; SATORI, S. Generation of Normalized Difference Vegetation Index map for precision agriculture using small-type unmanned aerial vehicle. In: AIAA AVIATION TECHNOLOGY, INTEGRATION, AND OPERATIONS CONFERENCE. 14., 2014, Atlanta. **Resume...** Atlanta, USA, 2014.

CHITWOOD, D. J. Research on plant-parasitic nematode biology conducted by the United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service. **Pest Management Science**, Beltsville, USA, v. 59, p. 748-753, 2013.

CIBULA, W. G.; CARTER, G. A. Identification of a far red reflectance response to ectomycorrhizae in slash pine. **International Journal of Remote Sensing**. Londres, v. 13, n. 5, p. 925-932, 1992.

COSTA, E. C.; D'AVILA, M.; CANTARELLI, E. B. **Entomologia Florestal**. 3ª Ed. Santa Maria, RS: Editora UFSM, 2013. 256 p.

CURRAN, P. J. Imaging Spectrometry. **Progress in Physical Geography**, Londres, UK, v. 18, p. 247-266, 1994.

CURRAN, P. J. Remote sensing: using the spatial domain. **Environmental and Ecological Statistics**. New York, EUA, v. 8, p. 331-344, 2001.

DECRAEMER W, HUNT DJ. Structure and classification. In: Perry RN, Moens M (Ed.) **Plant nematology**. CABI Publishing, Wallingford, GB, p. 3-32, 2006.

DEERING, D. W.; ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A. **Measuring forage production of grazing units from Landsat MSS data**. Proceedings, 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment v. 2, p. 1169-1178, 1975.

DUNCAN, J. M. A.; DASH, J.; ATKINSON, P. M. The potential of satellite-observed crop phenology to enhance yield gap assessments in smallholder landscapes. **Frontiers in Environmental Science**, Lausanne, SUI, v. 3, n. 56, p. 1-16, 2015.

ELLIOTT, A. C.; WOODWARD, W. A. **Statistical analysis quick reference guidebook: with SPSS examples**. Thousand Oaks, CA: Sage Publications, 2007. 259 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013. 353 p.

FAN, H.; FU, X.; ZHANG, Z.; WU, Q. Phenology-Based vegetation index differencing for mapping of rubber plantations using Landsat OLI data. **Remote Sensing**, Basiléia, SUI, v. 7, p. 6041-6058, 2015.

FEDERER C. A.; TANNER C. B. Spectral distribution of light in the forest. **Ecology**, Washington, DC, v. 47, p. 555-560, 1966.

- FELIX, A. M.; KAZMIERCZAK, M. L.; ESPÍNDOLA, G. M. RapidEye: a nova geração de satélites de observação da Terra. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos, SP: INPE, 2009. p. 7619-7622.
- FERRAZ, L. C. C. B.; BROWN D. J. F. **Nematologia de plantas: fundamentos e importância**. Manaus, AM: Norma Editora, 2016. 251 p.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- FERRIS, H.; MUUENS, T. A.; FOORD, K. E. Stability and characteristics of spatial description parameters for nematode populations. **Journal of Nematology**, Bethesda, MD, USA, v. 22, p. 427-439, 1990.
- FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, Recife, PE, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.
- FLORENZANO, T. G. **Imagens de Satélite para Estudos Ambientais**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2002. 97 p.
- FONSECA, H. S.; FERRAZ L. C. C. B.; MACHADO, S.R. Comparative ultrastructure of rubber tree roots parasitized by *Meloidogyne exigua* and *M. javanica*. **Nematologia Brasileira**, Piracicaba, v. 27, n.2, p.199-206, 2003.
- FONSECA, H. S.; JAEHN, A.; SILVA, M. F. A. Reações de porta-enxertos de seringueira a *Meloidogyne javanica* e *M. exigua*. **Nematologia Brasileira**, Campinas, v. 23, n. 2, p. 9-14, 1999.
- FREIRE F. C. D. Nematoides da região amazônica I - Nematoides parasitas e de vida livre associados à seringueira (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) e ao guaraná (*Paullinia cupuana* var. *sorbillis*). **Acta Amazonica**, Manaus, v. 6, p. 401-404, 1976.
- GASPAROTTO, L.; PEREIRA J.C.R. (Ed.). **Doenças da seringueira no Brasil**. 2. ed. Manaus, AM: EMBRAPA Amazônia Ocidental, 2012. 255 p.
- GASPAROTTO, L.; PEREIRA, J. C. R.; MOREIRA, A.; FURTADO, E. L.; SANTOS, A. F. **Manual de identificação de doenças da cultura da seringueira**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2016. 64 p.
- Geometrical considerations and nomenclature for reflectance**. Washington, DC: National Bureau of Standards, US Department of Commerce, 1977. 57 p.
- GHULE, T. M.; SINGH, A.; KHAN, M. R. Root Knot Nematodes: Threat to Indian Agriculture. **Popular Kheti**, West Bengal, v. 2, p. 126-130, 2014.
- GONÇALVES, E. C. P.; FLECHTMANN, C. A. H.; GOES, A. Morte descendente de seringueira: associação de fungos/coleobrocas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

FITOPATOLOGIA. 47., 2014, Londrina, PR. **Resumo...** Sociedade Brasileira de Fitopatologia, 2014. CD-ROM.

GONÇALVES, P. de S.; BATAGLIA, O. C.; ORTOLANI, A. A.; FONSECA, F. S. **Manual de heveicultura para o estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 2001. 78 p. (Série Tecnologia APTA)

GOSWAMI, S.; GAMON, J.; VARGAS, S.; TWEEDIE, C. Relationships of NDVI, biomass, and leaf area index (LAI) for six key plant species in Barrow, Alaska. **PeerJ**, San Diego, CA, 3:e1127, 2015.

GRECO, N.; DI VITO, M. Population dynamics and damage levels. In: Perry, R. N.; Moens, M.; Starr, J. L. (Ed.) **Root-knot nematodes**. Wallingford; Oxfordshire: CAB International. p. 246-274, 2009.

GÜRTLER, S.; EPIPHANIO, J. C. N.; LUIZ, A. J. B.; FORMAGGIO, A. R. Planilha eletrônica para cálculo de reflectância em imagens TM e ETM+ LANDSAT. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro. v. 57, p. 162-167, 2005.

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; PATTEY, E.; ZARCO - TEJADA, P. J.; STRACHAN, I. B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 90, p. 337-352, 2004.

HATFIELD, J. L.; GITELSON, A. A.; SCHEPERS, J. S.; WALTHALL, C. L.; Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, p. 117-131, 2008.

HAVAŠOVÁ, M.; BUCHA, T.; FERENČÍK, J.; JAKUŠ, R. Applicability of a vegetation indices-based method to map bark beetle outbreaks in the High Tatra Mountains. **Annals of Forest Research**, Ilfov, Romain, v. 58, n. 2, p. 295-310. 2015.

HIRD, J. N.; MCDERMID, G. J. Noise reduction of NDVI time series: an empirical comparison of selected techniques. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 113, p. 248-258. 2009.

HO, C. Y.; CHAN, H. Y.; LIM, T. M. Environmax planting recommendations: a new concept in choice of clones. In: Rubber Research Institute of Malaysia Planters' Conference. 1974, Kuala Lumpur. **Proceedings...** p. 293-310, 1974.

HOGAN, J.A.; SHAW, J.A.; LAWRENCE, R.L.; LARIMER, R.M. Low-cost multispectral imaging system for detecting leaking CO₂ gas. **Applied Optics**, Washington, USA, v. 51, p. 59-66, 2012.

HUANG J, WEI C, ZHANG Y, BLACKBURN GA, WANG X, WEI C, WANG, J. Meta-analysis of the detection of plant pigment concentrations using hyperspectral remotely sensed data. **PLoS ONE**, v. 10, n. 9, e0137029, 2015.

HUETE A. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **International Journal of Remote Sensing**, Londres, v. 9, p. 295-309, 1988.

INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C. Agricultura de precisão. In: Bernardi, A.C.C.; Naime, J.M.; Resende, A.V.; Bassoi, L.H.; Inamasu, R.Y. (Org.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, p. 21-33, 2014.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS - IAC. **Centro de seringueira e sistemas agroflorestais**. [2016]. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/seringueira/tecnicas.php>>. Acesso em 10 out. 2016a.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS - IAC. **Centro de seringueira e sistemas agroflorestais**. [2016]. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/seringueira/clones.php>>. Acesso em 10/10/2016b.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura, 2014**. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2014_v29.pdf>. Acesso em: 10/10/2016.

INTERNATIONAL RUBBER STUDY GROUP - IRSG. **World Rubber Industry Outlook**. [2016]. Disponível em: <<http://www.rubberstudy.com/pub-industry-outlook.aspx>>. Acesso em: 15/10/2016.

INSTITUT DE RECHERCHES SUR LE CAOUTCHOUC. **Clone RRIM 600**: fiche technique A-7. Paris: IRSC, 1976. p. 4.

JACKSON, T. J.; CHEN, D. Y.; COSH, M.; LI, F. Q.; ANDERSON, M.; WALTHALL, C.; DORIASWAMY, P.; HUNT, E. R. Vegetation water content mapping using landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 92, p. 475-482, 2004.

JENKINS, W. R. A. A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. **Plant Disease Reporter**, St. Paul, MN, n. 48, v. 9, p. 692-698, 1964.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução da 2ª ed.: EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; SANTOS, A. R.; RUDORFF, B. F. T.; ALMEIDA, C. M.; GALVÃO, L. S. INPE, São José dos Campos, SP: Parêntese. 2009. 672 p.

JONES, J.; HAEGEMAN, A.; DANCHIN, E.; GAUR, H.; HELDER, J.; JONES, M.; KIKUCHI, T.; MANZANILLA-LOPEZ, R.; PALOMARES-RIUS, J.; WESEMAEL, W.; PERRY, R. Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. **Molecular Plant Pathology**, Oxford, GB, v. 14, p. 946-961. 2013.

JORDAN, C. F. Derivation of leaf-area index from quality of light on forest floor. **Ecology**, Washington, DC, v. 50, n. 4, p. 663-666, 1969.

KARSSSEN, G. **The Plant-Parasitic Nematode Genus *Meloidogyne* Goldi, 892 (Tylenchida) in Europe**. Brill, Leiden, 2002. 160 p.

- KARSSSEN, G.; MOENS, M. Root-knot nematodes. In: Perry, R.N. e Moens, M. (Ed.). **Plant nematology**. Wallingford, CABI, p. 59-88, 2006.
- KAWABATA, A.; ICHII, K.; AMAGUCHI, Y. Global monitoring of the interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, v. 22, p. 1377-1382, 2001.
- KENDALL, M. G. A new measure of rank correlation. **Biometrika**, Oxford, RU, v. 30, n. 1-2, p. 81-89, 1938.
- KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. 4 ed. Londres, RU: Griffin, 1970. 51 p.
- KOHJIYA, S.; IKEDA, Y. (Edt.). **Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber**. Oxford, GB: Woodhead Publishing, 2014. 528 p.
- KOLMOGOROV, A. **Foundations of the theory of probability**, 2 ed. Chelsea, New York. 1956. 96 p.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha, Alemanha: Verlag Justus Perthes, wall-map: 1,5 m × 2 m, 1928.
- KRIEGLER, F. J.; MALILA, W. A.; NALEPKA, R. F.; RICHARDSON, W. **Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition**. In: Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, University of Michigan, Ann Arbor, MI, p. 97-131, 1969.
- KUMAR, P.; RANI, M.; PANDEY P. C.; MAJUMDAR, A.; NATHAWAT M. S. Monitoring of deforestation and forest degradation using remote sensing and GIS: a case study of ranchi in Jharkhand (India). **Report and Opinion**, New York, n. 2, v. 4, p. 14-20. 2010.
- LAMB, D. V.; WEEDON, M. Evaluating accuracy of mapping weeds in fallow fields using airborne imaging: *Panicum effesum* in oil-seed rape stubble. **Weed Research**, Malden, MA, v. 38, p. 443-451, 1998.
- LE MAIRE, G.; MARSDEN, C.; NOUVELLON, Y.; STAPE, J.-L.; PONZONI, F. J. Calibration of a species-specific spectral vegetation index for Leaf Area Index (LAI) monitoring: example with MODIS Reflectance Time-Series on eucalyptus plantations. **Remote Sensing**, Basiléia, Suíça, v. 4, p. 3766-3780, 2012.
- LI, L.; ZHANG, Q.; HUANG, D. A review of imaging techniques for plant phenotyping. **Sensors**, Basiléia, Suíça, v. 14, p. 20078-20111, 2014.
- LIU, K.; ZHOU, Q.-b.; WU, W.-b.; XIA, T.; TANG, H.-j. Estimating the crop leaf area index using hyperspectral remote sensing. **Journal of Integrative Agriculture**, China, v. 15, p. 475-491, 2016.

- LORDELLO, A. I. L.; LORDELLO, R. R. A. Reação do cafeeiro e de outras plantas a uma população de *Meloidogyne exigua* coletada em seringueira. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 79, p. 349-352, 2004.
- LORDELLO, A. I. L.; LORDELLO, R. R. A., CARDOSO, M. Parasitismo das raças de *Meloidogyne incognita* e de *M. javanica* à seringueira. In: Congresso Brasileiro de Nematologia. 12., 1988, Dourados, MS. **Resumos...** Dourados: SBN/EMBRAPA-UEPAE, 1988. 75 p.
- LORDELLO, L. G. E.; VEIGA, A. S. Nematoides em seringueira. **Revista de Agricultura**, São Paulo, SP, v. 58, n. 3, p. 203-207, 1983.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2002. v. 1. 368 p.
- MACHADO, T. V.; COELHO, L.; SANTOS, M. A. Densidade populacional de *Meloidogyne exigua* em raízes de diferentes clones de *Hevea brasiliensis*. In: Congresso Paulista de Fitopatologia. 37., 2014, Botucatu, SP. **Pôster 076**. Botucatu, 2014.
- MAHLEIN, A.-K.; RUMPF, T.; WELKE, P.; DEHNE, H.-W.; PLÜMER, L.; STEINER, U.; OERKE, E.-C. Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 128, p. 21-30, 2013.
- MAHLEIN, A.-K. Plant disease detection by imaging sensors – parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. **Plant Disease**, St. Paul, MN, v. 100, n. 2, p. 241-251, 2016.
- MALMSTRÖM, C. M.; THOMPSON, M. V.; JUDAY, G. P.; LOS, S. O.; RANDERSON, J. T.; FIELD, C. B. Internannual variation in global-scale net primary production: testing model estimates. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, DC, v. 11, p. 367-392, 1997.
- MARSHALL, M.; OKUTO, E.; KANG, Y.; OPIYO, E.; AHMED, M. Global assessment of Vegetation Index and Phenology Lab (VIP) and Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) version 3 products. **Biogeosciences**, Göttingen, Alemanha, v. 13, p. 625-639, 2015.
- MARTINS, A. L. M.; RAMOS, N. P.; GONÇALVES, P. S.; VAL, K. S. Influência de porta-enxertos no crescimento de clones de seringueira no estado de São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p.1743-1750, 2000.
- MARTINS, G. D.; GALO, M. L. B. T. Caracterização espectral da cana-de-açúcar infectada por nematoides e *Migdolus fryanus* por espectrorradiometria de campo. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, PR, v. 21, n. 4, p. 783-796, 2015.
- MASELLI, F.; RODOLFI, A.; BOTTAL, L.; CONESE, C. Use of NOAA-AVHRR NDVI images for the estimation of dynamic fire risk in Mediterranean areas. **Remote Sensing of Environment**, New York, n. 86, p. 187-197, 2003.

- McKENRY, M. V.; ROBERTS, P. A. **Phytonematology Study Guide**. California: University of California, 1985. 56 p. (Publication 4045)
- MOENS, M.; PERRY, R. N.; STARR, J. L. *Meloidogyne* sp.: a diverse group of novel and important plant parasite. In: Perry, R. N.; Moens, M.; Starr, J. L. (Ed.). **Root-knot nematodes**. Oxfordshire, GB: CAB Internationa, 2009. p. 1-17.
- MOHLER, R. L.; GOODIN, D. G. Temporal burn scar evolution in tallgrass prairie based on field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, n. 34, v. 20, p. 7199-7217, 2013.
- MOOIBROEK, H.; CORNISH, K. Alternative sources of natural rubber. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Berlin, v. 53, p. 355-365, 2000.
- MORAES, V. H. F. **Sugestões para uniformização da metodologia de estudo da fenologia foliar da seringueira**. EMBRAPA Manaus - AM/CNPSD p. 14, 1982. (Documento 1).
- MORAN, M. S.; CLARKE, T. R.; INOUE, Y.; VIDAL, A. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 49, p. 246-263, 1994.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2007. 241 p.
- MOURA, R. M. O gênero *Meloidogyne* e a meloidoginose. Parte II. In: LUZ, W. C. (Ed.). **Revisão Anual de Patologia de Plantas**. Passo Fundo, RS: Gráfica e Editora Pe. Berthier, v. 5, p. 281-315, 1997.
- MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key dvances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, Londres. p. 1-14, 2012.
- MUNIZ, M. F. S.; CAMPOS, V. P.; ALMEIDA, M. R. A.; GOMES, A. C. M. M.; DOS SANTOS, M. F.; DE CASTRO MOTA, F.; CARNEIRO, R. M. D. G. Additional information on an atypical population of *Meloidogyne exigua* Göldi, 1887 (Tylenchida: Meloidogynidae) parasitizing rubber tree in Brazil. **Nematology**, Leiden, v. 11, p. 95-106, 2009.
- MUNIZ, M. F. S.; CAMPOS, V. P.; CASTAGNONE-SERENO, P.; CASTRO, J. M. C.; ALMEIDA, M. R. A.; CARNEIRO, R. M. D. G. Diversity of *Meloidogyne exigua* (Tylenchida: Meloidogynidae) populations from coffee and rubber tree. **Nematology**, Leiden, v. 10, p. 897-910, 2008.
- NICODEMUS, F. E.; RICHMOND, J. C.; HSIA, J. J.; GINSBER, I. W.; LIMPERS, T. NICOL, J. M. Important nematode pests. In: Curtis BC, Rajaram S, Gómez M (Ed.) **Bread wheat improvement and production**. Roma: FAO Plant Production and Protection Series, 2002. p. 567.

NICOL, J. M.; TURNER, S. J.; COYNE, D. L.; DEN NIJS, L.; HOCKLAND, S.; TAHNA MAAFI, Z. Current nematode threats to world agriculture, In: Jones, J.; Gheysen, G.; Fenoll, C. (Ed.). **Genomics and Molecular Genetics of Plant-Nematode Interactions**. Springer, Heidelberg, GER, p. 21-43, 2011.

NOBEL, P. S. **Photochemistry of photosynthesis**. In: Physiochemical and environmental plant physiology, Academic Press Inc, New York. p. 245-296, 1991.

NOGUEIRA, R. F.; CORDEIRO, S. A.; LEITE, A. M. P.; BINOTI, M. L. M. S. Mercado de borracha natural e viabilidade econômica do cultivo da seringueira no Brasil. **Nativa**, Sinop, v. 03, n. 02, p. 143-149, 2015.

OGLE, H. J. Abiotic Diseases of Plants. In: BROWN, J. F. e OGLE, H. J. (Eds). **Plant Pathogens and Plant Diseases**. University of New England Printery. Armidale. p. 156-171, 1997.

PAES, V. S.; SOARES, P. L. M.; MARI, O. O. O.; SANTOS, J. M.; GOES, A. Primeiro relato de uma doença complexa da seringueira (*Hevea brasiliensis*) causada por *Lasiodiplodia theobromae* e *Pratylenchus brachyurus* no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE NEMATOLOGIA. 30., 2012, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: Nematologia Brasileira, 2012. p. 168-169.

PAES-TAKAHASHI, V. S.; SOARES, P. L. M.; GUIDUCCI, E. P.; BRITO, P. F. de, Carneiro, F. A., FERREIRA JUNIOR, R. Reaction of rubber tree rootstock to *Meloidogyne exigua* and *Pratylenchus brachyurus*. **Nematropica**, Florida, v. 45, p. 242-251, 2015.

PARAN, I.; MICHELMORE, R. W. Development of reliable PCR-based markers linked to downy mildew resistance genes in lettuce. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlim, v. 85, p. 985-993, 1993.

PARK, S.; FEDDEMA, J. J.; EGBERT, S. L., Impacts of hydrologic soil properties on drought detection with MODIS thermal data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 89, p. 53-62, 2004.

PEARSON, K. **The grammar of science**. Londres, RU: Walter Scott, 1892. 493 p.

PEIL, R. M. A enxertia na produção de mudas de hortaliças. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 33, n. 6, p. 1169-1177, 2003.

PEREIRA, A. L.; SILVA, G. S.; RIBEIRO, V. Q. Caracterização fisiológica, cultural e patogênica de diferentes isolados de *Lasiodiplodia theobromae*. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 31, p. 572-578, 2006.

PEREIRA, A. V.; PEREIRA, E. B. C. **Mudas de seringueira**. Manaus, AM: EMBRAPA- CNPSD, 1986. 52 p. (Circular Técnica 7).

PEREIRA, J. P. **Seringueira: formação de mudas, manejo e perspectivas no noroeste do Paraná**. Londrina, PR: IAPAR, 1992. 60 p.

- PERRY, R. N.; MOENS, M. **Plant nematology**. Pondicherry, Biddles, 2005. 447 p.
- PETORRELLI, N.; VIK, J. O.; MYSTERUD, A.; GAILLARD, J.-M.; TUCKER, C. J.; STENSETH, N.-C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. **Trends in Ecology and Evolution**, Cambridge, MA, v. 20, p. 503-510, 2005.
- PEZZONI FILHO, J. C. **Dinâmica espaço-temporal da ocorrência de nematoides em seringueira**. 125 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/132170>>. Acesso em: 12 nov 2016.
- PLANTERS' BULLETIN OF RUBBER RESEARCH INSTITUTE OF MALAYA. Review of modern *Hevea* clones: clone RRIM 600. v. 107, p. 49-64, 1970.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos, SP: A. Silva Vieira (Ed.), 2007. 127 p.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. atual. ampl. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 160 p.
- PRIYADARSHAN, P. M. **Biology of Hevea Rubber**. CABI, Oxfordshire, 2011. 240 p.
- RAZAK, A. R. Variation in plant response, gall size and form induced by *Meloidogyne* on some Malaysian crops. **The Kasetsart Journal**, Bangkok, v. 12, p. 43-45, 1978.
- RICHARDSON, A. J.; EVERITT, J. H. **Using spectra vegetation indices to estimate rangeland productivity**. Geocarto International, Londres, v. 1, p. 63-69, 1992.
- RICHARDSON, A. J.; WIEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering e Remote Sensing**, Bethesda, MD, v. 43, p. 1541-1552. 1977.
- RODRIGO, V. H. L. Ecophysiological factors underpinning productivity of *Hevea brasiliensis*. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campinas, v.19, n.4, p. 245-255, 2007.
- ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. 7 ed., Uberlândia, MG: EDUFU, 2009. 264 p.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite - 1 Symposium, Washington, 1973. **Proceedings...** Whashington: NASA, v. 1, p. 309-317, 1973.
- RYAN, S. J.; CROSS, P. C.; WINNIE, J.; HAY, C.; BOWERS, J.; GETZ, W. M. The utility of normalized difference vegetation index for predicting African buffalo forage quality. **Journal of Wildlife Management**, Malden, MA, v. 76, n. 7, p. 1499-1508, 2012.

SANTOS, J. M. Histopatologia em raízes de seringueira infectadas por *Meloidogyne exigua*. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 2, p. 226 (resumo), 1992.

SANTOS, J. M. *Meloidogyne exigua* e *Botryodiplodia theobromae*, principais componentes bióticos de uma doença complexa da seringueira em Mato Grosso. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 28, p. 341, 1995.

SANTOS, J. M.; MATTOS, C.; BARRÉ, L.; FERRAZ, S. *Meloidogyne exigua*, sério patógeno da seringueira nas plantações E. Michelin, em Rondonópolis, MT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE NEMATOLOGIA, 16., 1992, Lavras, MG. **Anais...** Sociedade Brasileira de Nematologia, 1992. 75 p.

SÃO PAULO (Estado). **Resolução SAA - 154**, de 22 de novembro de 2013. Estabelece exigências para cadastramento de viveiros, jardins clonais, plantas matrizes produtoras de sementes e normas técnicas de defesa sanitária vegetal, para a produção, comércio e o transporte de mudas, borbulhas e sementes de seringueira (*Hevea* spp) no estado de São Paulo. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=262019>>. Acesso em: 10 out 2016.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing**. 3rd Ed. Londres: Elsevier/Academic Press, 2007. 515 p.

SEMPIONATO, O. R.; STUCHI, E. S.; DONADIO, L. C. **Viveiro de citros**. Jaboticabal, SP: FUNEP, 1997. 37 p. (Boletim Citrícola 2).

SERA, G. H.; SERA, T.; AZEVEDO, J. A. de; MATA, J. S. da; RIBEIRO-FILHO, C.; DOI, D. S.; ITO, D. S.; FONSECA, I. C. de B. Porta-enxertos de café robusta resistentes aos nematóides *Meloidogyne paranaensis* e *M. incognita* raças 1 e 2. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, PR, v. 27, p. 171-184, 2006.

SHANAHAN, J. F.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D.; VARVEL, G. E.; WILHELM, W.; TRINGE, J. M.; SCHLEMMER, M. R.; MAJOR, D. J. Use of remote sensing imagery to estimate corn grain yield. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v. 93, p. 583-589, 2001.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality. **Biometrika**, Oxford, RU, v. 52, p. 591-611, 1965.

SHARMA, R. D. Nematoides associados com o cacaueteiro e seringueira na Bahia. **Revista Teobrama**, Ilhéus, v. 1, n. 3, p. 43-45, 1971.

SHARMA, R. D.; JUNQUEIRA, N. T. V. Pathogenicity of *Meloidogyne exigua* on *Hevea brasiliensis* root-stock. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 21, p. 418, 1996.

SHARMA, R. D.; JUNQUEIRA, N. T. V., BARRE, L. ROCHA, B. F. Efeitos de práticas culturais na incidência de *Meloidogyne* sp, em seringueira de cultivo. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 2, p. 226, 1992.

SHARMA, R. D.; LOOF, P. A. A. Nematodes of the cocoa region of Bahia, Brazil: 1. Plant-parasitic and free-living nematodes associated with rubber (*Hevea brasiliensis* M. Arg.). **Revista Theobroma**, Ilhéus, v. 3, n. 1, p. 36-41, 1973.

SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica: para as ciências do comportamento**. São Paulo, SP: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 350 p.

SIJMONS, P. C.; ATKINSON, H. J.; WYSS, U. Parasitic strategies of root nematodes and associated host cell responses. **Annual Review of Phytopathology**, v. 32, p. 235-259, 1994.

SILLEOS, N. G.; ALEXANDRIDIS, T. K.; GITAS, I. Z.; PERAKIS, K. Vegetation indices: advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. **Geocarto International**, Hong Kong, v. 4, n. 21, p. 21-28, 2006.

SILVEIRA, S. G. P. **Nematoides associados à cultura da seringueira (*Hevea* spp.)**. In MEDRADO, M. J. S. et al., (Ed.) Formação de mudas e plantio de seringueira. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”-USP, Departamento de Agricultura, Piracicaba, SP, Brasil. p. 78-82, 1992.

SMIRNOV, S. Beschreibung einer neuen Acartia-Art aus dem Japanischen Meer nebst einiger Bemerkungen über die Untergattung Euacartia Steuer. **Zoologischer Anzeiger**, Amsterdam, Holanda, v. 114, p. 87-92, 1936.

SOLARI, F.; SHANAHAN, J.; FERGUSON, R. B.; SCHEPERS, J. S.; GITELSON A. A. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v. 100, p. 571-579, 2008.

SOLBERG, S.; LANGE, H.; AURDAL, L.; SOLBERG, R.; NAESSET, E. Monitoring forest health by remote sensing of canopy chlorophyll: first results from a pilot project in Norway. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT. 31., 2005, Saint Petersburg, Russian Federation. **Proceedings...** Saint Petersburg, Russian Federation, 2005. CD-ROM.

SOUZA, S. E., SOUZA, L. H., SANTOS, F. DA S., SILVA, R. V. Flutuação populacional de *Meloidogyne exigua* (Goeldi, 1887) em cafeeiros no município de Barra do Choça, BA. **Bahia Agrícola**, Salvador, BA, v.2, n. 3, p. 77-81, 1998.

SPEARMAN, C. General intelligence, objectively determined and measured. **American Journal of Psychology**, Londres, RU, v. 15, p. 201-293, 1904.

TAYLOR, A. L.; SASSER, J. N. **Biology, identification, and control of root-knot nematodes (*Meloidogyne*)**. North Carolina State University and the United States Agency for International Development, 1978. 111 p.

TOWNSHEND, R. J.; MASEK, J. G.; HUANG, C.; VERMOTE, E. F.; GAO, F.; CHANNAN, S.; SEXTON, J. O.; FENG, M.; NARASIMHAN, R.; KIM, D.; SONG, K.; SONG, D.; SONG, X.-P.; NOOJIPADY, P.; TAN, B.; HANSEN, M. C.; LI, M.; WOLF, R. E. Global characterization and monitoring of forest cover using Landsat

data: opportunities and challenges. *International Journal of Digital Earth*, Londres, RU, v. 5, n. 5, p. 373-397, 2012.

TRINDADE, D. R. Exigências climáticas da seringueira. Belém, PA: FCAP, 1982. 2 p. (Curso de Especialização em Heveicultura, 10).

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, New York, v. 8, p. 127-150, 1979.

VAN der STOEL, C. D., DUITS, H.; VAN der PUTTEN, W. H. Population dynamics of a host-specific root-feeding cyst nematode and resource quantity in the root zone of a clonal grass. *Oikos*, Lund, Suécia, v. 112; p. 651-659, 2006.

VIÑA, A.; GITELSON, A. A.; NGUY-ROBERTSON, A. L.; PENG, Y. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment*, New York, v. 115, p. 3468-3478, 2011.

VIRGENS FILHO, A. C. **Programa de Desenvolvimento do agronegócio Borracha nos estados da Bahia e Espírito Santo - PRODABES**. Ilhéus: CEPLAC, 2005. p. 55.

WANG, K., XIANG, W-N.; GUO, X.; LIU, J. Remote Sensing of forestry studies. In: OKIA, C. A. (Ed.), **Global Perspectives on Sustainable Forest Management**. Rijeka, CRO: InTech, 2012. 12 p. DOI: 10.5772/32995. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/global-perspectives-on-sustainable-forest-management/remote-sensing-in-forestry-studies>>. Acesso em: 12 nov 2016.

WEBSTER, C.; BALKWILL, W. J. **Rubber**. Londres, BG: Longman Group, 1989. 614 p.

WIEGAND, C. L.; GERBERMANN, A. H.; GALLO, K. P.; BLAD, B. L.; DUSEK, D. Multisite analyses of spectral-biophysical data for corn. *Remote Sensing of Environment*, New York, v. 33, p. 1-16, 1990.

WILCKEN, S. R. S.; GABIA, A. A.; BRITO, P. F.; FURTADO, E. L. Phytoparasite nematodes in rubber plantations of São Paulo State. *Summa Phytopathologica*, Botucatu, v.41, n. 1, p. 54-57, 2015.

WILLIAMSON, V. M.; GLEASON, C. A. Plant-nematode interactions. *Current Opinion in Plant Biology*, v. 6, n. 4, p. 327-333, 2003

WÓJTOWICZ, M.; WÓJTOWICZ, A.; PIEKARCZYK, J. Application of Remote Sensing Methods in Agriculture. *Communications in Biometry and Crop Science*, Uttar Pradesh, India, v. 11, p. 31-50, 2016.

YEATES, G. W. How plants affect nematodes. *Advances in Ecological Research*, Amsterdam, Holanda, v. 17, p. 61-113, 1987.

YENGOH, G. T.; DENT, D.; OLSSON, L.; TENGBERG, A. E.; TUCKER, C. J. **The use of the normalized difference vegetation index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and**

practical considerations. Lund University Center for Sustainability Studies (LUCSUS), and the Scientific and Technical Advisory Panel of the Global Environment Facility (STAP/GEF). Lund, Suécia, 2014. 80 p.

ZHAO, D.; HUANG, L.; LI, J.; QI, J. A comparative analysis of broadband and narrowband derived vegetation indices in predicting LAI and CCD of a cotton canopy. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Bethesda, MD, v. 62, p. 25-33, 2007.