



MIRYAN SILVA DE OLIVEIRA PIRES

**CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA
ORBITAL DA FERRUGEM E DA FENOLOGIA
DO CAFEIRO EM DIFERENTES SISTEMAS
DE IRRIGAÇÃO**

**LAVRAS – MG
2018**

MIRYAN SILVA DE OLIVEIRA PIRES

**CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA ORBITAL DA FERRUGEM E
DA FENOLOGIA DO CAFEIEIRO EM DIFERENTES SISTEMAS DE
IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola, área de
concentração em Engenharia
Agrícola, para a obtenção do título
de Mestre.

Orientador
Dr. Marcelo de Carvalho Alves

Coorientador
Dr. Edson Ampélio Pozza

**LAVRAS – MG
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Pires, Miryan Silva de Oliveira.

Caracterização radiométrica orbital da ferrugem e da fenologia
do cafeeiro em diferentes sistemas de irrigação / Miryan Silva de
Oliveira Pires. - 2018.

100 p. : il.

Orientador(a): Marcelo de Carvalho Alves.

Coorientador(a): Edson Ampélio Pozza.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Coffea arabica L. 2. Hemileia vastatrix. 3. Fenologia. I.
Alves, Marcelo de Carvalho. II. Pozza, Edson Ampélio. III. Título.

MIRYAN SILVA DE OLIVEIRA PIRES

**CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA ORBITAL DA FERRUGEM E
DA FENOLOGIA DO CAFEIEIRO EM DIFERENTES SISTEMAS DE
IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola, área de
concentração em Engenharia
Agrícola, para a obtenção do título
de Mestre.

Aprovada em 26 de janeiro de 2018.

Dr. Marcelo de Carvalho Alves	UFLA
Dr. Edson Ampélio Pozza	UFLA
Dra. Helena Maria Ramos Alves	EMBRAPA
Dr. Fábio Moreira da Silva	UFLA

Orientador
Dr. Marcelo de Carvalho Alves

**LAVRAS – MG
2018**

*A Deus, pela presença constante em minha vida.
Aos meus pais, Vera e José, pelo amor incondicional.
Aos meus irmãos, Marianne e Leonardo, pela cumplicidade.
À minha família, meu pilar.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), especialmente ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Dr. Marcelo Alves de Carvalho, pela orientação, atenção e compreensão.

Ao professor Dr. Edson Ampélio Pozza, pela co-orientação e pelo fornecimento dos dados de campo, possibilitando o enriquecimento deste trabalho.

Aos integrantes da banca de qualificação e à banca examinadora, pelas contribuições para a melhoria deste trabalho.

À Helem, pelo profissionalismo e amizade, e aos demais funcionários do Departamento de Engenharia.

À minha mãe Vera e ao meu pai José, pelo imenso apoio nas horas difíceis, incentivos profissionais, amor, força e amizade.

À minha irmã Marianne e ao meu irmão Leonardo, pelas conversas, amor e amizade.

Às minhas amigas da república Melzoca, que foram minha segunda família, pela amizade, respeito e companheirismo.

Aos meus amigos, pelas horas de descontração, aprendizado, carinho e amizade.

Aos meus colegas do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, pelo companheirismo, aprendizado e momentos alegres.

A todos que, de alguma forma, participaram da realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

RESUMO GERAL

O Brasil é o principal produtor de café do mundo, sendo Minas Gerais o estado que mais contribui para essa cultura de grande importância no agronegócio. O cafeeiro arábica (*Coffea arabica* L.) pode ter sua produção comprometida por vários fatores, como a ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.), que pode causar sérios danos à lavoura. Outro fator relevante é a fenologia da planta, importante para identificar as atividades necessárias no manejo e tratamentos culturais da lavoura. Uma ferramenta para auxiliar no manejo da cafeicultura é o sensoriamento remoto, o qual utiliza imagens de satélites, como o da missão Landsat, associados ao sistema de informação geográfica (SIG) para o processamento digital. Neste trabalho, objetivou-se avaliar a aplicabilidade do monitoramento de lavouras de cafeeiro sob diferentes sistemas de irrigação por radiometria orbital, caracterizando o padrão espectral, espacial e temporal da ferrugem e a fenologia do cafeeiro. No primeiro estudo realizado, foram utilizados produtos de imagens orbitais, as quais foram correlacionadas com os dados de incidência de ferrugem coletados em campo. Os valores de menor reflectância do infravermelho próximo (NIR) foram correspondentes aos maiores valores de incidência de ferrugem, e as áreas irrigadas e área de sequeiro apresentaram diferentes comportamentos nas regiões infravermelho médio - 1 (SWIR-1) e infravermelho médio - 2 (SWIR-2). No segundo estudo, foram utilizados mapas de composição colorida falsa cor e cor natural para interpretação visual da lavoura, juntamente com dados coletados em campo. Foi possível analisar as características das fases fenológicas do cafeeiro e aspectos dos diferentes ambientes, assim como a presença de bionalidade na produtividade.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L.. *Hemileia vastatrix*. Fenologia. Sensoriamento remoto. Landsat.

GENERAL ABSTRACT

Brazil is the main coffee producer, and Minas Gerais is the state that contributed most to this important crop in agribusiness. Arabica coffee (*Coffea arabica* L.) may have its production compromised by several factors, such as coffee rust (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) which can cause serious damage to the crop. Another factor to know is the phenology of the plant that is important to identify the necessary activities in the management and cultural treatments of the crop. A tool to assist in the management of coffee cultivation is remote sensing using satellite images, such as the Landsat mission, associated with the geographic information system (GIS) for digital processing. The objective of this study was to evaluate the applicability of coffee crop monitoring under different irrigation systems by orbital radiometry, characterizing the spectral, spatial and temporal patterns of rust and coffee phenology. In the first study, orbital imaging products were used and correlated with the data of coffee rust incidence collected in the field. The lower near infrared (NIR) reflectance values corresponded to the higher values of coffee rust incidence, and, irrigated areas and rainfed area presented different behaviors in the short-wave infrared 1 (SWIR-1) and short-wave infrared 2 (SWIR-2) regions. In the second study, false color and natural color composition maps were used for visual interpretation of the crop, associated to data collected in the field. It was possible to analyze the characteristics of the coffee phenological phases and aspects of the different environments, as well as the presence of biennial coffee productivity.

Key words: *Coffea arabica* L.. *Hemileia vastatrix*. Phenology. Remote sensing. Landsat.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	9
1	INTRODUÇÃO	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Cultura do cafeeiro	11
2.2	Fenologia do cafeeiro	12
2.3	Irrigação na cafeicultura	13
2.4	Ferrugem do cafeeiro	14
2.5	Sensoriamento Remoto	16
	REFERÊNCIAS	21
	SEGUNDA PARTE - ARTIGOS	27
	ARTIGO 1 - Caracterização radiométrica orbital da ferrugem do cafeeiro em diferentes sistemas de irrigação	27
	ARTIGO 2 - Caracterização radiométrica orbital da fenologia do cafeeiro em diferentes sistemas de irrigação	65

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

O café é um produto consumido mundialmente e apresenta grande importância na economia brasileira. O Brasil é o maior produtor de café do mundo e o segundo maior consumidor. A inserção da cultura do café no país só foi possível devido às condições climáticas favoráveis. As espécies *Coffea arabica* e *Coffea canephora* são as mais cultivadas, sendo que a *C. arabica* apresenta uma qualidade superior de bebida e é a espécie mais cultivada no estado de Minas Gerais (MAPA, 2016).

A cultura do cafeeiro pode ser afetada por diferentes fatores que, muitas vezes, causam danos irreversíveis na lavoura. Entre esses fatores, destaca-se a ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome). Essa doença causa intensa perda de folhas e redução da produtividade, e sua intensidade depende da interação entre o ambiente, o hospedeiro e o patógeno (TALAMINI et al., 2003; AGRIOS, 2005; POZZA et al., 2010).

Os fatores ambientais, como temperatura e precipitação, também assumem papéis importantes no crescimento e desenvolvimento da cultura do cafeeiro, devido à influência nos estádios fenológicos críticos e à interferência na produtividade da cultura.

Outro fator importante é o manejo de irrigação, essencial para a produtividade do cafeeiro em locais onde as chuvas são escassas ou mal distribuídas. Essa técnica fornece a quantidade adequada de água, evitando o déficit hídrico sempre que a pluviosidade não for suficiente para atender a demanda hídrica da planta (RODRIGUES et al., 2010). Contudo, a irrigação pode alterar o microclima da lavoura, modificando as condições do ambiente e aumentando o período de molhamento foliar (ROTEM; PALTÍ, 1969), o que contribui para o aumento da incidência de doenças (CARVALHO; CHALFOUN, 1999).

Devido à diversidade de fatores com potencial de influenciar a produtividade da lavoura, tratá-la como homogênea pode não ser interessante ao produtor e pode trazer baixa rentabilidade. Assim, as análises espaciais são uma possibilidade de fazer um gerenciamento mais eficiente do processo produtivo (ALVES et al., 2011). Uma das formas mais rápidas de realizar a espacialização é utilizar imagens de satélites associados ao processamento digital em sistemas de informações geográficas (SIG), conhecendo, assim, a distribuição espacial da atividade cafeeira para prever e planejar sua distribuição (MOREIRA, 2008). Dependendo da aplicação, muitos problemas das lavouras são resolvidos, ou pelo menos reduzidos, pela utilização da tecnologia digital, com algum tipo de processamento de imagem (BARBEDO, 2013).

Muitas pesquisas envolvendo o sensoriamento remoto na cultura do cafeeiro, bem como a utilização de imagens de satélites, vêm sendo realizadas por diversos pesquisadores, como Alves et al. (2007), Bernardes et al. (2012a), Bernardes et al. (2012b), Chemura et al. (2016), Moreira et al. (2004), Prado et al. (2016), Souza et al. (2013) e Volpato et al. (2013). Porém, ainda são poucas as pesquisas relacionadas ao monitoramento de doenças do cafeeiro. Um desses estudos é o de Chemura et al. (2016), que avaliou o potencial do uso de medidas de reflectância do sensor do satélite Sentinel-2 para discriminar níveis de infestação da ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) nas folhas das plantas de café em casa de vegetação.

Tendo em vista a dificuldade em encontrar pesquisas relacionadas ao monitoramento da fenologia, manejo e doenças da cultura do cafeeiro com o suporte do sensoriamento remoto, este trabalho parte da hipótese de que é possível monitorar variáveis do café arábica e caracterizar a distribuição espacial, espectral e temporal utilizando sensoriamento remoto como apoio para o monitoramento de campo, fornecendo padrões para auxiliar o produtor na tomada de decisão.

Portanto, este estudo tem como objetivo avaliar a aplicabilidade do monitoramento do cafeeiro por radiômetro orbital e explorar o espectro obtido do radiômetro dos sensores ETM+ e OLI-TIRS para caracterizar o padrão espectral, espacial e temporal da lavoura em diferentes sistemas de irrigação, a ocorrência de ferrugem do cafeeiro e a fenologia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cultura do cafeeiro

O café é um dos produtos do agronegócio de maior importância para o Brasil. O país possui condições geográficas, climáticas e de dimensão territorial adequadas para a cultura, além de incentivos à pesquisa, que geram resultados significativos (CONSÓRCIO PESQUISA CAFÉ, 2016). Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de café e o segundo maior mercado consumidor, atrás somente dos Estados Unidos (ABIC, 2016).

As áreas cafeeiras estão concentradas no centro-sul do país, onde se destacam quatro estados produtores: Minas Gerais, São Paulo, Espírito Santo e Paraná. A região Nordeste também tem plantações na Bahia, e na região Norte pode-se destacar Rondônia. A produção de café arábica se concentra em São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Bahia e parte do Espírito Santo, enquanto o café robusta é plantado principalmente no Espírito Santo e em Rondônia (CONAB, 2016; GUIMARÃES et al., 2002).

Os produtores rurais enfrentam constantes desafios com a cultura do café, buscando tornar possível o processo produtivo com um desenvolvimento agrícola sustentável e gerando um produto de qualidade para atender aos mercados consumidores, cada vez mais exigentes (VENTURA et al., 2007).

O café é um produto que movimenta a economia e, por ser vulnerável a diferentes fatores, pode causar instabilidades no setor. Fatores como geadas, estresse hídrico, pragas, doenças, nutrição mineral e aspectos econômicos afetam

a produtividade da cultura do cafeeiro de ano para ano, levando a oscilações nos preços e comprometendo o abastecimento interno e as exportações (ASSAD et al., 2007).

Outro fator que influencia a produção do cafeeiro é a bienalidade, ou seja, um ano de alta e outro de baixa produtividade. A bienalidade é comumente atribuída à diminuição de reservas das plantas em um ano de alta produtividade, fazendo com que ocorra menor crescimento dos ramos plagiotrópicos, ou seja, os ramos produtivos do cafeeiro, e, em consequência, uma produção mais baixa no ano seguinte (DAMATTA et al., 2007; LAVIOLA, et al., 2007; SILVA et al., 2010).

Geralmente, o cafeeiro arábica é afetado, nas suas diversas fases fenológicas, pelas condições ambientais, em especial a variação fotoperiódica e as condições meteorológicas, principalmente a distribuição pluviométrica e a temperatura do ar, que interferem não apenas na fenologia, mas também na produtividade e na qualidade da bebida (MEIRELES et al., 2009).

2.2 Fenologia do cafeeiro

O ciclo fenológico do cafeeiro da espécie *Coffea arabica* L. apresenta sucessivas fases vegetativas e reprodutivas, que ocorrem em aproximadamente dois anos. Isso o diferencia da maioria das plantas, que emitem as inflorescências na primavera e frutificam no mesmo ano fenológico (CAMARGO; CAMARGO, 2001). Esse ciclo pode ser subdividido em seis fases bem distintas (Figura 1), sendo duas vegetativas e quatro reprodutivas: 1ª) vegetação e formação de gemas foliares; 2ª) indução e maturação das gemas florais; 3ª) florada; 4ª) granação dos frutos; 5ª) maturação dos frutos; e 6ª) repouso e senescência dos ramos terciários e quaternários (CAMARGO; CAMARGO, 2001). Em vista das condições climáticas, os florescimentos são sucessivos (GOLVEA, 1984; PEZZOPANE et al., 2003).

A esquematização das diferentes fases fenológicas do cafeeiro arábica possibilita identificar as fases que exigem água facilmente disponível no solo e aquelas em que, convenientemente, devem ocorrer pequenos estresses hídricos para condicionar uma florada abundante. A esquematização facilita, entre outras coisas, o reconhecimento das melhores épocas de aplicação de tratamentos fitossanitários e a execução das diversas operações agrícolas necessárias (CAMARGO; CAMARGO, 2001). Quando há um choque hídrico, por chuva ou irrigação, a florada é desencadeada. Outro fator que pode desencadear a florada é o aumento acentuado da umidade relativa do ar (CAMARGO; FRANCO, 1985).

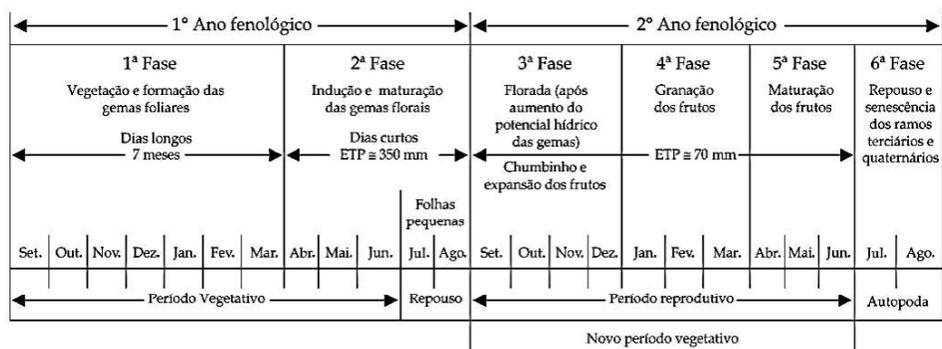


Figura 1. Esquematização das seis fases fenológicas do cafeeiro arábica, durante 24 meses, nas condições climáticas tropicais do Brasil. (CAMARGO; CAMARGO, 2001).

2.3 Irrigação na cafeicultura

A utilização e o manejo correto da irrigação em regiões aptas e inaptas para o cafeeiro têm crescido devido às influências nos fatores de produção, dependendo do estágio fenológico, ocasionada pela deficiência de água (MAIA, 2004).

Há três estádios em que a falta de água pode afetar com maior intensidade a produtividade do cafeeiro: a pré-florada, normalmente entre os meses de junho e setembro, quando a falta de chuva pode provocar a má formação dos botões florais e sua queda; a expansão do fruto, entre os meses de outubro e dezembro,

podendo haver queda de frutos ou um pequeno crescimento do pergaminho, limitando o tamanho do grão; e o enchimento de grãos, que vai do mês de janeiro a março, período em que o déficit hídrico causa má formação nos grãos, originando grãos pequenos e frutos com lóculos vazios, os chamados “grãos chochos” (SOARES, 2005).

A irrigação não reduz o efeito bienal, mas propicia aumentos na produtividade, tanto em regiões onde a deficiência hídrica coincide com o estágio de frutificação quanto em regiões aptas ao cultivo (FARIA; SIQUEIRA, 2005). Além disso, ela não ameniza o efeito de bienalidade de produção do cafeeiro em relação às plantas cultivadas em sequeiro (SILVA; TEODORO; MELO, 2008). Portanto, o conhecimento e a identificação do déficit hídrico no crescimento e produção do café são de grande importância, pois podem afetar a safra atual e a do ano seguinte.

A irrigação fornece a quantidade adequada de água, evitando o déficit hídrico sempre que a água proveniente das chuvas não for suficiente para atender a demanda hídrica da planta (RODRIGUES et al., 2010). No entanto, embora haja benefícios para a cafeicultura, o cultivo em sistema irrigado pode influenciar a intensidade de doenças, como a ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) (POZZA; CARVALHO; CHALFOUN, 2010).

2.4 Ferrugem do cafeeiro

As doenças representam os fatores mais limitantes para a produção do café, tanto para os pequenos agricultores de base familiar quanto para os grandes produtores em escala empresarial, podendo causar perdas que chegam a inviabilizar a exploração da cultura. As doenças do cafeeiro, sejam de origem biótica (fungos, bactérias, nematoides e vírus), sejam de origem abiótica (que não têm o envolvimento de patógenos e estão associadas a problemas intrínsecos da planta ou a fatores ambientais do local de implantação da cultura, bem como ao

manejo inadequado das lavouras, principalmente na formação das mudas), geram problemas significativos para a cultura e podem afetar todas as partes das plantas (VENTURA et al., 2007).

Diversos patógenos podem infectar o cafeeiro, tais como fungos, bactérias e nematoides. Um deles é a ferrugem do cafeeiro, considerada uma das mais impactantes para essa cultura.

A ferrugem do cafeeiro é uma doença foliar causada pelo fungo *Hemileia vastatrix* (Berk & Br.), que se caracteriza por pequenos pontos circulares de cor amarela alaranjada, mais visíveis contra a luz. Por se assemelhar a outras doenças e deficiências nutricionais, é de difícil diagnóstico. Seu progresso se dá com o aumento do tamanho dos pontos circulares e uma massa de aspecto pulverulento (uredósporos) na face abaxial das folhas. Em razão da severidade da doença, algumas partes do tecido foliar são destruídas e necrosadas nos estádios mais avançados (POZZA; CARVALHO; CHALFOUN, 2010).

A ferrugem do cafeeiro tem grande importância histórica, sendo uma das doenças do café mais presentes no mundo. Infecções generalizadas causam uma alta queda no processo fotossintético e diminuem o enfolhamento. Se a diminuição do enfolhamento ocorrer antes do florescimento, isso interfere no desenvolvimento dos botões florais e na frutificação, e se ocorrer durante o desenvolvimento dos frutos, poderá haver a formação de grãos anormais e defeituosos (ZAMBOLIM et al., 2002). Consequentemente, há grandes perdas na produção e gastos significativos (JACKSON; SKILLMAN; VANDERMEER, 2012).

Segundo Pinto et al. (2002), os primeiros sinais da doença (esporulação) aparecem entre dezembro e janeiro. Com o aumento da taxa de progresso da doença, nos meses de março e abril, há um crescimento exponencial, observando-se a maior intensidade nos meses de junho ou julho. A disseminação ocorre por ação do vento, gotas de água de chuva ou irrigação, tratos culturais, insetos, outros

animais e o próprio homem, se por ventura entrar em contato com plantas infectadas. (GODOY et al.,1997).

De acordo com vários autores, as condições climáticas que favorecem a ferrugem são temperaturas entre 20 e 25 °C e o total de chuvas maior que 30 mm. Temperaturas acima de 30 °C e abaixo de 15 °C são desfavoráveis à doença (MONTROYA; CHAVES, 1974; AKUTSU, 1981; KUSHALAPPA et al., 1983), no entanto, a epidemia da ferrugem aumenta rapidamente em temperaturas entre 15 e 18 °C (PINTO, 2002). Em condições de campo, o intervalo de 16 °C a 26 °C foi o ideal para a esporulação ou visualização dos sinais da ferrugem (BOLDINI, 2001; MIRANDA, 2006, TALAMINI et al., 2003).

De maneira geral, a epidemia da ferrugem na cultura do café começa com o início do período chuvoso, entre novembro e dezembro. O pico da doença tem início em junho ou julho, decrescendo a partir desses meses (ZAMBOLIM et al., 2005).

2.5 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é definido como a arte e a ciência de obter informação sobre um objeto, área ou fenômeno por meio de análise de dados adquiridos com um dispositivo, sem estar em contato físico direto com ele. Pode ser usado para medir e monitorar importantes características biofísicas e atividades humanas (NOVO, 1992; LILLESAND et al., 2007; JENSEN, 2009), permitindo obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre através da captação e do registro da energia refletida ou emitida por esta superfície (FLORENZANO, 2011).

Com a utilização de equipamentos como aeronaves e satélites, o sensoriamento remoto consiste em monitorar e fotografar superfícies terrestres, por meio de um sensor que registra a energia e a transmite de maneira eletrônica

para uma estação, onde é processada e transformada em imagem (JONG; MEER, 2006).

A forma mais rápida de realizar a espacialização é utilizar imagens de satélites associados ao processamento digital em sistemas de informações geográficas. No caso da atividade cafeeira, conhecer sua distribuição espacial é vital para prever e planejar sua distribuição em escala municipal, estadual e federal (MOREIRA, 2008).

O que tem colaborado para fortalecer a expansão deste tipo de tecnologia é a qualidade dos produtos que têm sido disponibilizados de forma gratuita aos usuários. Somente no catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), é possível listar dez diferentes satélites com imagens de acesso gratuito. Outra grande fonte de aquisição de imagens gratuitas de sensoriamento remoto é a página do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).

Já o LANDSAT foi uma iniciativa conjunta entre o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e a Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA), dedicado exclusivamente à observação de dados dos recursos naturais terrestres. O Brasil recebe imagens do LANDSAT desde 1973, na sede do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em Cuiabá. Porém, a aquisição das imagens se tornou gratuita somente em 2009 (INPE, 2016). O satélite mais recente enviado para o espaço foi o LANDSAT-8 OLI/TIRS (Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor), e suas imagens de média qualidade se tornaram disponíveis em 2013. Seu antecessor, o LANDSAT-7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) foi lançado em 1999 e está em funcionamento até o momento. Cada imagem (ou cena) do LANDSAT-8 OLI/TIRS cobre uma área de 170 km x 185 km e possui 8 bandas multiespectrais, 2 bandas termais e 1 banda pancromática. No caso do LANDSAT-ETM+, cada imagem cobre também uma área de 170 km x 185 km e possui 6 bandas multiespectrais, 1 banda termal e 1 banda pancromática (USGS, 2016).

As imagens multiespectrais oferecem informações sobre a composição dos objetos, em função da radiação eletromagnética (MOREIRA, 2011). Assim, a assinatura espectral é a reflectância em função do comprimento de onda. Cada objeto tem uma assinatura única, podendo ser usada em uma classificação (NASA, 2016).

A assinatura espectral do dossel de uma dada cultura pode ser influenciada por fatores como umidade, vigor vegetativo, tamanho da planta, solo, topografia, densidade de plantio, espaçamento, idade, cultivo, manejo, entre outros (MOREIRA; ADAMI; RUDORFF, 2004; VIEIRA, 2006). Dessa forma, a assinatura espectral de uma folha é função de sua composição, morfologia e estrutura interna, sendo a celulose, os solutos, os espaços intercelulares e os pigmentos existentes dentro dos cloroplastos os constituintes das folhas considerados mais importantes (MOREIRA, 2011). Além desses constituintes, outros fatores como conteúdo de água, maturação ou idade, posição nodal, condição de iluminação ou sombreamento e senescência afetam a energia refletida pelas folhas (GAUSMAN, 1985; PONZONI, 2001), bem como características ópticas, dielétricas ou térmicas dos elementos vegetais (BARET, 2007).

Segundo Moreira (2011), na região do visível, o comportamento da reflexão é determinado pela clorofila. A maior parte da radiação eletromagnética é absorvida na faixa do visível entre os intervalos de 0,4 - 0,5 μm (azul) e 0,6 - 0,7 μm (vermelho), enquanto no intervalo de 0,5 - 0,6 μm (verde) ela é refletida. Na faixa de 0,7 - 1,3 μm (infravermelho próximo), a reflexão espectral é alta e com baixa absorção. De acordo com Ponzoni et al. (2012), o comportamento espectral na região de 1,3 - 3,0 μm (infravermelho médio) é influenciado pela estrutura da folha e pela concentração de água nos tecidos, com grande absorção ocorrendo em 1,45 e 1,95 μm , ocasionando picos de reflectância.

Para que isso seja possível, utiliza-se a radiometria, que pode ser definida como um conjunto de técnicas utilizadas para medir quantitativamente a energia

radiante. Os sistemas empregados para a medição desta energia são os radiômetros, presentes nos satélites Landsat. Por meio das medidas radiométricas, é possível descobrir a intensidade com que cada objeto reflete a energia eletromagnética nos diferentes comprimentos de onda do espectro, o que permite explicar e entender como o objeto irá aparecer nas imagens (OLIVEIRA et al., 2009; TYAGI & BHOSLE, 2014).

Dependendo da aplicação, muitos problemas das lavouras podem ser resolvidos, ou pelo menos reduzidos, com a utilização da tecnologia digital, como imagens combinadas com algum tipo de processamento de imagem e, em alguns casos, o reconhecimento de padrões de classificação (BARBEDO, 2013).

O uso de assinatura espectral é um método comum para analisar e detectar mudanças fisiológicas e químicas nas plantas. Com base na informação de alguns comprimentos de onda, esse método pode ser utilizado para especificar diferentes parâmetros de plantas, como teor de pigmentos, área da folha e teor de água (PEÑUELAS et al., 1993; BLACKBURN, 1998; GITELSON et al., 2002). Uma combinação de diferentes comprimentos de onda utilizados para índices espectrais de doenças pode ser útil para simplificar sua detecção por meio de sensores espectrais, uma vez que cada doença influencia a assinatura espectral de um modo característico (MAHLEIN et al., 2013).

Quanto aos estudos relacionados ao uso do sensoriamento remoto na cultura do cafeeiro, podem ser citados alguns trabalhos, como a caracterização espaço-temporal de agroecossistemas cafeeiros de Minas Gerais usando geotecnologias para mapear, quantificar e avaliar a ocupação por cafezais em áreas representativas das principais regiões produtoras do estado (ALVES et al., 2007); o monitoramento do efeito do comportamento bienal no rendimento de café, usando sensoriamento remoto com imagens MODIS (BERNARDES et al., 2012a); a utilização de dados de sensoriamento remoto para mapear a ocupação cafeeira em Minas Gerais e relacionar com os dados de altimetria, declividade e

orientação de vertentes (BERNARDES et al., 2012b); a avaliação do potencial de discriminação dos níveis de infecção de ferrugem do cafeeiro em folhas de café a partir de resoluções espectrais correspondentes às bandas do sensor do Sentinel-2 (CHEMURA et al., 2016); a análise temporal do comportamento espectral da cultura do café utilizando imagens LANDSAT para previsão de safras (MOREIRA et al., 2004); o mapeamento do cultivo de café na região sul de Minas Gerais, utilizando imagens Landsat-5 Thematic Mapper e Modelos Digitais do Terreno (PRADO et al., 2016); a utilização de técnicas de extração de conhecimentos para investigar quais atributos ambientais e fenológicos mais influenciam a ocorrência de cercosporiose em cafeeiros do sul de Minas Gerais (SOUZA et al., 2013); e o monitoramento agrometeorológico de áreas cafeeiras do sul de Minas Gerais utilizando imagens do sensor MODIS (VOLPATO et al., 2013).

A identificação e o mapeamento de áreas cafeeiras via interpretação de imagens de sensores orbitais são mais complexos para o café do que para outras culturas, como a da cana-de-açúcar e a da soja, pois envolvem não só o uso de imagens multitemporais de um mesmo sensor, como também imagens de diferentes sensores (MOREIRA et al., 2008).

A complexidade na discriminação dessa cultura está relacionada, em grande parte, ao tipo de manejo e ao sistema de cultivo, que difere bastante entre propriedades rurais. Essa heterogeneidade provocada pelas variações no meio físico e na fenologia da cultura acarretam mudanças significativas na geometria de iluminação da cena, aumentando a variabilidade no comportamento espectral (MOREIRA et al., 2008; MOREIRA et al., 2004).

REFERÊNCIAS

- ABIC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ. Disponível em: <<http://www.abic.com.br>>. Acesso em: 7 fev. 2016.
- AGRIOS, G. N. **Plant Pathology**. 5. Ed. London: Elsevier Academic Press, 2005. 922p.
- AKUTSU, M. Relações de funções climáticas e bióticas com a taxa de infecção da ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berk et Br.). 1981. 67 f. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1981.
- ALVES, H. M. R.; VIEIRA, T. G. C.; BERNARDES, T.; LACERDA, M. P. C.; VOLPATO, M. M. L. Dinâmica espaço-temporal de ambientes cafeeiros de Minas Gerais. **Informe Agropecuário** (Belo Horizonte), v. 28, p. 38-49, 2007.
- ALVES, M. C.; SILVA, F. M. ; MORAES, J. C. ; POZZA, E. A. ; OLIVEIRA, M. S. ; SOUZA, J. C. S. ; ALVES, L. S. . Geostatistical analysis of the spatial variation of the berry borer and leaf miner in a coffee agroecosystem. **Precision Agriculture** (Print), v. 12, p. 18-31, 2011.
- ASSAD, D. E.; MARIN, R. F.; EVANGELISTA, S. R.; PILAU, F. G.; FARIAS, J. R. B.; PINTO, H. S. Sistema de previsão de safra de soja para o Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p. 615-625, 2007.
- BARBEDO, J. G. A. Digital image processing techniques for detecting, quantifying and clarifying plant disease. **Spring Plus**, vol. 2, p. 660. 2013.
- BARET, F.; HOULÈS, V.; GUÈRIF, M. Quantification of plant stress using remote sensing observations and crop models: the case of nitrogen management. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, p. 869–880. 2007.
- BERNARDES, T.; MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; GIAROLLA, A.; RUDORFF, B. F. T. Monitoring Biennial Bearing Effect on Coffee Yield Using MODIS Remote Sensing Imagery. **Remote Sensing**, v. 4, p. 2492-2509, 2012a.
- BERNARDES, T.; MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Diagnóstico físico-ambiental da cafeicultura no Estado de Minas Gerais - Brasil. **Coffee Science**, v. 7, p. 139, 2012b.
- BLACKBURN, G. A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scale: an evaluation of some hyperspectral approaches. **Remote Sensing of Environment**, 66, p. 273–285, 1998.
- BOLDINI, J.M. Epidemiologia da ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro irrigado e fertirrigado. 2001. 67 f. Dissertação (Mestrado e Agronomia) –Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2001.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, 60(1), 65-68, 2001.

CAMARGO, A.P.; FRANCO, C.F. Clima e fenologia do cafeeiro. In: **Cultura de café no Brasil: manual de recomendações**. 5.ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Café, Ministério da Indústria e Comércio, 1985. p.19- 50.

CARVALHO, V. L.; CHALFOUN, S. M. **Controle da ferrugem: a importância da época de execução**. Lavras: Epamig, 1999. (Circular Técnico, 104). 44 p.

CHEMURA, A.; MUTANGA, O.; DUBE, T. Separability of coffee leaf rust infection levels with machine learning methods at Sentinel-2 MSI spectral resolutions. **Precision Agriculture**, v. 18, p. 859-881. 2016.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 7 fev. 2016.

CONSÓRCIO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DO CAFÉ (Consórcio Pesquisa Café). Disponível em: <<http://www.consorciopesquisacafe.com.br/>>. Acesso em: 7 fev. 2016.

DAMATTA, F. M.; RONCHI, C. P.; MAESTRI, M.; BARROS, R. S. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, p.485-510, 2007.

FARIA, R.T. de; SIQUEIRA, R. Produtividade do cafeeiro e cultivos intercalares sob diferentes regimes hídricos. **Bragantia**, v.64, p.583-590, 2005.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3ª ed. amp. e atual. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 128 p.

GAUSMAN, H. W. Leaf reflectance in near-infrared. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, V. 51, n. 11, p. 1725-1734, 1985.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, 80, 76–87, 2002.

GODOY, C. V.; BERGAMIN FILHO, A.; SALGADO, C. L. Doenças do cafeeiro (*Coffea arabica* L.). In: KIMATI, H.; AMORIM, L.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A.; REZENDE, J. A. M. (Ed.). **Manual de fitopatologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1997. p. 184-200.

GOUVEIA, N.M. Estudo da diferenciação e crescimento das gemas florais de *Coffea arabica* L.: observações sobre antese e maturação dos frutos. 1984. 237 f. Dissertação (Mestrado em Biologia) – Instituto de Biologia, UNICAMP, Campinas.

GUIMARÃES, R. J.; MENDES, A. N. G.; SOUZA, C. A. S. **Cafecultura**. Lavras, MG: UFLA/FAEPE, 2002. 317 p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. Disponível em: <<http://www.inpe.br/>>. Acesso em: 15 fev. 2016

JACKSON, D.; SKILLMAN, J.; VANDERMEER, J. Indirect biological control of the coffee leaf rust, *Hemileia vastatrix*, by the entomogenous fungus *Lecanicillium lecanii* in a complex coffee agroecosystem. **Biological Control**, 61, p. 89–97, 2012.

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

JONG, S. M.; MEER, F. D. **Remote Sensing Image Analysis: including the spatial domain**, v.5, 359p. 2006.

KUSHALAPPA, A. C., AKUTSU, M. & LUDWIG, A. Application of survival ratio monocyclic process of *Hemileia vastatrix* in predicting coffee rust infection rates. **Phytopathology**, v.73, p.96-103. 1983.

LAVIOLA, B. G.; MARTINEZ, H. E. P.; SALOMÃO, L. C. C.; CRUZ, C. D.; MENDONÇA, S. M.; NETO, A. P. Alocação de fotoassimilados em folhas e frutos de cafeeiro cultivado em duas altitudes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.11, p.1521-1530, nov. 2007.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. & CHIPMAN, J. W. **Remote sensing and image interpretation**. New York, John Wiley & Sons. 897 p. 2007.

MAHLEIN, A. K.; RUMPF, T.; WELKE, P.; DEHN, H. W.; PLÜMER, L.; STEINER, U.; OERKE, E. C. Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. **Remote Sensing of Environment**, 128, p. 21–30, 2013.

MAIA, R. M. B. Disponibilidade de água no solo para a cultura do café no Planalto de Conquista - BA: análise dos componentes do balanço hídrico. 2004. 46 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal da Bahia, Cruz das Almas, 2004.

MEIRELES, E. J. L.; CAMARGO, M. B. P.; PEZZOPANE, J. R. M.; THOMAZIELLO, R. A.; FAHL, J. I.; BARDIN, L.; SANTOS, J. C. F.; JAPIASSÚ, L. B.; GARCIA, A. W. R.; MIGUEL, A. E.; FERREIRA, R. A. **Fenologia do Cafeeiro**: condições

agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004–2005. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 128 p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Vegetal:** Culturas – Café. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cafe/saiba-mais>. Acesso em: 10 mar. 2016.

MIRANDA, J. C.; SOUZA, P. A.; POZZA, E. A.; FARIA, M. A.; FLORISVALDA DA SILVA SANTOS, F. S.; BARRETO, S. S.; SILVA, M. L. O. Intensidade da ferrugem em cafeeiro fertirrigado. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 5, p. 885-891, set./out., 2006.

MONTOYA, R.H.; CHAVES, G.M. Influência da temperatura e da luz na germinação, infectividade e período de geração de *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. **Experientiae**, v. 18, n. 2, p. 239-266, 1974.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4ª ed. atualizada e ampliada. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2011. 422 p.

MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 3, p. 223-231, mar. 2004.

MOREIRA, M. A.; BARROS, M. A.; RUDORFF, B.F. T. Geotecnologias no mapeamento da cultura do café em escala municipal. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, vol. 20, n.1, p. 101-110, jun. 2008.

NASA. **Remote Sensing:** Spectral Signatures. 2016. Disponível em: http://earthobservatory.nasa.gov/Features/RemoteSensing/remote_05.php

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo, Edgard Blucher. 308 p. 1992.

OLIVEIRA, L. G. L.; PONZONI, F. J.; MORAES, E. C. Conversão de dados radiométricos orbitais por diferentes metodologias de caracterização atmosférica. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol.27, n.1. São Paulo. Jan./Mar. 2009.

PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; BIEL, C.; SERRANO, L.; SAVE, R. The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 14, n.10, p. 1887–1905, 1993.

PEZZOPANE, J.R.M.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; THOMAZIELLO, R.A.; CAMARGO, M.B.P. Escala para avaliação de estádios fenológicos do cafeeiro arábica. **Bragantia**, Campinas, v.62, n.3, p.499-505, 2003.

PINTO, A.C.S.; POZZA, E. A.; POZZA, Adélia A. A.; TALAMINI, V.; BOLDINI, J. M.; SANTOS, F. S. Descrição da epidemia da ferrugem do cafeeiro com redes neuronais. **Fitopatologia Brasileira**, Fortaleza, v. 27, n.5, p. 517-524, 2002.

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P. R., MADEIRA NETTO, J. S. (Org.) **Sensoriamento remoto, reflectância dos alvos naturais**. Brasília: Editora da UNB, 2001. P. 157-199.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2ª ed. atul. e ampl., São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 177 p.

POZZA, E. A.; CARVALHO, V. L.; CHALFOUN, S. M. Sintomas de injúrias causadas por doenças em cafeeiro. In: GUIMARAES, R. J.; MENDES, A. N. G.; BALIZA, D. P. (Ed.). **Semiologia do cafeeiro: sintomas de desordens nutricionais, fitossanitárias e fisiológicas semiologia do cafeeiro**. Lavras: Ed. UFLA, 2010. p. 68-106.

PRADO, D. F. C.; HAYAKAWA, E. H.; KAWAKUBO, F. S. Mapeamento do cultivo de café no sul de Minas Gerais utilizando imagens Landsat -5 TM e variáveis topográficas. **Revista do Departamento de Geografia - USP**, v. 31, p. 43-57, 2016.

RODRIGUES, S.; FILHO, G. S. F.; ALMEIDA, W. A.; NETO, A. F. C. Desenvolvimento do café arábica (*Coffea arabica*) submetido a diferentes lâminas de irrigação, nas condições do estado de Rondônia. **Global Science and Technology**, v. 03, n. 01, p. 44-49, jan/abr. 2010.

RODRIGUES, S.; FILHO, G. S. F.; ALMEIDA, W. A.; NETO, A. F. C. Desenvolvimento do café arábica (*Coffea arabica*) submetido a diferentes lâminas de irrigação, nas condições do estado de Rondônia. **Global Science and Technology**, v. 03, n. 01, p. 44-49, jan/abr. 2010.

ROTEM, J.; PALT, J. Irrigation and Plant Diseases. **Annual Review of Phytopathology**, v. 7, p. 267-288, set. 1969.

SILVA, C. A.; TEODORO, R. E. F.; MELO, B. Produtividade e rendimento do cafeeiro submetido a lâminas de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.3, p.387-394, mar. 2008.

SILVA, F. M.; ALVES, M. C.; SOUZA, J. C. S.; OLIVEIRA, M. S. Efeitos da colheita manual na bienalidade do cafeeiro em Ijaci, Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v.34, p.625-632, 2010.

SOARES, A. R. Efeito da lâmina de irrigação e da porcentagem de área molhada no desenvolvimento e produção do cafeeiro em Patrocínio, MG. 2005, 63 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

SOUZA, V. C. O.; CUNHA, R. L.; ANDRADE, L. N. D.; VOLPATO, M. M. L.; CARVALHO, V. L.; ESMIN, A. A. A. Técnicas de extração de conhecimentos aplicadas à modelagem de ocorrência da Cercosporiose (*Cercospora coffeicola* Berkeley & Cooke) em cafeeiros na região sul de Minas Gerais. **Coffee Science**, v. 8, p. 91-100, 2013.

TALAMINI, V.; POZZA, E. A. A.; SOUZA, P. E.; SILVA, A. M. Progresso da ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro (*Coffea arabica* L.) com diferentes épocas de início e parcelamentos da fertirrigação. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras. V.27, n.1, p.141-149, jan./fev., 2003.

TYAGI, P. & BHOSLE, U. Radiometric Correction of Multispectral Images Using Radon Transform. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, (March 2014) 42(1):23–34. DOI 10.1007/s12524-013-0307-y.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/>>. Acesso em: 15 fev. 2016.

VENTURA, J. A.; COSTA, H.; SANTANA, E. N.; MARTINS, M. V. V.; **Diagnóstico e Manejo das Doenças do Cafeeiro Conilon (*Coffea canephora*)**. In: FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A.; BRAGANÇA, S. M.; FERRÃO, M. A. G. & MUNER, L. H.; *Café Conilon*. 1ª Ed., pag 453-497 – Vitória, ES: Incaper, 2007.

VIEIRA, T. G.; ALVES, H. M. R.; LACERDA, M. P. C.; VEIGA, R. D.; EPIPHANIO, J. C. N. Crop parameters and spectral response of coffee (*Coffea arabica* L.) areas within the state of Minas Gerais, Brazil. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 111-118, jul./dez. 2006.

VOLPATO, M. M. L.; VIEIRA, T. G. C.; ALVES, H. M. R.; SANTOS, W. J. R. Imagens do sensor MODIS para monitoramento agrometeorológico de áreas cafeeiras. **Coffee Science**, v. 2, p. 176-182, 2013.

ZAMBOLIM, L.; VALE, F. X. R. do; COSTA, H.; PEREIRA, A.; CHAVES, G. M.; **Epidemiologia e controle integrado da ferrugem do cafeeiro**. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.), *O estado da arte de tecnologias na produção de café*. Viçosa, MG: UFV, 2002. p. 369-450.

ZAMBOLIM, L.; VALE, F. X. R.; ZAMBOLIM, E. M. Doenças do cafeeiro. In: KIMATI, H. et al. (Eds.) **Manual de Fitopatologia: Doenças das plantas cultivadas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2005. p. 165-180.

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

ARTIGO 1

Caracterização radiométrica orbital da ferrugem do cafeeiro em diferentes sistemas de irrigação

Artigo submetido ou em processo de submissão

Miryan Silva de Oliveira Pires¹ - Marcelo de Carvalho Alves¹ - Edson Ampélio Pozza²

¹Engineering Department, Federal University of Lavras, PO BOX 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brazil.

²Plant Pathology Department, Federal University of Lavras, PO BOX 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brazil.

Autor para correspondência: Marcelo de Carvalho Alves
marcelocarvalhoalves@gmail.com

Preparado em concordância com as normas do periódico
“International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation”
(Versão preliminar – em processo de submissão)

Resumo

A ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) é uma das doenças mais presentes na cultura do cafeeiro e causa sérios danos à lavoura. Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do monitoramento de lavouras de cafeeiro sob diferentes sistemas de irrigação por radiometria orbital, explorando a assinatura espectral e o padrão espectral, espacial e temporal da ferrugem. O estudo foi realizado em quatro áreas de lavouras cafeeiras no município de Carmo do Rio Claro – MG entre agosto de 2012 e dezembro de 2014, em sistemas de irrigação por autopropelido, gotejamento, pivô central e sistema sob sequeiro. Foram utilizadas quinze imagens Landsat-7/ETM+ e Landsat-8/OLI-TIRS, tentando estabelecer uma melhor sequência de imagens entre as datas de coleta de dados *in situ*. Observou-se que o mês de agosto apresentou a maior incidência de ferrugem do cafeeiro e correspondeu aos valores de menor reflectância do NIR para todas as áreas, independentemente do sistema de irrigação. Já na região do SWIR-1 e SWIR-2, houve diferença na reflectância entre as áreas irrigadas e a área cultivada em sequeiro, que apresentaram maior reflectância em períodos chuvosos. Esses aspectos ainda não tinham sido estudados em cafeeiros sob diferentes sistemas de irrigação, e os resultados corroboram para as pesquisas até então relatadas em cafeeiros.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L.. *Hemileia vastatrix* Berk. & Br.. Irrigação. Sensoriamento remoto. Assinatura espectral.

Introdução

O café é um produto consumido mundialmente e apresenta grande importância na economia brasileira. O Brasil é o maior produtor de café do mundo e o segundo maior consumidor, sendo que o estado de Minas Gerais se destaca como o maior produtor (MAPA, 2016).

Entre os fatores que afetam o cafeeiro (*Coffea arabica* L.), destaca-se a ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.). Essa doença causa intensa diminuição do enfolhamento e redução na produtividade, e sua intensidade depende da interação entre o ambiente, o hospedeiro e o patógeno (Talamini et al., 2003; Agrios, 2005; Pozza et al., 2010). Outro fator relevante na produção é o manejo de irrigação, importante para fornecer a quantidade de água adequada e evitar o déficit hídrico sempre que a pluviosidade não for suficiente para atender a demanda hídrica da planta (Rodrigues et al., 2010). Entretanto, a irrigação pode alterar o microclima da lavoura, modificando as condições do ambiente e aumentando o período de molhamento foliar (Rotem; Palti, 1969), o que contribui para o aumento da incidência de doenças (Carvalho; Chalfoun, 1999).

Muitas pesquisas abordando técnicas de processamento de imagens e sensoriamento remoto para utilização como suporte no monitoramento de doenças em plantas vêm sendo desenvolvidas. Alguns exemplos dessas doenças são a ferrugem asiática da soja (Silva et al., 2009), mancha foliar (*Cercospora zeae-maydis*) do milho (Dhau et al., 2017), *Rhizoctonia solani* (Webb & Calderón, 2015), *Cercospora beticola*, *Erysiphe betae* e *Uromyces betae* (Mahlein et al., 2010) em beterraba, mofo branco (*Sclerotinea sclerotiorum*) em feijão (Boechat et al., 2014), ferrugem amarela (*Puccinia striiformis*) em trigo (Bravo et al., 2003), *Heterodera schachtii* e *Rhizoctonia solani* (Hillnhütter et al., 2012), *Magnaporthe grisea* em arroz (Kobayashi et al. 2001), *Phytophthora infestans* em tomate (Zhang et al. 2003) e *Venturia inaequalis* em macieira (Delalieux et al. 2007).

Não menos importante, Chemura et al. (2016) avaliaram o potencial do uso de medidas de reflectância para discriminar três níveis de infestação – saudável, moderada e severa – da ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) nas folhas das plantas de café em casa de vegetação, fazendo uso de espectrômetro Apogee VIS-NIR com faixa espectral 400-900 nm e resolução espectral de 0,5 nm, para simular o sensor do satélite Sentinel-2.

Como houve estudos indicando que a cafeicultura pode ser monitorada por sensores orbitais, e partindo da hipótese que radiômetros de moderada e alta resolução podem ser aplicados em fases do sistema produtivo do café, objetivou-se avaliar a relação entre a radiometria espectral de lavouras cafeeiras em diferentes sistemas de irrigação e as variáveis relacionadas à ferrugem do cafeeiro, visando à obtenção de padrões espectral, espacial e temporal a partir de imagens Landsat-7//ETM+ e Landsat-8/OLI-TIRS.

Material e Métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado em quatro áreas de lavouras cafeeiras situadas no município de Carmo do Rio Claro entre agosto de 2012 e dezembro de 2014.

Carmo do Rio Claro está localizado na região sudoeste do estado de Minas Gerais e é banhado pela Represa de Furnas, com altitude de 798 m, latitude 20°58'17" Sul e longitude 46°7'57" Oeste (IBGE, 2010). O clima do município é classificado como subtropical mesotérmico, de acordo com a classificação Köppen-Geiger, e caracterizado por invernos secos e verões úmidos (subtropical/tropical de altitude – Cwa) (Kotttek et al., 2006). Conforme as normais climatológicas de 1961- 1990, a temperatura média no inverno é de aproximadamente 16 °C, e a média no verão é de aproximadamente 27 °C. O período mais chuvoso é entre os meses de dezembro e fevereiro, e o mais seco é entre abril e setembro (INMET, 2016).

O café cultivado nas áreas de estudo é da espécie *Coffea arabica* L., cultivar Acaiá 474/19, e cultivado sob diferentes sistemas de irrigação.

A área sob sistema de sequeiro possuía 30 ha, 6 anos, espaçamento de 3,6 m x 0,7 m e densidade de 3968 plantas.ha⁻¹, recepado em setembro de 2013.

A área sob sistema de irrigação por autopropelido possuía 2,6 ha, 7 anos, espaçamento de 3,5 m x 0,7 m e densidade de 4081 plantas.ha⁻¹.

A área sob sistema de irrigação por gotejamento possuía 11 ha, 2,5 anos, espaçamento de 3,6 m x 0,7 m e densidade de 3968 plantas.ha⁻¹.

A área sob sistema de irrigação por pivô central possuía 17 ha, 10 anos, espaçamento de 4,0 m x 0,5 m e densidade de 5000 plantas.ha⁻¹.

A irrigação foi realizada o ano todo de acordo com a necessidade das plantas, baseada na aferição de baterias de tensiômetros.

Os pontos de amostragem foram georreferenciados com GPS TRIMBLE 4600 LS® e Estação Total TC600®. As áreas de sequeiro, autopropelido, gotejamento e pivô central tinham 51, 50, 52 e 50 pontos amostrais, respectivamente. Em cada ponto amostral foram avaliadas cinco plantas. A distância entre pontos amostrais variou entre malhas de 50 x 50 m, 30 x 30 m, 40 x 40 m e 40 x 40 m, nas áreas de sequeiro, autopropelido, gotejamento e pivô central, respectivamente (Fig. 1).

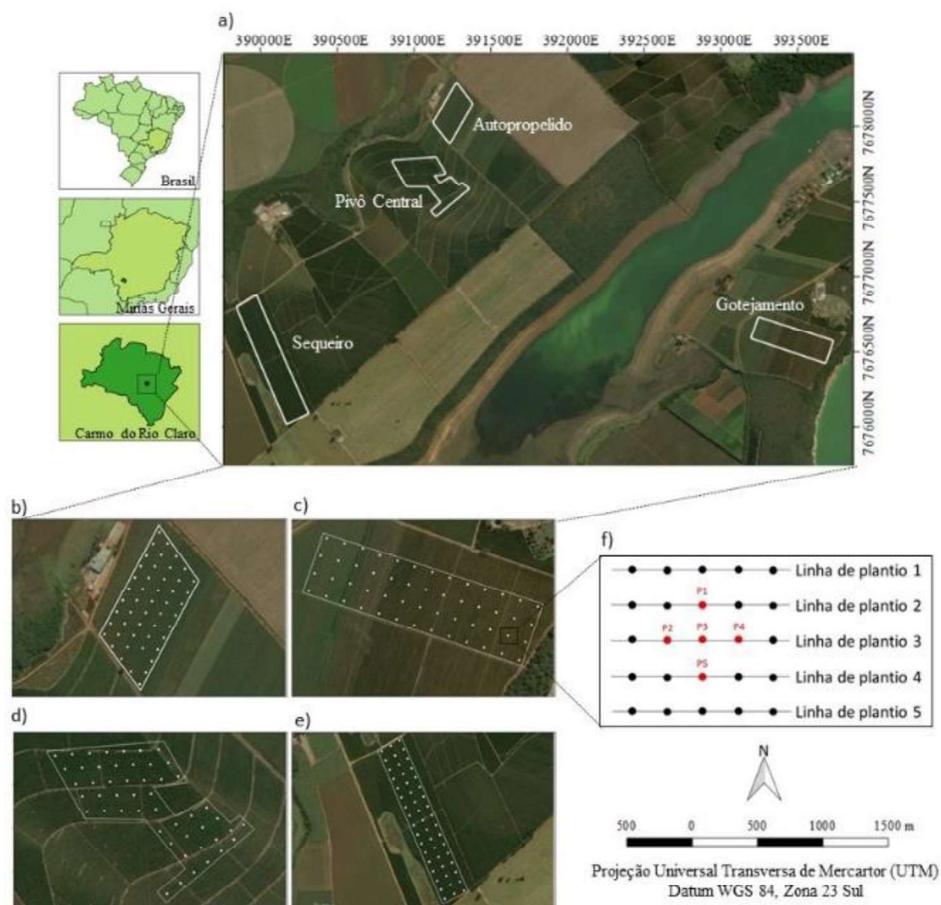


Figura 1. Mapa de localização das lavouras cafeeiras em Carmo do Rio Claro - MG (a). Malhas amostrais utilizadas para obter dados *in situ*, bem como dados de imagens orbitais Landsat-7/ETM+ e Landsat-8/OLI-TIRS de áreas cultivadas sob sequeiro e sistema de irrigação por autopropelido, gotejamento e pivô central (b, c, d, e) e ponto amostral, com a localização das cinco plantas amostradas com referência nas linhas de plantio (f).

Dados *in situ*

O levantamento dos dados *in situ* de enfolhamento e incidência de doença foi realizado em quatro áreas de lavoura cafeeira no município de Carmo do Rio Claro, Minas Gerais, aproximadamente a cada dois meses durante o período de agosto de 2012 a dezembro de 2014. Os dados *in situ* foram obtidos por Vasco (2015), Chaves (2015) e Neto (2016).

Enfolhamento

O enfolhamento (%) foi avaliado nos pontos amostrais segundo escala diagramática proposta por Boldini (2001), que consiste em notas de acordo com a porcentagem de enfolhamento das plantas, para cada 5 plantas/ponto. Essas plantas foram marcadas para as avaliações posteriores, que ocorreram de dois em dois meses, de agosto de 2012 a junho de 2014, totalizando 12 avaliações. Não houve avaliação nos meses de agosto, outubro e dezembro de 2014.

A porcentagem do enfolhamento foi adaptada da classificação feita por Boldini (2001), resultando nas classes nulo (0%), baixo (10 a 40%), moderado (40 a 70%) e alto (70 a 98%).

Incidência de doença

A incidência de doença (%) foi avaliada por amostragem de 12 folhas por planta, por método não destrutivo, no terço médio da copa, a partir do terceiro e do quarto par de folhas do ramo escolhido ao acaso (Huerta, 1963), sendo 5 plantas/ponto, 12 folhas/planta, no total de 60 folhas/ponto amostrado. Essas plantas foram marcadas para as avaliações posteriores, que ocorreram de dois em dois meses de agosto de 2012 a dezembro de 2014, totalizando 15 avaliações.

A incidência da doença foi determinada por porcentagem de folhas com sintomas em relação ao total amostrado, conforme a equação 1 (Campbell; Madden, 1990).

$$I (\%) = \frac{NFD}{NFT} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

I (%) = incidência (%) da doença

NFD = número de folhas doentes

NFT = número de folhas por tratamento

Após o cálculo para determinar a porcentagem, a incidência da ferrugem foi classificada em classes nula (0%), baixa (1,67 a 16,67%), moderada (16,67 a 33,33%) e alta (33,33 a 55%), adaptada da classificação feita por Chemura et al. (2016).

Dados climatológicos

Os dados climatológicos foram obtidos por uma estação meteorológica microclimatológica (Campbell Scientific®), instalada a 200 metros de distância das áreas de estudo para monitorar a temperatura e a precipitação. Os dados de temperaturas média (°C) e precipitação (mm) coletados foram utilizados para critério de comparação.

A média mensal de temperatura e de precipitação coletada nas estações foi plotada em gráficos para critérios de comparação com as outras variáveis de interesse.

Dados orbitais

O trabalho foi desenvolvido com a utilização de imagens dos satélites LANDSAT-7/ETM+ e LANDSAT-8/OLI-TIRS, obtidas por meio de download gratuito no catálogo de imagens do portal United States Geological Survey (USGS), referentes à proximidade com a data de cada coleta de dados *in situ*. Priorizou-se imagens livres de nuvens e quaisquer interferências na área de estudo que pudessem prejudicar o processamento digital.

As imagens foram escolhidas a partir de dois sensores diferentes, pelo fato de não ser possível a obtenção por apenas um deles, pois as imagens encontradas podiam não ser adequadas ao uso (ex. nuvens, sombra) ou não ter proximidade com a data *in situ* desejada. Por esse motivo, elas foram escolhidas para que pudessem ser intercaladas, formando sequência para favorecer o estudo das áreas.

As datas das imagens dos satélites adequadas para o estudo e respectivas datas de dados *in situ* estão discriminadas na Tabela 1. As características do sensor dos satélites LANDSAT-7/ETM+ e LANDSAT-8/OLI-TIRS encontram-se discriminadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 1. Datas de dados *in situ* e datas de imagens dos satélites LANDSAT-7/ETM+ e LANDSAT-8/OLI-TIRS, respectivamente.

Dados <i>in situ</i>	Imagens LANDSAT-7 ETM+	Imagens LANDSAT-8 OLI/TIRS
15/08/2012	21/08/2012	
20/10/2012	08/10/2012	
27/11/2012	27/12/2012	
02/02/2013	13/02/2013	
17/04/2013	18/04/2013	
08/06/2013	20/05/2013	
24/08/2013	24/08/2013	
17/10/2013		04/11/2013
03/12/2013		20/11/2013
10/02/2014		08/02/2014
05/04/2014	05/04/2014	
04/06/2014	08/06/2014	
18/08/2014		19/08/2014
20/10/2014		22/10/2014
27/12/2014		25/12/2014

Tabela 2. Características das bandas do satélite LANDSAT-7/ETM+, faixas espectrais e resolução espacial.

Banda	Comprimento de onda (μm)	Resolução Espacial (m)
1 - Azul	0,45 - 0,52	30
2 - Verde	0,52 - 0,60	30
3 - Vermelho	0,63 - 0,69	30
4 - Infravermelho Próximo	0,77 - 0,90	30
5 - Infravermelho Médio 1	1,55 - 1,75	30
6 - Termal	10,40 - 12,50	60
7 - Infravermelho Médio 2	2,08 - 2,35	30
8 - Pancromática	0,52 - 0,90	15

Fonte: USGS (2016)

Tabela 3. Características das bandas do satélite LANDSAT-8/OLI-TIRS, faixas espectrais e resolução espacial.

Banda	Comprimento de onda (μm)	Resolução Espacial (m)
1 - Costal	0,43 - 0,45	30
2 - Azul	0,45 - 0,51	30
3 - Verde	0,53 - 0,59	30
4 - Vermelho	0,64 - 0,67	30
5 - Infravermelho Próximo	0,85 - 0,88	30
6 - Infravermelho Médio 1	1,57 - 1,65	30
7 - Infravermelho Médio 2	2,11 - 2,29	30
8 - Pancromática	0,50 - 0,68	15
9 - Cirrus	1,36 - 1,38	30
10 - Termal 1	10,60 - 11,19	100
11 - Termal 2	11,50 - 12,51	100

Fonte: USGS (2016)

Dados climatológicos

Os dados climatológicos foram obtidos das séries temporais derivadas de imagens MODIS Series View, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os dados de temperaturas média ($^{\circ}\text{C}$) coletados foram utilizados para critério de comparação. A média mensal de temperatura e de precipitação coletada nas estações foi plotada em gráficos para critérios de comparação com as outras variáveis de interesse.

Processamento de imagens

Após a obtenção de imagens no catálogo do USGS adequadas para a realização do estudo, e utilizando como apoio tecnológico o software QGIS 2.14, realizou-se a caracterização do agroecossistema cafeeiro pela aplicação do sensoriamento remoto e geoprocessamento (Fig. 2).

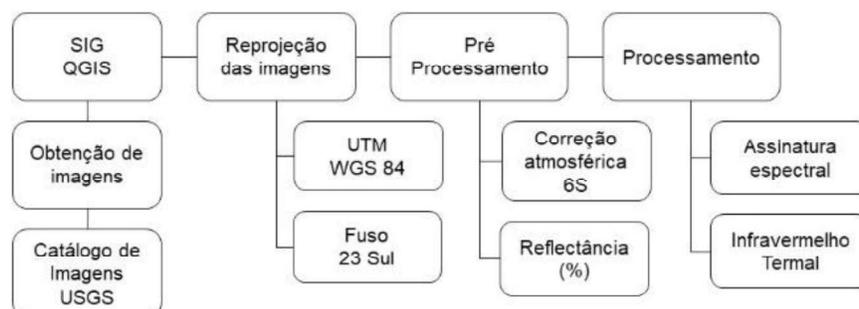


Figura 2. Fluxograma das etapas do processamento de imagens.

Por estarem sujeitas a condições atmosféricas como fumaça, nuvem, gases atmosféricos, etc., as imagens passaram por algumas etapas do processamento digital para melhorar o seu aspecto visual. Processar uma imagem consiste em transformá-la sucessivamente, com o objetivo de extrair mais facilmente a informação nela presente (Albuquerque; Albuquerque, 2000).

Entre as técnicas de processamento de imagens, destacam-se a correção radiométrica, geométrica e atmosférica. Tais processamentos são chamados de pré-processamento de dados de satélite (Liu, 2006). A função da etapa de pré-processamento é aprimorar a qualidade da imagem para as etapas posteriores (Marques Filho; Neto, 1999). Refere-se ao tratamento preliminar dos dados brutos com a finalidade de calibrar a radiometria da imagem, atenuar os efeitos da atmosfera, remover ruídos e corrigir suas distorções geométricas (Florenzano, 2011). A correção radiométrica é uma técnica utilizada para remover esses efeitos deletérios das imagens provenientes de sensores remotos, que podem conter ruídos ou erros que foram introduzidos pelo sistema sensor ou pelo ambiente (Tyagi; Bhosle, 2014).

Todos os rasters (imagens orbitais) e vetores (polígonos e pontos) das áreas de estudo foram reprojatados para as coordenadas Universal Transversa de Mercator/WGS 84 (World Geodetic System), fuso 23 Sul. Segundo Crósta (1992),

as imagens de satélites estão sujeitas a distorções geométricas, sendo necessário passar por um processamento prévio para correção dos dados. Isso facilita o uso da imagem e produtos derivados em sistemas de suporte à decisão espacial ou em sistema de informação geográfica (SIG) (Jensen, 2009).

As imagens obtidas pelo Higher-Level (Surface Reflectance) encontram-se disponíveis já com a interferência atmosférica corrigida pelo método Second Simulation of Sattelite Signal in the Solar Spectrum (6S), o qual é fundamentado no modelo de transferência radiativa (Vermote et al., 1997).

O resultado final da correção atmosférica é a denominada reflectância de superfície, sendo possível a caracterização espectral dos objetos presentes na superfície terrestre (Ponzoni et al, 2012).

Após as etapas de pré-processamento, as imagens foram recortadas utilizando os polígonos de cada área de interesse.

Assinatura espectral

Para simplificar a detecção da doença por meio de sensores espectrais, diferentes comprimentos de onda podem ser utilizados, uma vez que cada doença influencia a assinatura espectral de um modo característico (Mahlein et al., 2013).

Para a avaliação da reflectância das lavouras cafeeiras, foram utilizadas as bandas Azul (Blue), Verde (Green) e Vermelho (Red) do espectro visível e as bandas Infravermelho Próximo (NIR), Infravermelho Médio 1 (SWIR-1) e Infravermelho Médio 2 (SWIR-2) do espectro infravermelho.

A partir dos pontos de interesse, com o auxílio do QGIS 2.14, foram obtidos os valores de cada banda e confeccionados gráficos com os valores médios de refletância espectral referentes aos pontos amostrados.

Infravermelho termal

As bandas referentes ao infravermelho termal do Landsat-7 e Landsat-8 passaram por uma conversão de valores de temperatura de Kelvin para Celsius, utilizando o QGIS 2.14.

Os valores das temperaturas de cada ponto amostral foram extraídos utilizando a malha de pontos relativa a cada área de interesse. A partir dos valores obtidos, foram elaborados os gráficos de valores médios de temperatura (°C).

Análises estatísticas

Realizou-se a correlação de Pearson entre as reflectâncias das bandas azul, verde, vermelho, infravermelho próximo, infravermelho médio-1 e infravermelho médio-2 das imagens Landsat-7 e Landsat-8, com os valores de incidência da ferrugem e enfolhamento de cada ponto georreferenciado de cada área cafeeira sob sistema de irrigação por autopropelido, gotejamento, pivô central e sistema em sequeiro.

Para realizar a análise de correlação, utilizou-se o procedimento correlações de bivariável do programa estatístico IBM SPSS STATISTICS.

Resultados e discussão

Caracterização espacial

Incidência da ferrugem do cafeeiro

No sistema de irrigação por autopropelido, a doença apresentou incidência baixa (entre 1,6 e 16,6%) (Fig. 3) em praticamente todos os meses avaliados, havendo um leve aumento (entre 16,6 e 33,3) em pontos isolados (Fig. 3G e 3I) e áreas com incidência nula (Fig. 3B e 3K).

No sistema de irrigação por gotejamento, a doença apresentou valores nulos, e quando houve valores baixos de incidência, foi constatado um maior progresso da doença, em agosto de 2012 (Fig. 4A) e de abril a agosto (Fig. 4E, 4F

e 4G). Em junho de 2013 (Fig. 4F), foi registrado o maior valor de incidência média de ferrugem (1,41%) entre todas as datas estudadas. Esse comportamento possivelmente pode ser devido ao fato de não haver molhamento foliar, ocasionando de baixa incidência a nula incidência quando comparado aos outros sistemas de irrigação.

O sistema de irrigação por pivô indicou a maior variação no progresso da doença, apresentando incidência de moderada a alta nos meses próximos à colheita, em agosto de 2013 (Fig. 5G), junho e agosto de 2014 (Fig. 5L e 5M), e meses com incidência nula, quase sempre em outubro de 2012 (Fig. 5B) e abril de 2014 (Fig. 5K). Esse comportamento pode ser devido ao constante molhamento foliar do pivô central, o que ocasiona alta incidência em comparação aos outros sistemas de irrigação.

Já no sistema sob sequeiro, somente dois meses avaliados se destacaram, por apresentar incidência moderada de ferrugem, em junho de 2013 (11,18%) (Fig. 6F), e incidência alta, em agosto de 2013 (33,76%) (Fig. 6G), sendo a maior apresentada nos meses estudados. Como pode ser observado, após a recepa houve redução da área de contato do patógeno, porém notou-se apenas um ponto de baixa incidência da doença em dezembro de 2013 (0,03%) (Fig. 6I).

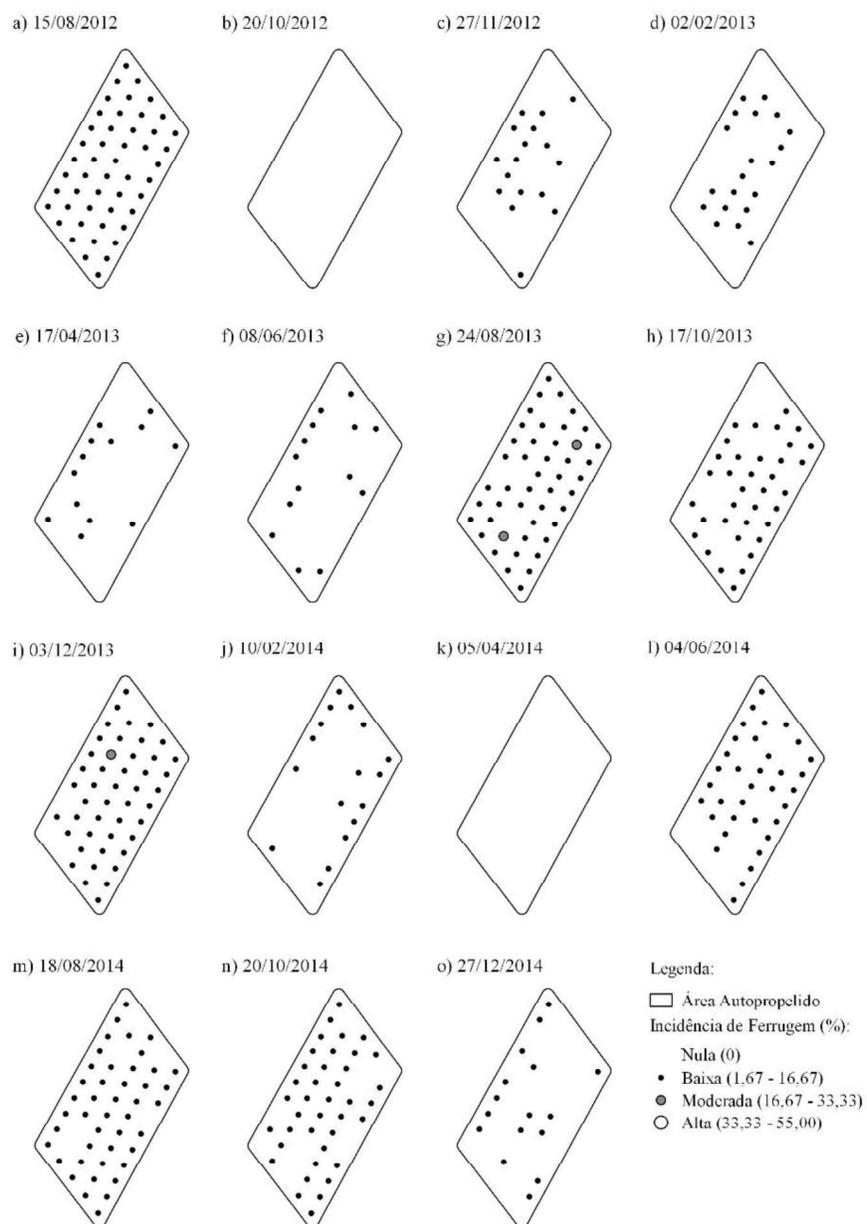


Figura 3. Mapas de distribuição espacial da incidência (%) de ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) em área cultivada com cafeeiro Acaia 474/19 (*Coffea arabica* L.) sob sistema de irrigação por autopropelido em Carmo do Rio Claro, MG.

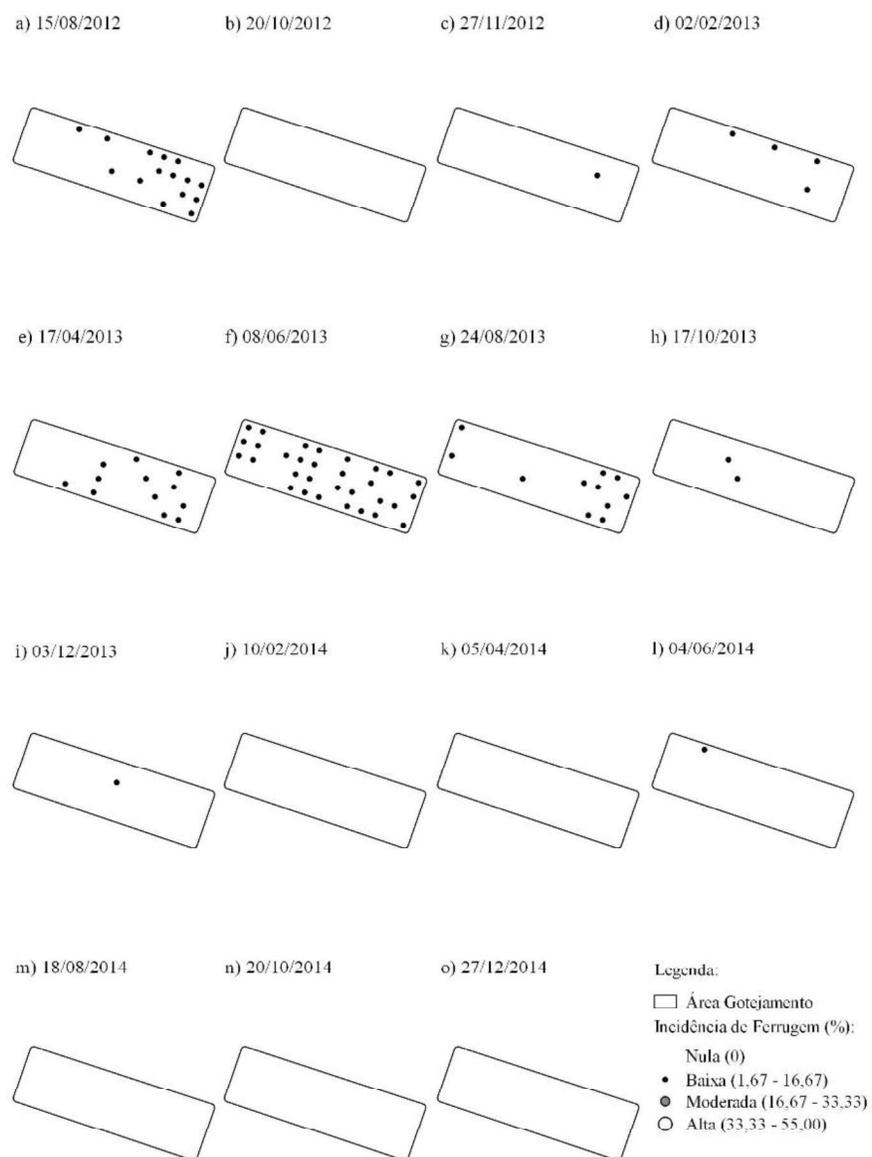


Figura 4. Mapas de distribuição espacial da incidência (%) de ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) em área cultivada com cafeeiro Acaia 474/19 (*Coffea arabica* L.) sob sistema de irrigação por gotejamento em Carmo do Rio Claro, MG.

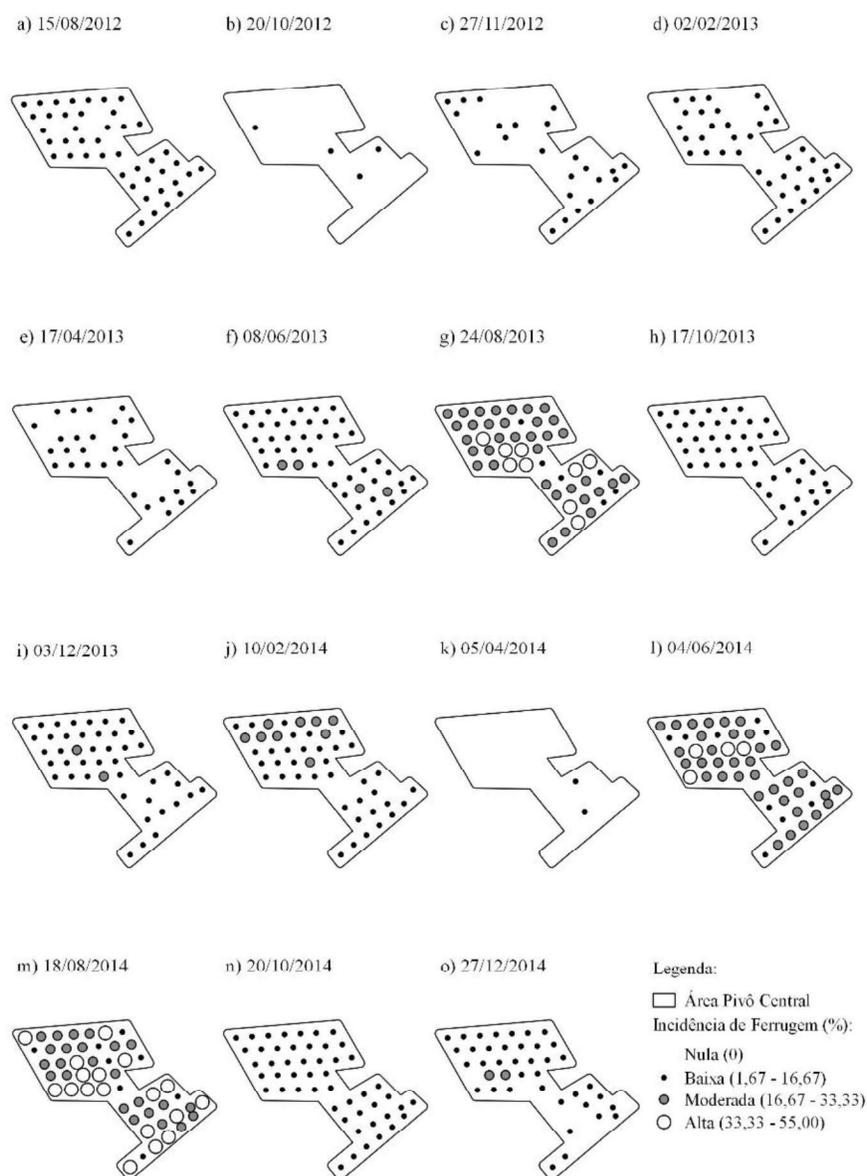


Figura 5. Mapas de distribuição espacial da incidência (%) de ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) em área cultivada com cafeeiro Acaíá 474/19 (*Coffea arabica* L.) sob sistema de irrigação por pivô central em Carmo do Rio Claro, MG.

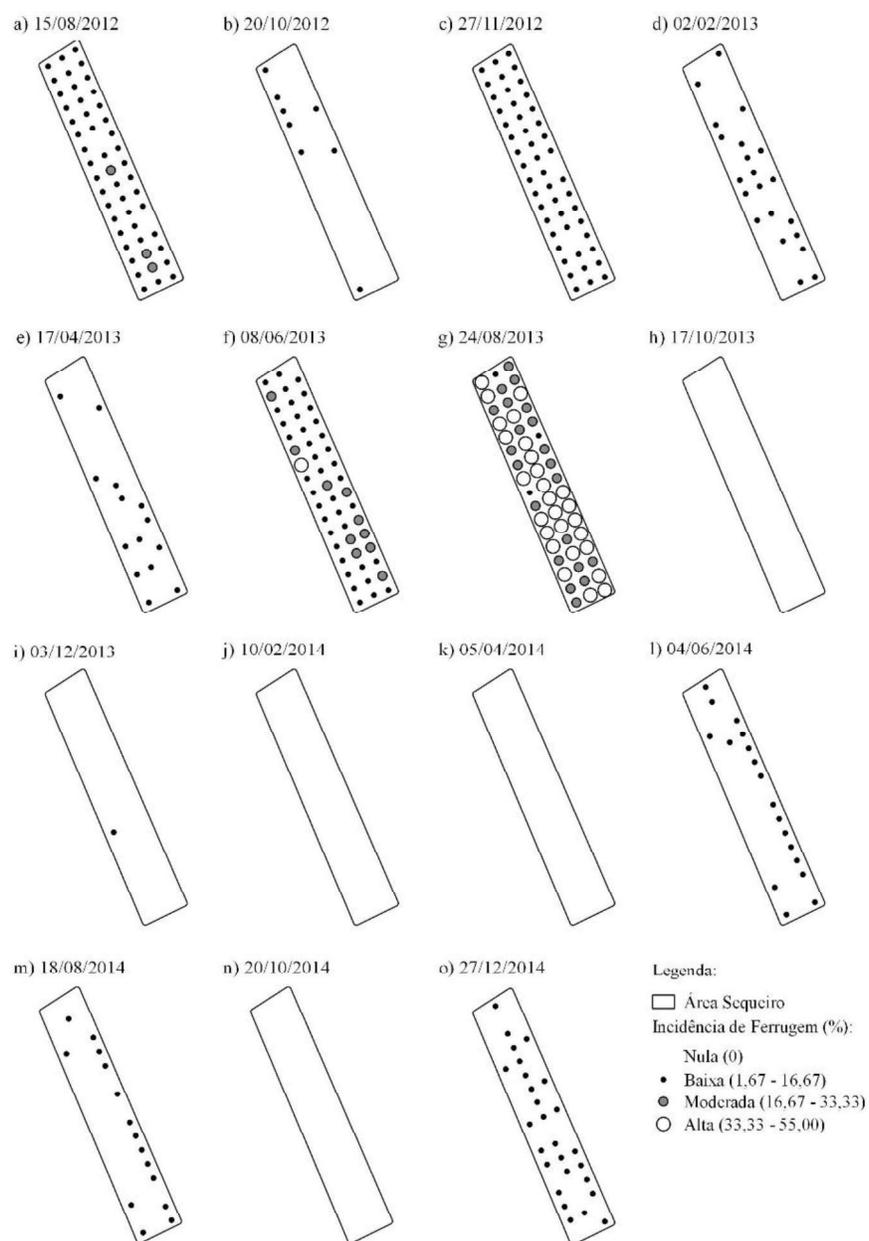


Figura 6. Mapas de distribuição espacial da incidência (%) de ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) em área cultivada com cafeeiro Acaiá 474/19 (*Coffea arabica* L.) sob sistema de sequeiro em Carmo do Rio Claro, MG.

A maior incidência média de ferrugem variou entre os meses de junho e agosto, enquanto a maior incidência foi entre os meses de maio e junho, variando de agosto a setembro (Custódio et al., 2010; Garçon et al., 2004; Talamini et al., 2003), como observado também em outros trabalhos.

Em áreas irrigadas por gotejamento Talamini et al (2003), também foram observadas maiores incidências de ferrugem do cafeeiro entre julho e setembro. Após esse período, a taxa de progresso tornou-se negativa, independentemente do tratamento.

Vale ressaltar que, embora a irrigação não seja o único fator que determinará o aumento da incidência de ferrugem do cafeeiro, ela influenciará o microclima da lavoura, interagindo com o tipo de solo, quantidade de nutrientes, fatores relacionados ao manejo da cultura, variedade plantada, porte, espaçamento, entre outros (Ribeiro do Vale; Zambolim, 1997). Além disso, a irrigação pode conferir maior resistência em razão do aumento de vigor da planta (Campbell; Madden, 1990), ou ainda proporcionar o favorecimento de epidemias (Rotem; Palti, 1969).

Enfolhamento

Na área cultivada sob sistema de irrigação por autopropelido, a porcentagem de enfolhamento variou entre 40 e 70% em agosto e outubro de 2013 (Figura 7G e 7H) e junho de 2014 (Figura 7L).

Já na área cultivada sob sistema de irrigação por gotejamento, essa porcentagem mostrou-se menor em agosto e dezembro de 2013 (68,60 e 69,48%) (Fig. 8G e 8I) e junho de 2014 (43,73%) (Fig. 8K e 8L). O mês que apresentou maior enfolhamento foi fevereiro de 2014 (92,62%) (Fig. 8J).

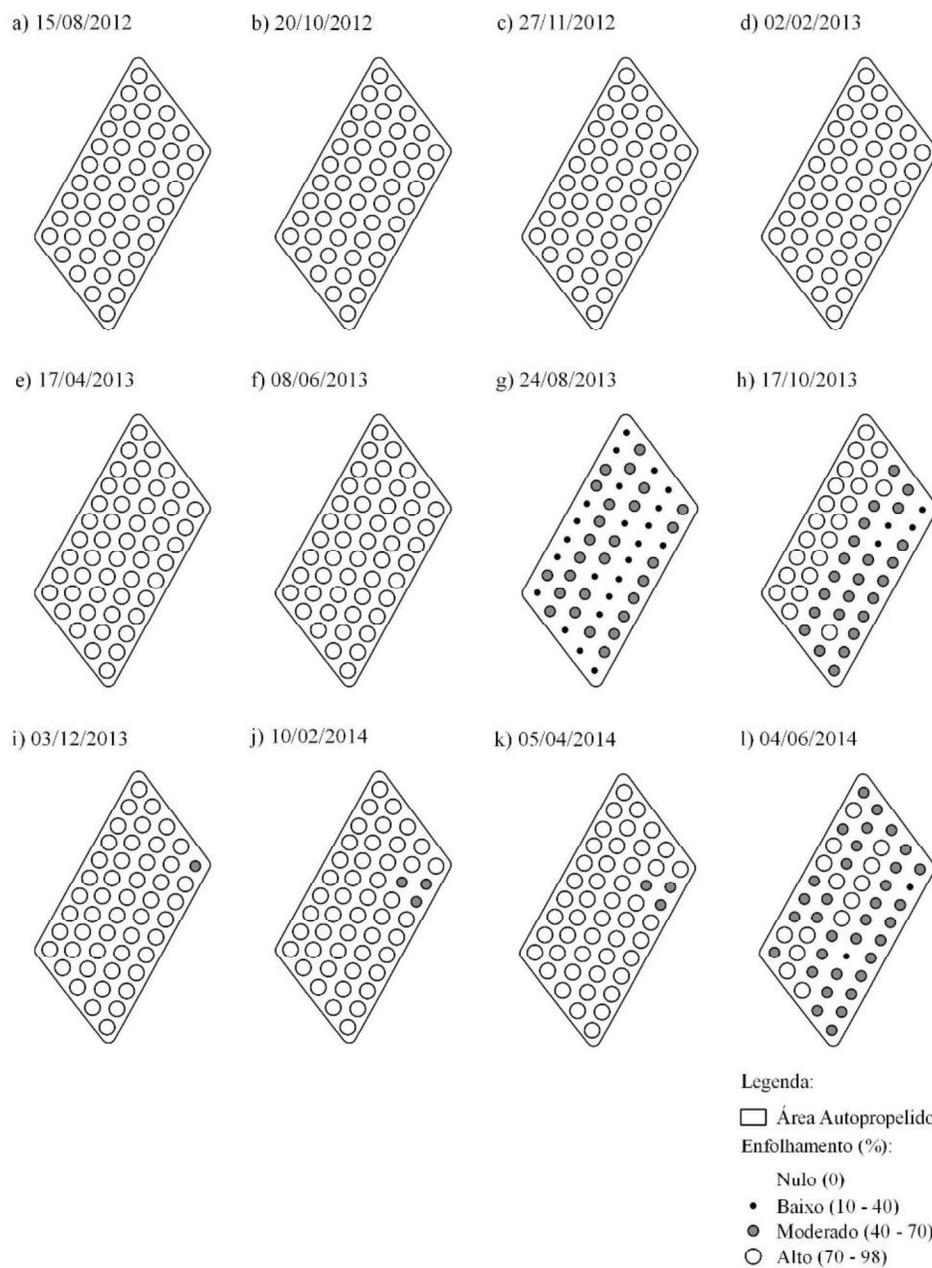


Figura 7. Mapas de distribuição espacial do enfolhamento (%) de plantas de cafeeiro Acaiaí 474/19 (*Coffea arabica* L.) em área cultivada sob sistema de irrigação por autopropelido em Carmo do Rio Claro, MG.

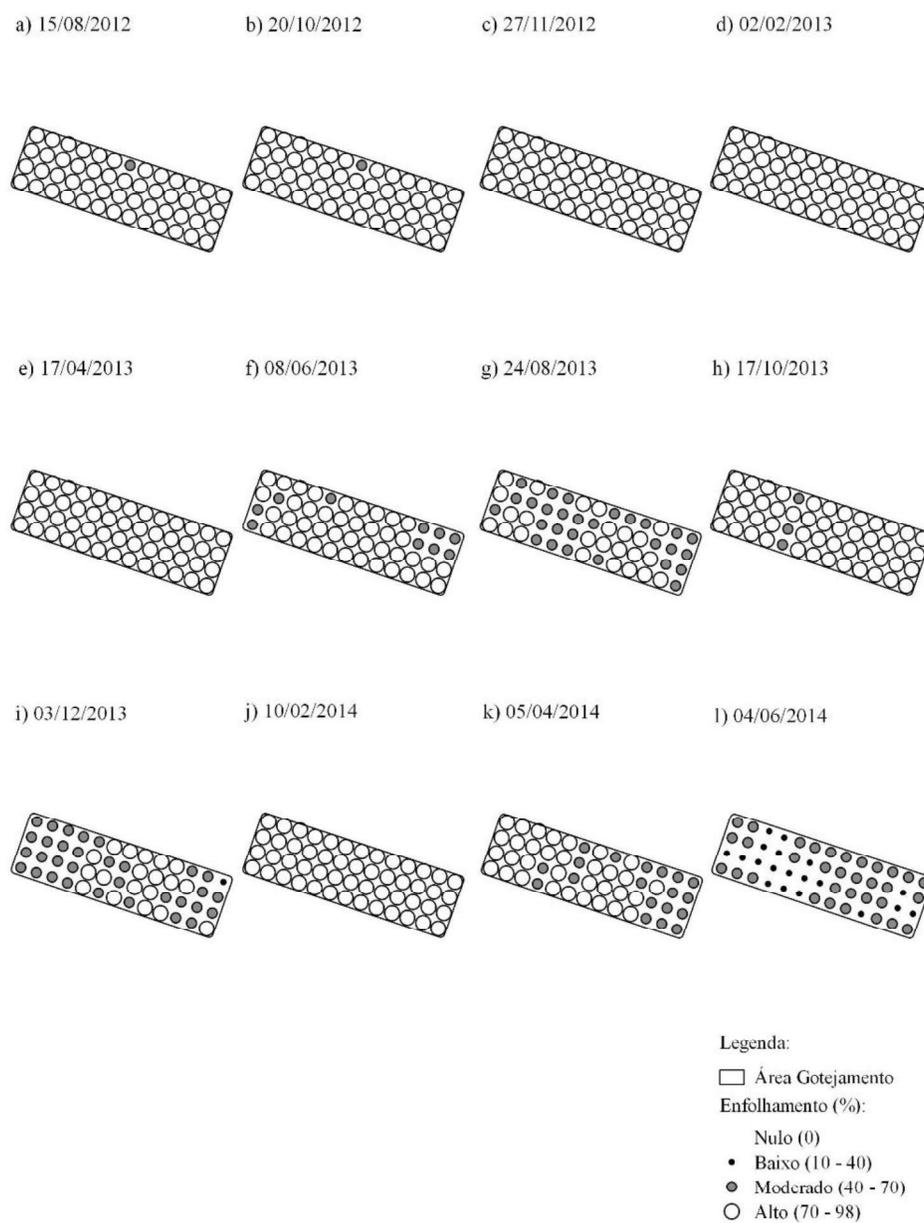


Figura 8. Mapas de distribuição espacial do enfolhamento (%) de plantas de cafeeiro Acaiá 474/19 (*Coffea arabica* L.) em área cultivada sob sistema de irrigação por gotejamento em Carmo do Rio Claro, MG.

No pivô central, a porcentagem de enfolhamento foi menor em agosto, outubro e dezembro de 2013 (Fig. 9G, 9H e 9I) e junho de 2014 (Fig. 9L).

Na área cultivada sob sequeiro, por sua vez, a porcentagem mostrou-se alta em novembro de 2012 (79,14%) e fevereiro e abril de 2013 (ambos com 84,59%) (Fig. 10C, 10D e 10E). Nos meses de outubro e dezembro de 2013 (Fig. 10H e 10I), o enfolhamento foi nulo devido à recepa. Em fevereiro e abril de 2014 (10%) (Fig. 10L), houve um baixo enfolhamento, quando se observou o reaparecimento de folhas na parte aérea da planta.

Os menores valores encontrados para enfolhamento médio variou entre os meses de junho e agosto, como já foi observado em outros trabalhos tratando sobre a perda associada à doença, que pode atingir até 50%. A principal injúria causada às plantas é a perda de folhas, responsável por reduzir sua área fotossintética, com consequente morte dos ramos plagiotrópicos e reflexos nas safras posteriores (Gree, 1993; Pozza et al., 2010).

Em outras culturas, como arroz (*Oryza sativa*) (Bastiaans et al., 1993), feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) (Bassanezi et al., 2001), uvas (*Vitis vinifera*) (Moriondo et al., 2005), trigo (*Triticum aestivum*) (Bethenod et al., 2001; Robert et al., 2006), cana-de-açúcar (*Saccharum* ssp. Hybrids) (Zhao et al., 2011), foi demonstrado que infecções fúngicas podem reduzir a produtividade das culturas, diminuindo a eficiência fotossintética da área remanescente de folhas verdes. A área foliar é um parâmetro indicativo de produtividade, pois é importante para a realização do processo fotossintético, que depende da taxa fotossintética por unidade de área foliar e da interceptação da radiação solar. Esses fatores são influenciados pelas características da arquitetura da copa e da dimensão do sistema fotoassimilador (Favarin et al., 2002).

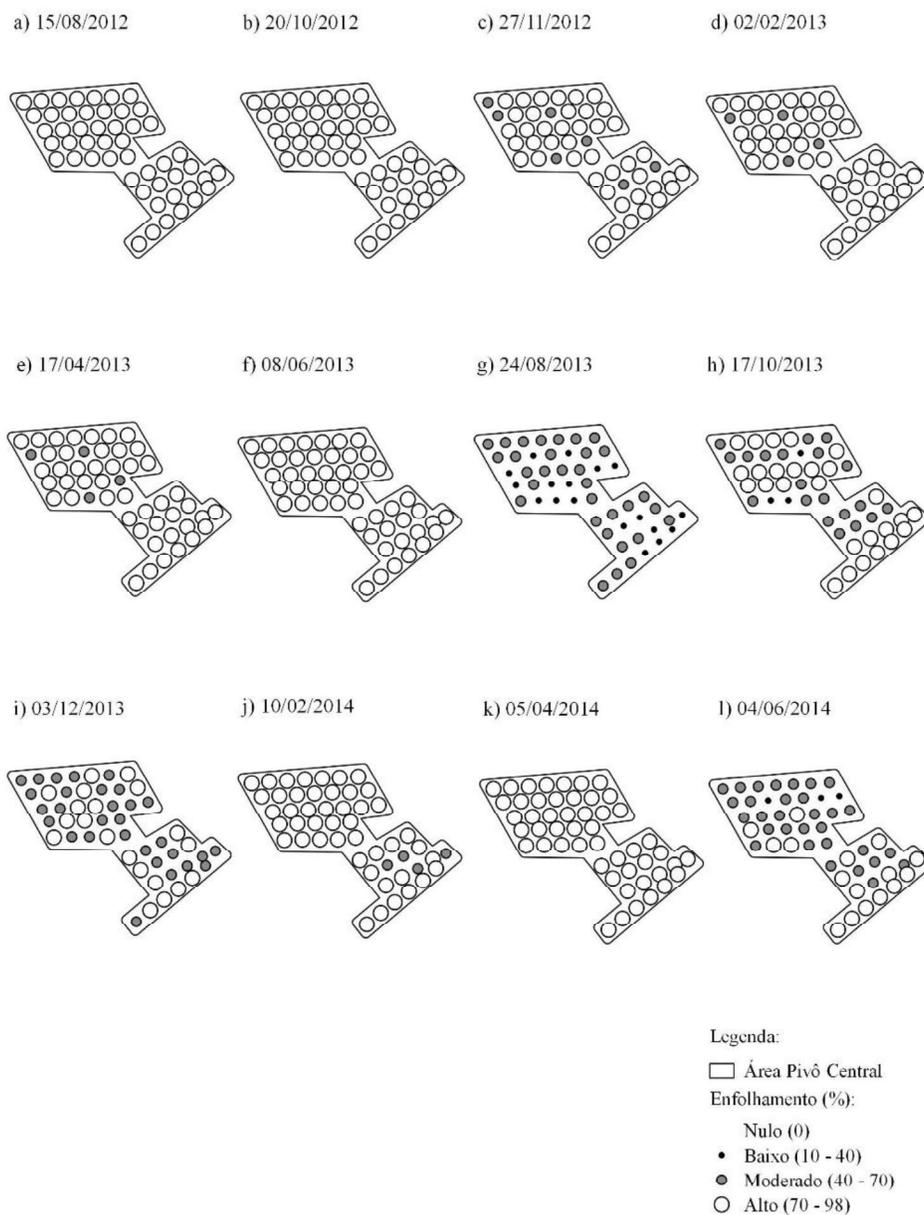


Figura 9. Mapas de distribuição espacial do enfollamento (%) de plantas de cafeeiro Acaiá 474/19 (*Coffea arabica* L.) em área cultivada sob sistema de irrigação por pivô central em Carmo do Rio Claro, MG.

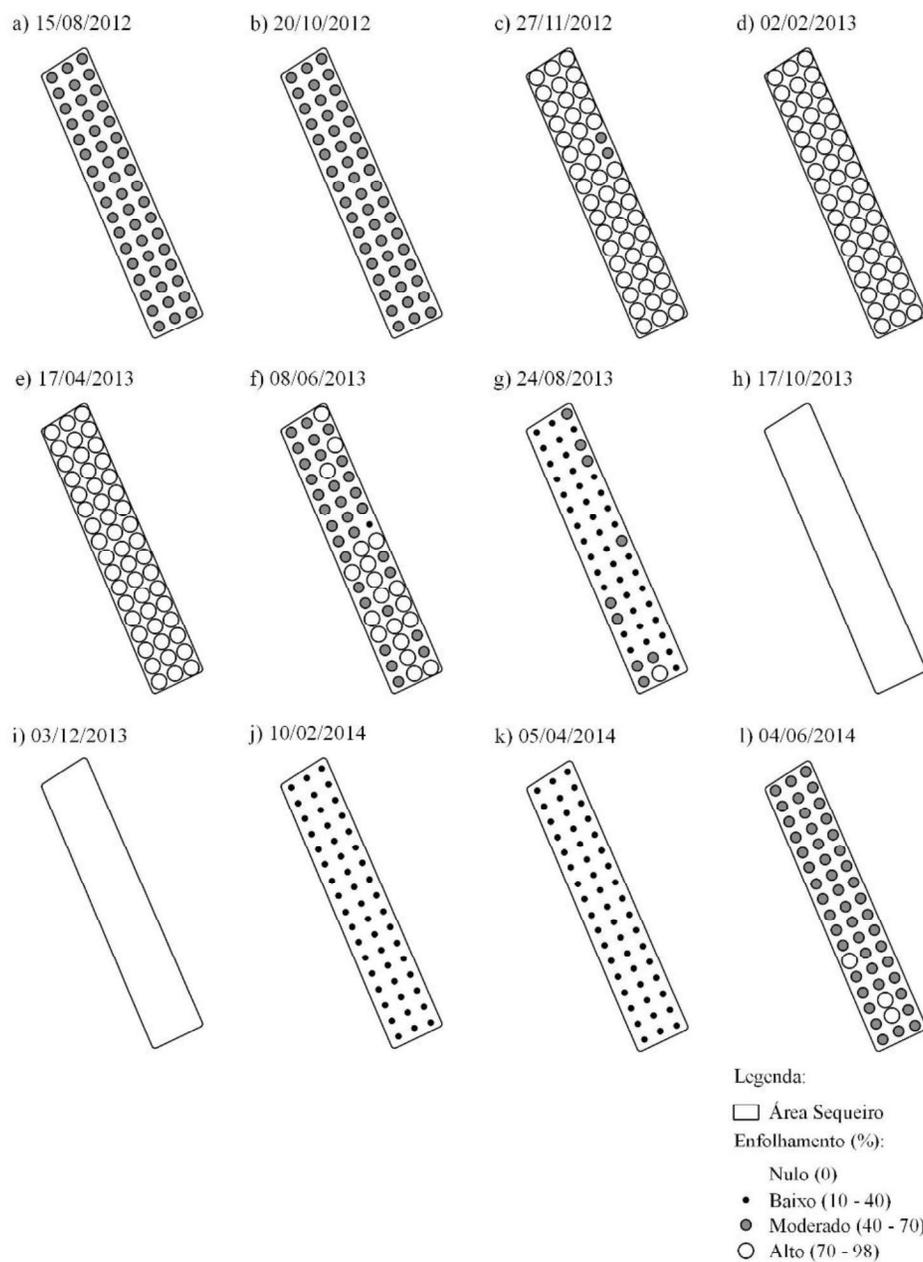


Figura 10. Mapas de distribuição espacial do enfolhamento (%) de plantas de cafeeiro Acaiá 474/19 (*Coffea arabica* L.) em área cultivada sob sistema de sequeiro em Carmo do Rio Claro, MG.

Outro fator importante que causa inibição estomática da fotossíntese é o estresse hídrico, que pode causar o fechamento não uniforme dos estômatos, podendo interferir na capacidade fotossintética da planta (Bunce, 1988; Downton et al., 1988; Zhao et al., 2010). Uma capacidade reduzida para a realização da fotossíntese provavelmente diminuirá a eficiência com a qual a radiação interceptada é usada pela planta (Lopes; Berger, 2001).

Caracterização temporal

Incidência de ferrugem e enfolhamento

O vigor vegetativo da planta está diretamente associado ao enfolhamento, que permite monitorar o desenvolvimento da vegetação e a incidência de doenças. Neste trabalho, observou-se a redução do enfolhamento médio (Fig. 11) quando a incidência de ferrugem (Fig. 11) aumentou no mês de agosto de 2013, sendo o período mais crítico encontrado em todas as áreas.

Assim como foi observado na Figura 11, outros autores que trataram sobre o controle da ferrugem do cafeeiro e os efeitos da doença na produtividade e no enfolhamento constataram uma maior incidência entre julho e agosto de 2001 e entre maio e agosto de 2002, enquanto houve redução da incidência da ferrugem no segundo ano, devido à menor produção e ao maior enfolhamento (Cunha; Mendes; Chalfoun, 2004). Isso difere do que foi encontrado no presente trabalho na área de pivô central e sequeiro, em que houve o aumento de enfolhamento juntamente com o aumento de incidência de ferrugem.

O progresso temporal apresentou variação tanto na incidência de ferrugem quanto no enfolhamento (Fig. 11), como pode ser observado durante o período de avaliação em todas as áreas de estudo, em relação às condições ambientais de temperatura (Fig. 12), irrigação, espaçamento, microclima, entre outros fatores.

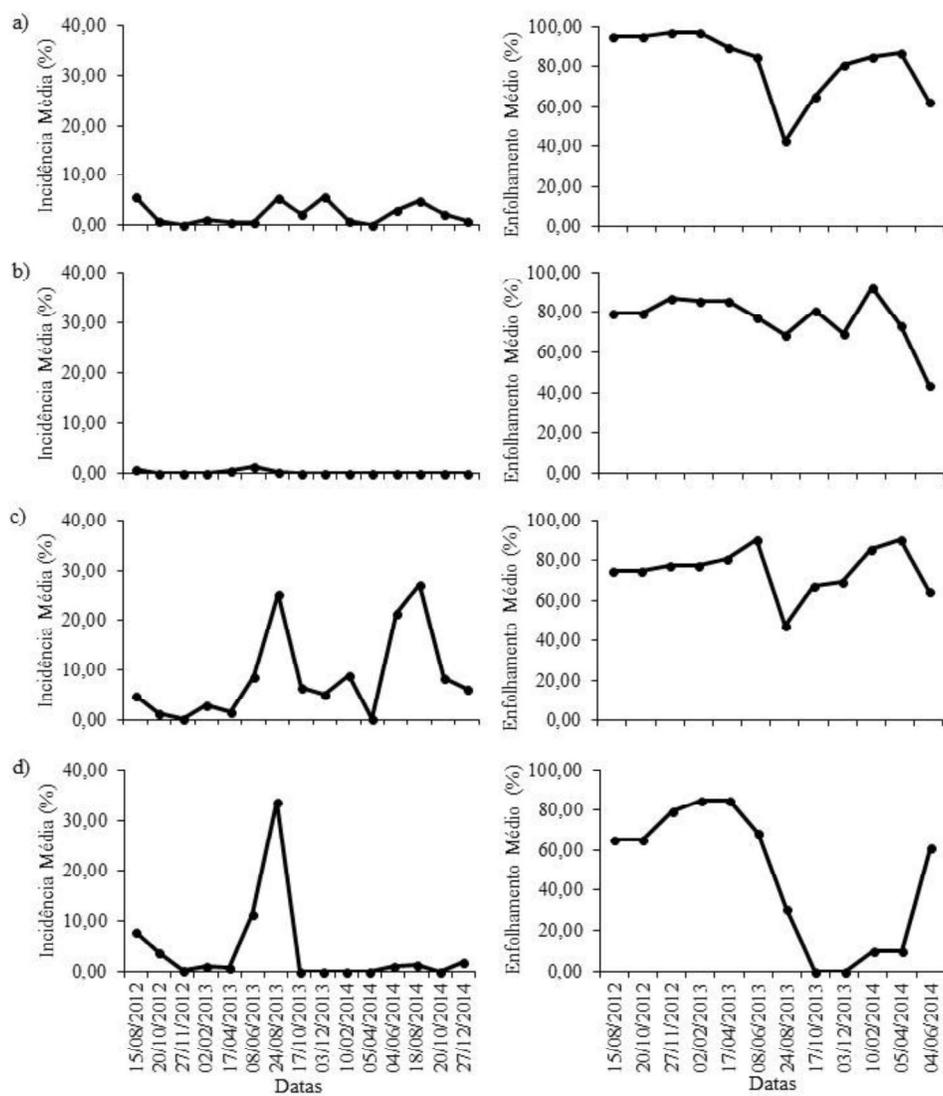


Figura 11. Progresso temporal da incidência média (%) de ferrugem e enfolvimento médio (%) de áreas cultivadas sob sistema de irrigação por autopropelido (a), gotejamento (b), pivô central (c) e sistema de sequeiro (d).

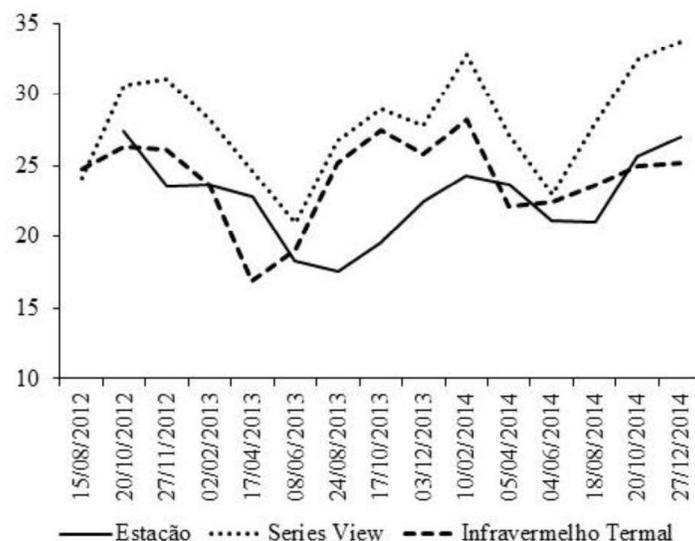


Figura 12. Comparação entre temperatura média (°C) de áreas cafeeiras utilizando dados da estação meteorológica microclimatológica (Campbell Scientific®), Series View – MODIS (INPE) e Infravermelho Termal – Landsat 7 e 8.

Fatores como carga pendente da lavoura, plantios adensados, temperatura entre 21 e 25 °C, sombreamento, desequilíbrio nutricional, déficit hídrico, umidade relativa elevada, luminosidade baixa e maior período de molhamento foliar favorecem a ocorrência e o progresso da doença (Carvalho; Chalfoun, 1998, 1999; Pozza et al., 2010; Ward, 1882).

A presença de fatores de estresse altera as propriedades térmicas das plantas, o que por sua vez influencia a radiação emitida no domínio infravermelho termal do espectro, produzida principalmente por mudanças no teor de água das folhas (Mottram et al., 1983; Pinter et al., 1979), e isso também pode ser detectado no estágio inicial da doença (Chaerle et al., 1999; Costa et al., 2013; Omasa, 1990).

Caracterização espectral

Assinatura espectral

Na análise da assinatura espectral, foi possível associar a reflectância na banda do verde com a vegetação saudável; a banda do azul com o quanto a planta absorve de radiação enquanto faz fotossíntese e com a quantidade e composição de clorofila e componentes foliares; e a banda do vermelho com a reflectância das folhas senescentes (Fig. 13). Em plantas saudáveis, na região do visível, as quantidades de azul e vermelho do espectro são mais absorvidas pelos pigmentos clorofilados, enquanto a quantidade de verde é mais refletida.

A vegetação saudável foi comprovada pela correlação negativa entre ferrugem e banda NIR no sistema por autopropelido (Tab. 4) e sistema por pivô central (Tab. 4), e pela correlação positiva entre enfolhamento e banda verde no sistema por gotejamento (Tab. 5). Houve correlação positiva entre enfolhamento e banda SWIR-1 e enfolhamento e banda SWIR-2 no sistema por gotejamento (Tab. 5), comprovando boa absorção de radiação pela planta na presença de água na região do infravermelho médio (Liu, 2006).

Na banda do azul, a quantidade de radiação que a planta absorve para realizar fotossíntese foi comprovada pela correlação positiva entre enfolhamento e banda azul no sistema de gotejamento (Tab. 5). Na banda do vermelho, a reflectância das folhas senescentes foi comprovada pela correlação positiva entre enfolhamento e banda do vermelho no sistema de gotejamento e negativa no sistema de sequeiro (Tab. 5).

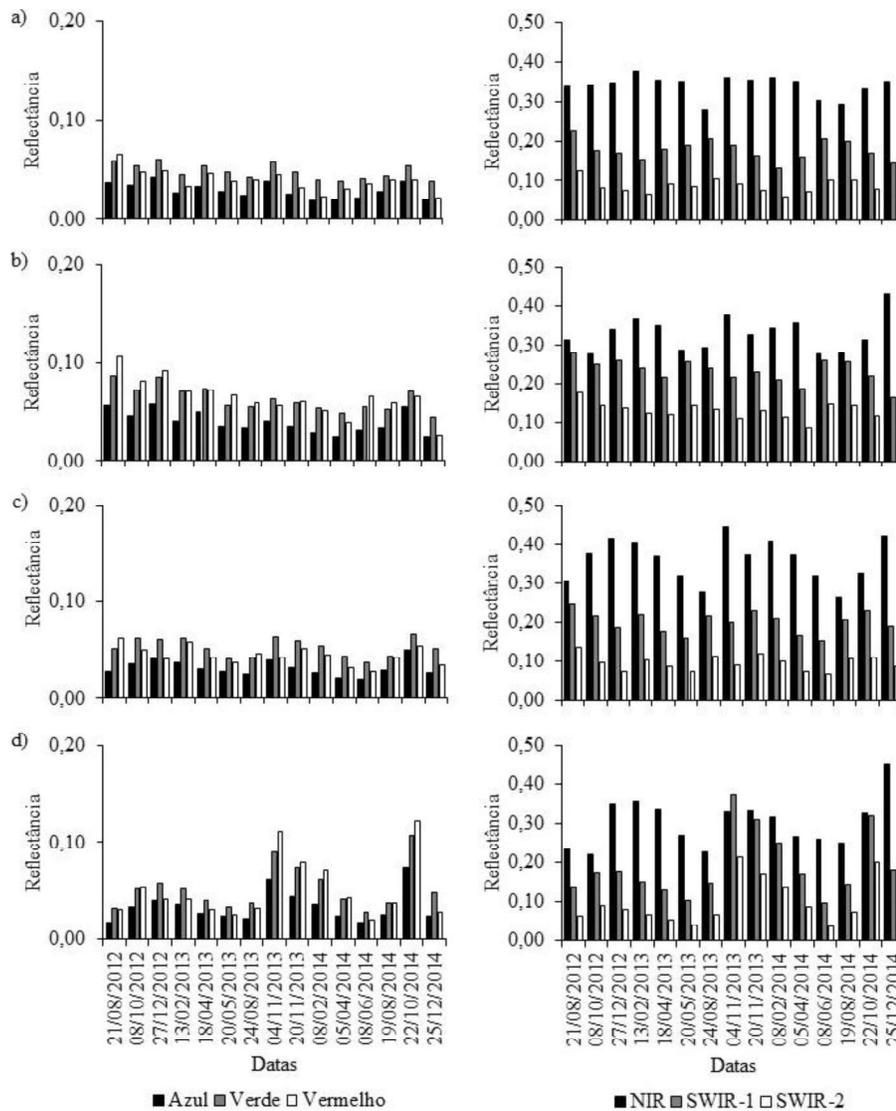


Figura 13. Reflectância média dos comprimentos de onda do visível azul (0,45-0,52 μm), verde (0,52-0,60 μm) e vermelho (0,63-0,69 μm) (esquerda) e do infravermelho próximo (NIR) (0,77-0,90 μm), infravermelho médio-1 (SWIR-1) (1,55-1,75 μm) e infravermelho médio-2 (SWIR-2) (2,08-2,35 μm) (direita) de áreas cultivadas sob sistema de irrigação por autopropelido (a), gotejamento (b), pivô central (c) e sistema de sequeiro (d).

Tabela 4. Correlação de Pearson ao nível de 5% entre as reflectâncias médias das bandas azul, verde, vermelho, infravermelho próximo (NIR), infravermelho médio-1 (SWIR-1) e infravermelho médio-2 (SWIR-2) das imagens Landsat-7/ETM+ e Landsat-8/OLI-TIRS, com os dados de incidência média de ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) para cada área cafeeira sob sistema de irrigação por autopropelido, gotejamento, pivô central e sistema de sequeiro.

Área	Azul	Verde	Vermelho	NIR	SWIR-1	SWIR-2
Autopropelido				-0,617*		
Gotejamento						
Pivô Central				-0,559*		
Sequeiro						

* Correlação significativa $p \leq 5\%$.

Tabela 5. Correlação de Pearson ao nível de 5% entre as reflectâncias das bandas azul, verde, vermelho, infravermelho próximo (NIR), infravermelho médio-1 (SWIR-1) e infravermelho médio-2 (SWIR-2) das imagens Landsat-7/ETM+ e Landsat-8/OLI-TIRS, com os dados de enfolhamento médio para cada área cafeeira sob sistema de irrigação por autopropelido, gotejamento, pivô central e sistema de sequeiro.

Área	Azul	Verde	Vermelho	NIR	SWIR-1	SWIR-2
Autopropelido						
Gotejamento	0,613*	0,624*	0,691*		0,656*	0,595*
Pivô Central						
Sequeiro				-0,707*		

* Correlação significativa $p \leq 5\%$.

Na região do visível, a banda azul está associada aos menores valores de reflectância, como observado por Chemura et al. (2016) ao avaliar os níveis de infecção de ferrugem do cafeeiro em plantas instaladas em casas de vegetação utilizando resolução espectral do Sentinel-2. Notou-se reflectância baixa, como indicação de plantas estressadas, associada a um declínio na quantidade e composição de clorofila foliar, o que pode ser usado como um princípio inicial indicador de infecção e posterior estresse.

Como foi mostrado anteriormente, os maiores valores de incidência média da ferrugem foram em 24/08/2013 e 18/08/2014 em todas as áreas estudadas (Fig. 3, 4, 5 e 6), independentemente do sistema de irrigação, observando também menor reflectância do NIR nessas datas (Fig. 13). Houve ainda correlação

negativa entre o infravermelho próximo e a ferrugem, sendo que, com o aumento da incidência de ferrugem no cafeeiro, houve redução na reflectância do NIR (Tab. 4 e 5).

Chemura et al (2016) também observaram que, como esperado em vegetação, a reflectância nas folhas de café estava mais elevada na região do infravermelho próximo quando comparado com a região do visível. Assim como folhas saudáveis apresentaram alta reflectância na banda do verde, plantas severamente infectadas por ferrugem apresentaram menor reflectância na região do infravermelho próximo.

Boechat et al. (2014), estudando o mofo-branco (*Sclerotinia sclerotiorum*) no feijoeiro, também observaram uma resposta espectral típica de vegetação, na faixa do visível, apresentando picos no comprimento de onda do verde e valores maiores de reflectância na faixa do infravermelho próximo.

Reis et al. (2006), observando a ferrugem da folha do trigo causada por *Puccinia triticina*, com o uso das leituras de reflectância da radiação solar realizadas por um radiômetro de múltiplo espectro portátil CropScan, modelo MSR87, notaram que 88% da redução do rendimento do trigo pode ser explicada pela diminuição da reflectância da radiação solar, na faixa do infravermelho próximo, causada pela infecção provocada pela doença. Quanto maior for a severidade da doença, maior será a reflectância da radiação solar nos comprimentos de onda do visível e menor será no comprimento do infravermelho próximo.

Na região do infravermelho próximo, a vegetação refletiu grande quantidade de energia. A energia refletida foi bem correlacionada com a quantidade de biomassa produzida pelas plantas. Esta correlação é observada porque o principal fator que controla a reflectância no infravermelho próximo são os espaços intercelulares presentes na camada mesófila. A vegetação verde e sadia reflete na região do infravermelho próximo de 45 a 50% da energia que chega. O

restante da energia (outros 45 a 50%) é praticamente transmitido para as camadas inferiores ou adjacentes do dossel (Jensen, 2009).

Na região do infravermelho médio (SWIR-1 e SWIR-2), a vegetação verde apresentou baixa reflectância de energia quando comparada ao infravermelho próximo em todas as áreas irrigadas, exceto na área de sequeiro, na qual houve um aumento significativo nos meses de novembro de 2013 e outubro de 2014, possivelmente pela ocorrência de veranico nesse período chuvoso (Fig. 14), diferente das áreas irrigadas, que recebem água constantemente e não apresentam tal comportamento. Este intervalo do infravermelho médio apresenta sensibilidade ao conteúdo de água presente na planta (Ponzzoni, 2012; Jensen, 2009). Dessa forma, ocorre um aumento da reflectância do infravermelho médio quando o conteúdo de água na planta diminui (Novo, 2008).

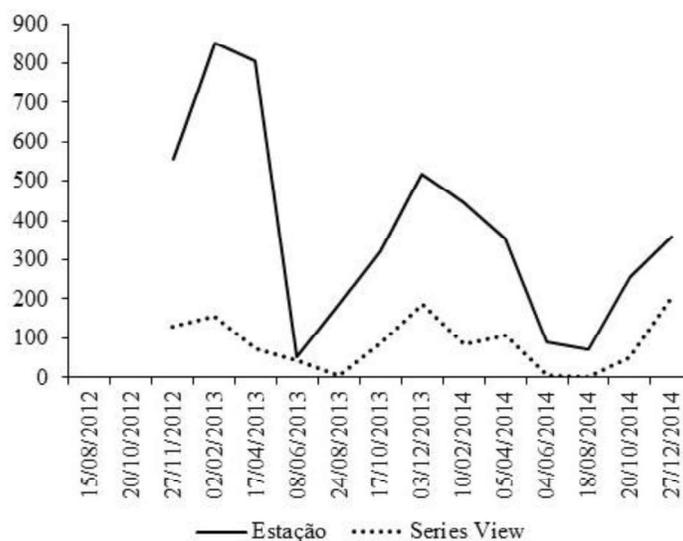


Figura 14. Comparação entre precipitação média (mm) de áreas cafeeiras utilizando dados da estação meteorológica microclimatológica (Campbell Scientific®) e Series View - MODIS (INPE).

Com base em estudos, a região do infravermelho médio foi correlacionada com estresse de água em dosséis de florestas coníferas (Pierce et al., 1990) e

possível perda de água pela folha de bananeira devido à ação do fungo *Mycosphaerella fijiensis*, quando valores de reflectância foram maiores para a região em que o índice de infecção era alto (Rodriguez-Gaviria; Cayón, 2008). Em decorrência da doença, a estrutura interna da folha sofre alteração e pode ter o tecido fotossintético reduzido, bem como alterar a resposta espectral da folha em diferentes regiões do espectro.

Segundo Naue et al. (2010), fatores como a sanidade do tecido vegetal, após a infecção por fitopatógenos, interferem na qualidade e na quantidade de radiação refletida das plantas e reagem alterando sua característica espectral, o que permite a detecção de doenças por meio de sensoriamento remoto.

Conclusão

O presente estudo, ao analisar o progresso da ferrugem do cafeeiro em diferentes sistemas de irrigação, apresentou aspectos da relação entre a doença em questão e a reflectância, ainda não estudados anteriormente.

Em todas as áreas estudadas, independentemente do sistema de irrigação, observou-se menor reflectância do NIR no mês de agosto, correspondendo com os valores de maior incidência de ferrugem do cafeeiro.

As lavouras cafeeiras irrigadas apresentaram menores valores de reflectância na região do SWIR-1 e SWIR-2, enquanto a área cultivada em sequeiro apresentou valores maiores quando houve ocorrência de veranico em período chuvoso, comportamento diferente das lavouras que recebem irrigação constante.

Agradecimento

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de estudo que possibilitaram este trabalho.

Referências

- Agrios, G.N. 2005. Plant Pathology. 5. Ed. London: Elsevier Academic Press. 922p.
- Albuquerque, M.P., Albuquerque, M.P. 2000. Processamento de imagens: métodos e análises. Rio de Janeiro – Brasil. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas MCT, 1-12.
- Bassanezi, R.B., Amorim, L., Bergamin Filho, A., Hau, B., and Berger, R.D. 2001. Accounting for photosynthetic efficiency of bean leaves with rust, angular leaf spot and anthracnose to assess crop damage. *Plant Pathology*. 50, 443-452.
- Bastiaans, L., and Roumen, E.C. 1993. Effect on leaf photosynthetic rate by leaf blast for rice cultivars with different types and levels of resistance. *Euphytica*. 66, 81-87.
- Bethenod, O., Huber, L., Slimi, H. 2001. Photosynthetic response of wheat to stress induced by *Puccinia 60tualizad* and post-infection drought. *Photosynthetica*. 39, 581-590.
- Boechat, L.T. Pinto, F.A.C., Paula Jr., T.J., Queiroz, D.M., Teixeira, H. 2014. Detecção do mofo-branco no feijoeiro, utilizando características espectrais. *Revista Ceres*. 61(6), 907-915.
- Boldini, J.M. 2001. Epidemiologia da ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro irrigado e fertirrigado. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 67 p.
- Bravo, C., Moushou, D., West, J., McCartney, A., Ramon, H. 2003. Early disease detection in wheat fields using spectral reflectance. *Biosystems Engineering*. 84, 137-145.
- Bunce, J.A. 1988. Nonstomatal inhibition of photosynthesis by water stress. Reduction in photosynthesis at high transpiration rate without stomatal closure in field grown tomato. *Photosynthesis Research*. 18, 357-362.
- Campbell, C.L.; Madden, L.V. 1990. Introduction to plant disease epidemiology. New York: John Wiley. 532 p.
- Carvalho, V.L., Chalfoun, S.M. 1999. Controle da ferrugem: a importância da época de execução. Lavras: Epamig. (Circular Técnico, 104). 44 p.
- Carvalho, V.L., Chalfoun, S.M. 1998. Manejo integrado das principais doenças do cafeeiro. *Informe Agropecuário*. 19(193), 27-35.
- Chaerle, L., Van Caeneghem, W., Messens, E., Lambers, H., Van Montagu, M., Van Der Straeten, D. 1999. Presymptomatic visualization of plant-virus interactions by thermography. *Nature Biotechnology*. 17,813-816.
- Chaves, E. 2015. Potássio, Fósforo, Boro e irrigação na distribuição espaço-temporal da cercosporiose do cafeeiro. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 156 p.
- Chemura, A., Mutanga, O., Dube, T. 2016. Separability of coffee leaf rust infection levels with machine learning methods at Sentinel-2 MSI spectral resolutions. *Precision Agriculture*. 18, 859-881.
- Costa, J.M., Grant, O.M., Chaves, M.M. 2013. Thermography to explore plant-environment interactions. *Journal of Experimental Botany*. 64, 3937-3949.
- Crósta, A.P. 1992. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas, UNICAMP, 170p.

- Cunha, R.L., Mendes, A.N.G., Chalfoun, S.M. 2004. Controle químico da ferrugem do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) seus efeitos na produção e preservação do enfolhamento. *Ciência e Agrotecnologia*. 28(5), 990-996.
- Custódio, A.A.P., Pozza, E.A., Custódio, A.A.P., Souza, P.A., Lima, L.A., Lima, L.M. 2010. Intensidade da ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro quanto à face de exposição das plantas. *Coffee Science*. 5(3), 214-228.
- Delalieux, S., van Aardt, J., Keulemans, W., Coppin, P. 2007. Detection of biotic stress (*Venturia inaequalis*) in apple trees using hyperspectral data: non-parametric statistical approaches and physiological implications. *European Journal of Agronomy*. 27, 130–143.
- Dhau, I., Adam, E., Mutanga, O., Ayisi, K., Abdel-Rahman, E.M., Odindi, J., Masocha, M. 2017. Testing the capability of spectral resolution of the new multispectral sensors on detecting the severity of grey leaf spot disease in maize crop. *Geocarto International*. 2, 1-14.
- Downton, W.J.S., Loveys, B.R., Grant, W.J.R. 1988. Non-uniform stomatal closure induced by water stress causes putative non-stomatal inhibition of photosynthesis. *New Phytology*. 110, 503-509.
- Favarin, J.L., Neto, D.D., García, A.G., Nova, N.A.V., Favarin, M.G.G.V. 2002. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 6, p. 769-773.
- Florenzano, T.G. 2011. Iniciação em sensoriamento remoto. 3ª ed. amp. e atual. São Paulo: Oficina de Textos. 128 p.
- Garçon, C.L.P., Zambolim, L., Mizubuti, E.S.G., Vale, F.X.R., Costa, H. 2004. Controle da ferrugem do cafeeiro com base no valor de severidade. *Fitopatologia Brasileira*. 29(5), 486-491.
- Gree, G. 1993. Epidemiology of coffee leaf rust in the Eastern Highlands. *Newsletter – Coffee Research Institute*. 2(9), 16-20.
- Hillnhütter, C., Mahlein, A.K., Sikora, R. A., Oerke, E.C. 2012. Use of imaging spectroscopy to discriminate symptoms caused by *Heterodera schachtii* and *Rhizoctonia solani* on sugar beet. *Precision Agriculture*. 13,17–32.
- Huerta, S.A. 1963. Par de folhas representativo del estado nutricional del cafeto. *Cenicafé*.14(1), 11-127.
- IBM SPSS Statistics. 2014. IBM SPSS Statistics software version 22. Chicago.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2010. IBGE Cidades@|Minas Gerais: Carmo do Rio Claro. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=311440&search=minas-gerais|carmo-do-rio-claro>>. Acesso em fevereiro de 2016.
- Instituto Nacional De Meteorologia (INMET). 2016. Rede de Estações: Estações Automáticas – Machado/MG. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>. Acesso em: out./2016.
- Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais (INPE). 2016. Disponível em: <<http://www.inpe.br/>>. Acesso em: 15 fev. 2016
- Jensen, J.R. 2009. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução da 2ª ed. por (pesquisadores do INPE): José Carlos N. Epiphanyo (coordenador); Antonio R. Formaggio; Athos R. Santos; Bernardo F. T.

- Rudorff; Cláudia M. Almeida; Lênio S. Galvão. São José dos Campos: Parêntese. 672 p.
- Kobayashi, T., Kanda, E., Kitada, K., Ishiguro, K., Torigoe, Y. 2001. Detection of rice panicle blast with multispectral radiometer and the potential of using airborne multispectral scanners. *Phytopathology*. 91, 316-323.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15(3), 259-263.
- Liu, W.T.H. 2006. Aplicações de sensoriamento remoto. Campo Grande, Ed. UNIDERP. 908 p.
- Lopes, D.B., Berger, R.D. 2001. The Effects of Rust and Anthracnose on the Photosynthetic Competence of Diseased Bean Leaves. *Phytopathology*. 91(2), 212-220.
- Mahlein, A.K., Rumpf, T., Welke, P., Dehn, H.W., Plümer, L., Steiner, U., Oerke, E.C. 2013. Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. *Remote Sensing of Environment*. 128, 21-30.
- Mahlein, A.K., Steiner, U., Dehne, H.W., Oerke, E.C. 2010. Spectral signatures of sugar beet leaves for the detection and differentiation of diseases. *Precision Agriculture*. 11, 413-431.
- Marques Filho, O., Neto, H.V. 1999. Processamento digital de imagens. Rio de Janeiro, Brasport. 331 p.
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). 2016. Vegetal: Culturas – Café. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cafê/saiba-mais>. Acesso em: 10 mar. 2016.
- Moriondo, M., Orlandini, S., Giuntoli, A., Bindi, M. 2005. The effect of downy and powdery mildew on grapevine (*Vitis vinifera* L.) leaf gas exchange. *Journal of Phytopathology*. 153, 350-357.
- Mottram, R., DeJager, J.M., Duckworth, J.R. 1983. Evaluation of a water stress index for maize using an infra-red thermometer. *Crop Production*, 12:26–28.
- Naue, C.R., Marques, M.W., Lima, N.B., Galvêncio, J.D. 2010. Sensoriamento remoto como ferramenta aos estudos de doenças de plantas agrícolas: uma revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*. 3, 190-195.
- Neto, H.S. 2016. Análise espaço temporal do patossistema *Colletotrichum* em cafeeiro e sua relação com os nutrientes minerais magnésio, cálcio e potássio. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 87 p.
- Novo, E.M.L.M. 2008. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher.
- Omasa, K. 1990. Image instrumentation methods of plant analysis. In: Liskens HF, Jackson JF (eds) *Modern methods of plant analysis*. Springer-Verlag, Berlin, 203-243.
- Pierce, L.L., Running, S.W., Riggs, G.A. 1990. Remote detection of canopy water stress in coniferous forests using NS001 Thematic Mapping Simulation and Thermal Infrared Multispectral Scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 56(5), 579-586.
- Pinter, P.J., Stanghellini, M.E., Reginato, R.J., Idso, S.B., Jenkins, A.D., Jackson, R.D. 1979. Remote detection of biological stresses in plants with infrared thermometry. *Science*. 205,585–587.

- Ponzoni, F.J., Shimabukuro, Y.E., Kuplich, T.M. 2012. Sensoriamento remoto da vegetação. 2ª edição 63 atualizada e ampliada. São Paulo: Oficina de Textos. 177 p.
- Pozza, E.A., Carvalho, V.L., Chalfoun, S.M. 2010. Sintomas de injúrias causadas por doenças em cafeeiro. In: Guimaraes, R. J.; Mendes, A. N. G.; Baliza, D. P. (Ed.). Semiologia do cafeeiro: sintomas de desordens nutricionais, fitossanitárias e fisiológicas semiologia do cafeeiro. Lavras: Ed. UFLA. P. 68-106.
- QGIS. 2016. Versão 2.14. Copyright ©. GNU Free Documentation License. Disponível em: <http://qgis.org/pt_BR/site/about/index.html#>. Acesso em: 18 mar. 2016.
- Reis, E.M., Leites, A., Forcelini, C.A. 2006. Relações entre intensidade da ferrugem da folha, refletância da radiação solar e rendimento de grãos na cultura do trigo Embrapa 16. Fitopatologia Brasileira. 31, 447-454.
- Ribeiro Do Vale, F.X., Zambolim, L. 1997. Controle de doenças de plantas: grandes culturas. Viçosa: Departamento de Fitopatologia. 2, 83-179.
- Robert, C., Bancal, M.O., Lannou, C., Ney, B. 2006. Quantification of the effects of *Septoria tritici* blotch on wheat leaf gas exchange with respect to lesion age, leaf number, and leaf nitrogen status. Journal of Experimental Botany. 57, 225-234.
- Rodrigues, S. Filho, G.S.F., Almeida, W.A., Neto, A.F.C. 2010. Desenvolvimento do café arábica (*Coffea arabica*) submetido a diferentes lâminas de irrigação, nas condições do estado de Rondônia. Global Science and Technology. 3(1), 44-49.
- Rodríguez-Gaviria, A.A., Cayón, G. 2008. Efecto de *mycosphaerella fijiensis* sobre la fisiologia de la hoja de banana. Agronomía Colombiana, 26 (2), 256–265.
- Rotem, J., Palti, J. 1969. Irrigation and Plant Diseases. Annual Review of Phytopathology. 7, 267-288.
- Silva, A.J. da., Canteri, M.G., Santiago, D.C., Hikishima, M., Silva, A.L. 2009. A refletância na estimativa do efeito de fungicidas no controle da ferrugem asiática da soja. Summa Phytopathologica. 35 (1), 53-56.
- Talamini, V., Pozza, E.A.A., Souza, P.E., Silva, A.M. 2003. Progresso da ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro (*Coffea arabica* L.) com diferentes épocas de início e parcelamentos da fertirrigação. Ciência e agrotecnologia. 27(1), 141-149.
- Tyagi, P., Bhosle, U. 2014. Radiometric Correction of Multispectral Images Using Radon Transform. Journal of the *Indian Society of Remote Sensing*. 42(1), 23-34.
- United States Geological Survey (USGS). 2016. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/>>. Acesso em: 15 fev. 2016.
- Vasco, G.B. 2016. Análise espaço temporal da ferrugem do cafeeiro e sua relação com o clima e a nutrição mineral com K e B. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 116 p.
- Vermote, E.F., D. Tanre, J.L. Deuze, M. Herman, and J.J. Morcrette. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 35, 675–686.
- Ward, H.M. 1882. Research on the life history of *Hemileia Vastatrix*, the fungus of the coffee leaf disease. Journal of the Linnean Society (Botany). 12 (3), 299-335.
- Webb, K.M., Calderón, F.J. 2015. Mid-Infrared (MIR) and Near-Infrared (NIR) Detection of *Rhizoctonia solani* AG-2-2 IIIB on Barley-Based Artificial Inoculum. Applied Spectroscopy. 69(10), 1129-1136.

- Zhang, M., Qin, Z., Liu, X., Ustin, S. 2003. Detection of stress in tomatoes induced by late blight disease in California, USA, using hyperspectral remote sensing. *Applied Earth Observation and Geoinformation*. 4, 295–310.
- Zhao, D., Glaz, B., Comstock, J. 2010. Sugarcane response to waterdeficit stress during early growth on organic and sand soils. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*. 5, 403-414.
- Zhao, D., Glynn, N.C., Glaz, B., Comstock, J.C., Sood, S. 2011. Orange Rust Effects on Leaf Photosynthesis and Related Characters of Sugarcane. *Plant Disease*. 95, 640-647.

(VERSÃO PRELIMINAR)

ARTIGO 2

Caracterização radiométrica orbital da fenologia do cafeeiro em diferentes sistemas de irrigação

Artigo submetido ou em processo de submissão

Miryan Silva de Oliveira Pires¹ - Marcelo de Carvalho Alves¹ - Edson Ampélio Pozza²

¹Engineering Department, Federal University of Lavras, PO BOX 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brazil.

²Plant Pathology Department, Federal University of Lavras, PO BOX 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brazil.

Autor para correspondência: Marcelo de Carvalho Alves
marcelocarvalhoalves@gmail.com

Preparado em concordância com as normas do periódico
“**Agricultural, Ecosystem & Environment**”
(Versão preliminar – em processo de submissão)

Resumo

O cafeeiro arábica (*Coffea arabica* L.) pode ser influenciado por fatores capazes de interferir no desenvolvimento e na produção da planta, sendo de suma importância conhecer as fases fenológicas do cafeeiro para identificar as necessidades da planta nos estádios mais críticos e possibilitar a melhor solução na execução de manejo e tratos culturais. Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do monitoramento da fenologia do cafeeiro em lavouras sob diferentes sistemas de irrigação, utilizando composição colorida para interpretação visual aliada à coleta de campo. O estudo foi realizado em quatro áreas de lavouras cafeeiras no município de Carmo do Rio Claro – MG entre agosto de 2012 e dezembro de 2014, sob sistema de irrigação por autopropelido, gotejamento, pivô central e sistema sob sequeiro. Foram utilizadas quinze imagens Landsat-7/ETM+ e Landsat-8/OLI-TIRS, tentando estabelecer uma melhor sequência de imagens entre as datas de coleta de dados *in situ*. Foi possível identificar as fases fenológicas do cafeeiro por interpretação visual quando aliadas aos dados de campo, assim como o comportamento das lavouras em diferentes épocas. O estudo da fenologia por imagens é complexo e importante para auxiliar o produtor na tomada de decisão. Os resultados corroboram para as pesquisas até então realizadas em cafeeiros.

Palavras chave: *Coffea arabica* L.. Fenologia. Sensoriamento remoto. Composição colorida.

Introdução

O estado de Minas Gerais se destaca como o maior produtor de café do Brasil, que por sua vez é o maior produtor mundial e o segundo maior consumidor. Portanto, o café é um produto que apresenta grande importância na economia do país (MAPA, 2016).

Vários fatores podem interferir no desenvolvimento e na produção do cafeeiro, e para auxiliar o produtor na tomada de decisão, é importante entender a fenologia da planta para possibilitar a identificação das fases que exigem mais água, o reconhecimento das melhores épocas para aplicação de tratamentos fitossanitários e a execução das diversas operações agrícolas necessárias (Camargo; Camargo, 2001).

O ciclo fenológico do *Coffea arabica* L. apresenta sucessivas fases vegetativas e reprodutivas, que ocorrem em aproximadamente dois anos, e pode ser subdividido em seis fases bem distintas, sendo duas vegetativas e quatro reprodutivas: 1ª) vegetação e formação de gemas foliares; 2ª) indução e maturação das gemas florais; 3ª) florada; 4ª) granação dos frutos; 5ª) maturação dos frutos; e 6ª) repouso e senescência dos ramos terciários e quaternários (Camargo; Camargo, 2001).

Devido a grande importância socioeconômica do agronegócio cafeeiro, o conhecimento sobre a distribuição espacial da cultura é imprescindível para o planejamento agrícola sustentável em escala municipal, estadual e federal (Moreira et al. 2008).

Estudos mostrando a aplicação de sensoriamento remoto e geoprocessamento em culturas agrícolas por meio de imagens de satélite vêm sendo realizados por diversos pesquisadores, entre eles, Borges et al. (2010), Epiphanyo et al. (1994, 1996, 2002), Epiphanyo, Formaggio (1991), Moreira et al. (2010, 2008, 2007, 2004), Rizzi, Rudorff (2005), Sanches et al. (2005), Silva Júnior et al. (2014), Souza et al. (2012), Trabaquini et al. (2011). Porém há uma

dificuldade em encontrar trabalhos relacionados à fenologia do cafeeiro devido à sua complexidade espectral.

Visando contribuir com o sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento da cultura do cafeeiro, o presente trabalho tem como objetivo monitorar a fenologia do cafeeiro em diferentes sistemas de irrigação através de interpretação visual de imagens Landsat-7/ETM+ e Landsat-8/OLI-TIRS, destacando o efeito da bienalidade na produtividade das lavouras.

Material e Métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado em quatro áreas de lavouras cafeeiras situadas no município de Carmo do Rio Claro entre agosto de 2012 e dezembro de 2014.

Carmo do Rio Claro está localizado na região sudoeste do estado de Minas Gerais e é banhado pela Represa de Furnas, com altitude de 798 m, latitude 20°58'17" Sul e longitude 46°7'57" Oeste (IBGE, 2010).

O clima do município é classificado como subtropical mesotérmico, de acordo com a classificação Köppen-Geiger, e caracterizado por invernos secos e verões úmidos (subtropical/tropical de altitude – Cwa) (Kottek et al, 2006). Conforme as normais climatológicas de 1961 - 1990, a temperatura média no inverno é de aproximadamente 16 °C e a média no verão é de aproximadamente 27 °C. O período mais chuvoso é entre os meses de dezembro e fevereiro, e o mais seco é entre abril e setembro (INMET, 2016).

O café cultivado nas áreas de estudo é da espécie *Coffea arabica* L., cultivar Acaia 474/19, e cultivado sob diferentes sistemas de irrigação.

A área sob sequeiro possuía 30 ha, 6 anos, espaçamento de 3,6 m x 0,7 m e densidade de 3968 plantas.ha⁻¹, recepado em setembro de 2013.

A área sob sistema de irrigação por autopropelido possuía 2,6 ha, 7 anos, espaçamento de 3,5 m x 0,7 m e densidade de 4081 plantas.ha⁻¹.

A área sob sistema de irrigação por gotejamento possuía 11 ha, 2,5 anos, espaçamento de 3,6 m x 0,7 m e densidade de 3968 plantas.ha⁻¹.

A área sob sistema de irrigação por pivô central possuía 17 ha, 10 anos, espaçamento de 4,0 m x 0,5 m e densidade de 5000 plantas.ha⁻¹.

A irrigação foi realizada o ano todo de acordo com a necessidade das plantas, baseada na aferição de baterias de tensiômetros.

Os pontos de amostragem foram georreferenciados com GPS TRIMBLE 4600 LS® e Estação Total TC600®. As áreas de sequeiro, autopropelido, gotejamento e pivô central tinham 51, 50, 52 e 50 pontos amostrais, respectivamente. Em cada ponto amostral foram avaliadas cinco plantas. A distância entre pontos amostrais variou entre malhas de 50 x 50 m, 30 x 30 m, 40 x 40 m e 40 x 40 m, nas áreas de sequeiro, autopropelido, gotejamento e pivô central, respectivamente (Fig. 1).

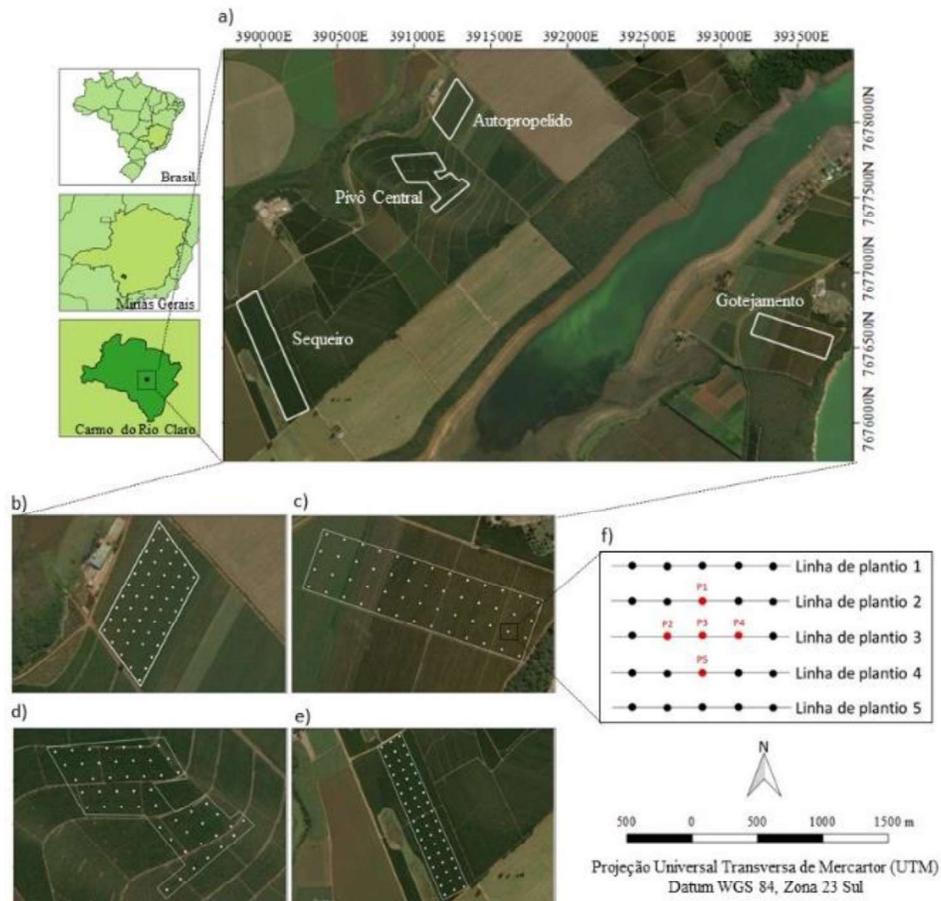


Figura 1. Mapa de localização das lavouras cafeeiras em Carmo do Rio Claro - MG (a). Malhas amostrais utilizadas para obter dados *in situ* bem como dados de imagens orbitais Landsat-7/ETM+ e Landsat-8/OLI-TIRS de áreas cultivadas sob sequeiro e sistema de irrigação por autopropelido, gotejamento e pivô central (b, c, d, e) e ponto amostral, com a localização das cinco plantas amostradas com referência nas linhas de plantio (f).

Dados *in situ*

O levantamento dos dados *in situ* de enfolhamento e produtividade foi realizado em quatro áreas de lavoura cafeeira no município de Carmo do Rio Claro, Minas Gerais, aproximadamente a cada dois meses durante o período de agosto de 2012 a junho de 2014. Os dados *in situ* foram obtidos por Vasco (2015), Chaves (2015) e Neto (2016).

Enfolhamento

O enfolhamento (%) foi avaliado nos pontos amostrais segundo escala diagramática proposta por Boldini (2001), que consiste em notas de acordo com a porcentagem de enfolhamento das plantas, para cada 5 plantas/ponto. Essas plantas foram marcadas para as avaliações posteriores, que ocorreram de dois em dois meses, de agosto de 2012 a junho de 2014, totalizando 12 avaliações.

A porcentagem do enfolhamento foi adaptada da classificação feita por Boldini (2001), resultando nas classes nulo (0%), baixo (10-40%), moderado (40-70%) e alto (70-98%).

Produtividade

A produtividade de café não beneficiado (litros.planta⁻¹) foi obtida por meio da colheita manual (derrixa), entre os meses de junho e julho, das cinco plantas de café, amostradas anteriormente em cada um dos pontos amostrais. Em seguida, verificou-se o volume coletado, em litros, por meio de um recipiente graduado, e calculou-se a média por planta.

As classes resultantes da classificação para confecção dos mapas foram nula (0 litros.planta⁻¹), baixa (0,5-5,0 litros.planta⁻¹), moderada (5,0-10,0 litros.planta⁻¹) e alta (10,0-15,0 litros.planta⁻¹).

Dados orbitais

O trabalho foi desenvolvido com a utilização de imagens dos satélites LANDSAT-7/ETM+ e LANDSAT-8/OLI-TIRS, obtidas por meio de download gratuito no catálogo de imagens do portal United States Geological Survey (USGS), referentes à proximidade com a data de cada coleta de dados *in situ*. Priorizou-se imagens livres de nuvens e quaisquer interferências na área de estudo que pudessem prejudicar o processamento digital.

As imagens foram escolhidas a partir de dois sensores diferentes, pelo fato de não ser possível a obtenção por apenas um deles, pois as imagens encontradas podiam não ser adequadas ao uso (ex. nuvens, sombra) ou não ter proximidade com a data *in situ* desejada. Por esse motivo, elas foram escolhidas para que pudessem ser intercaladas, formando sequência para favorecer o estudo das áreas.

As datas das imagens dos satélites adequadas para o estudo, juntamente com informações sobre as fases fenológicas em que se encontravam nas respectivas datas, estão discriminadas na Tabela 1. As características do sensor dos satélites LANDSAT-7 ETM+ e LANDSAT-8 OLI/TIRS encontram-se discriminadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 1. Datas *in situ*, respectivas datas de imagens dos satélites LANDSAT-7/ETM+ e LANDSAT-8 OLI/TIRS e estádios fenológicos do cafeeiro.

Datas <i>in situ</i>	Imagens LANDSAT-7/ETM+	Imagens LANDSAT-8/OLI-TIRS	Estádios Fenológicos
15/08/2012	21/08/2012		Repouso
20/10/2012	08/10/2012		Florada
27/11/2012	27/12/2012		Florada/Frutificação
02/02/2013	13/02/2013		Granação dos frutos
17/04/2013	18/04/2013		Maturação dos frutos
08/06/2013	20/05/2013		Colheita
24/08/2013	24/08/2013		Repouso
17/10/2013		04/11/2013	Florada
03/12/2013		20/11/2013	Florada/Frutificação
10/02/2014		08/02/2014	Granação dos frutos
05/04/2014	05/04/2014		Maturação dos frutos
04/06/2014	08/06/2014		Colheita
18/08/2014		19/08/2014	Repouso
20/10/2014		22/10/2014	Florada
27/12/2014		25/12/2014	Florada/Frutificação

Tabela 2. Características das bandas do satélite LANDSAT-7/ETM+, faixas espectrais e resolução espacial.

Banda	Comprimento de onda (μm)	Resolução Espacial (m)
1 - Azul	0,45 - 0,52	30
2 - Verde	0,52 - 0,60	30
3 - Vermelho	0,63 - 0,69	30
4 - Infravermelho Próximo	0,77 - 0,90	30
5 - Infravermelho Médio 1	1,55 - 1,75	30
6 - Termal	10,40 - 12,50	60
7 - Infravermelho Médio 2	2,08 - 2,35	30
8 - Pancromática	0,52 - 0,90	15

Fonte: USGS (2016)

Tabela 3. Características das bandas do satélite LANDSAT-8/OLI-TIRS, faixas espectrais e resolução espacial.

Banda	Comprimento de onda (μm)	Resolução Espacial (m)
1 - Costal	0,43 - 0,45	30
2 - Azul	0,45 - 0,51	30
3 - Verde	0,53 - 0,59	30
4 - Vermelho	0,64 - 0,67	30
5 - Infravermelho Próximo	0,85 - 0,88	30
6 - Infravermelho Médio 1	1,57 - 1,65	30
7 - Infravermelho Médio 2	2,11 - 2,29	30
8 - Pancromática	0,50 - 0,68	15
9 - Cirrus	1,36 - 1,38	30
10 - Termal 1	10,60 - 11,19	100
11 - Termal 2	11,50 - 12,51	100

Fonte: USGS (2016)

Processamento de imagens

Após a obtenção de imagens no catálogo do USGS adequadas para a realização do estudo, e utilizando como apoio tecnológico o software QGIS 2.14, realizou-se a caracterização do agroecossistema cafeeiro pela aplicação do sensoriamento remoto e geoprocessamento (Fig. 2).

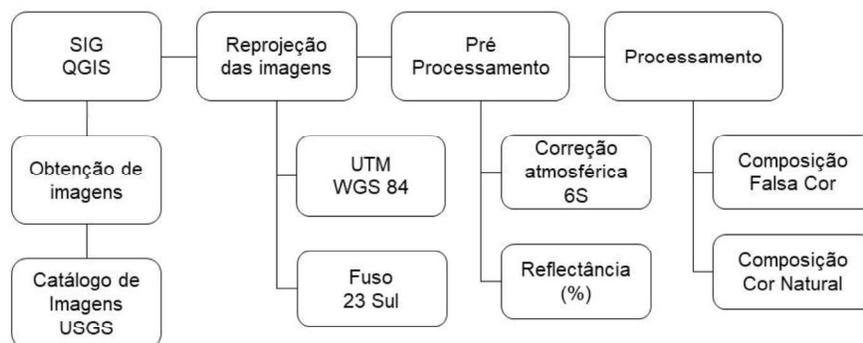


Figura 2. Fluxograma do processamento de imagens.

Por estarem sujeitas a condições atmosféricas como fumaça, nuvem, gases atmosféricos, etc., as imagens passaram por algumas etapas do processamento digital para melhorar o seu aspecto visual. Processar uma imagem consiste em transformá-la sucessivamente, com o objetivo de extrair mais facilmente a informação nela presente (Albuquerque; Albuquerque, 2000).

Entre as técnicas de processamento de imagens, destaca-se a correção radiométrica, geométrica e atmosférica. Tais processamentos são chamados de pré-processamento de dados de satélite (Liu, 2006). A função da etapa de pré-processamento é aprimorar a qualidade da imagem para as etapas posteriores (Marques Filho; Neto, 1999), calibrando a radiometria da imagem, atenuando os efeitos da atmosfera, removendo ruídos e corrigindo suas distorções geométricas (Florenzano, 2011).

Todos os rasters (imagens orbitais) e vetores (polígonos e pontos) das áreas de estudo foram reprojados para as coordenadas Universal Transversa de Mercator/WGS 84 (World Geodetic System), fuso 23 Sul. Segundo Crósta (1992), as imagens de satélites estão sujeitas a distorções geométricas, sendo necessário passar por um processamento prévio para correção dos dados. Isso facilita o uso

da imagem e produtos derivados em sistemas de suporte à decisão espacial ou em sistema de informação geográfica (SIG) (Jensen, 2009).

As imagens obtidas do Higher-Level (Surface Reflectance) encontram-se disponíveis já com a interferência atmosférica corrigida pelo método Second Simulation of Sattelite Signal in the Solar Spectrum (6S), o qual é fundamentado no modelo de transferência radiativa (Vermote et al., 1997).

O resultado final da correção atmosférica é a denominada reflectância de superfície, sendo possível a caracterização espectral dos objetos presentes na superfície terrestre (Ponzoni et al, 2012).

Após as etapas de pré-processamento, as imagens foram recortadas utilizando os polígonos de cada área de interesse.

Composição colorida

A identificação das lavouras de café foi realizada pela classificação visual, a qual se baseou nas coletas de campo para validação do mapeamento.

Para a composição colorida cor natural, utilizou-se a sequência 321 para imagens do Landsat-7 /ETM+ e 432 para imagens do Landsat-8/OLI-TIRS. Para a composição colorida falsa cor, utilizou-se a sequência 432 para imagens do Landsat-7/ETM+ e 543 para imagens do Landsat-8/OLI-TIRS.

O mapeamento baseado na interpretação visual de imagens Landsat tem como intuito auxiliar o monitoramento de lavouras cafeeiras através do uso de composição colorida, que é uma associação de três bandas espectrais aos canais RGB de uma imagem colorida, representando a informação espectral do alvo.

Interpretação visual

O monitoramento das fases fenológicas das áreas cafeeiras via interpretação visual de imagens de sensores orbitais envolveram o uso de imagens

multitemporais de dois diferentes sensores, com base na verificação simultânea em dados coletados *in situ*.

Resultados e discussão

Enfolhamento

Na área cultivada sob sistema de irrigação por autopropelido, a porcentagem de enfolhamento variou entre 40 e 70% em agosto e outubro de 2013 (Figura 3G e 3H) e junho de 2014 (Figura 3L).

Já na área cultivada sob sistema de irrigação por gotejamento, essa porcentagem mostrou-se menor em agosto e dezembro de 2013 (68,60 e 69,48%) (Fig. 4G e 4I) e junho de 2014 (43,73%) (Fig. 4K e 4L). O mês que apresentou maior enfolhamento foi fevereiro de 2014 (92,62%) (Fig. 4J).

No pivô central, a porcentagem de enfolhamento foi menor em agosto, outubro e dezembro de 2013 (Fig. 5G, 5H e 5I) e junho de 2014 (Fig. 5L).

Na área cultivada sob sequeiro, por sua vez, a porcentagem mostrou-se alta em novembro de 2012 (79,14%) e fevereiro e abril de 2013 (ambos com 84,59%) (Fig. 6C, 6D e 6E). Nos meses de outubro e dezembro de 2013 (Fig. 6H e 6I), o enfolhamento foi nulo devido à recepa. Em fevereiro e abril de 2014 (10%) (Fig. 6L), houve um baixo enfolhamento, quando se observou o reaparecimento de folhas na parte aérea da planta.

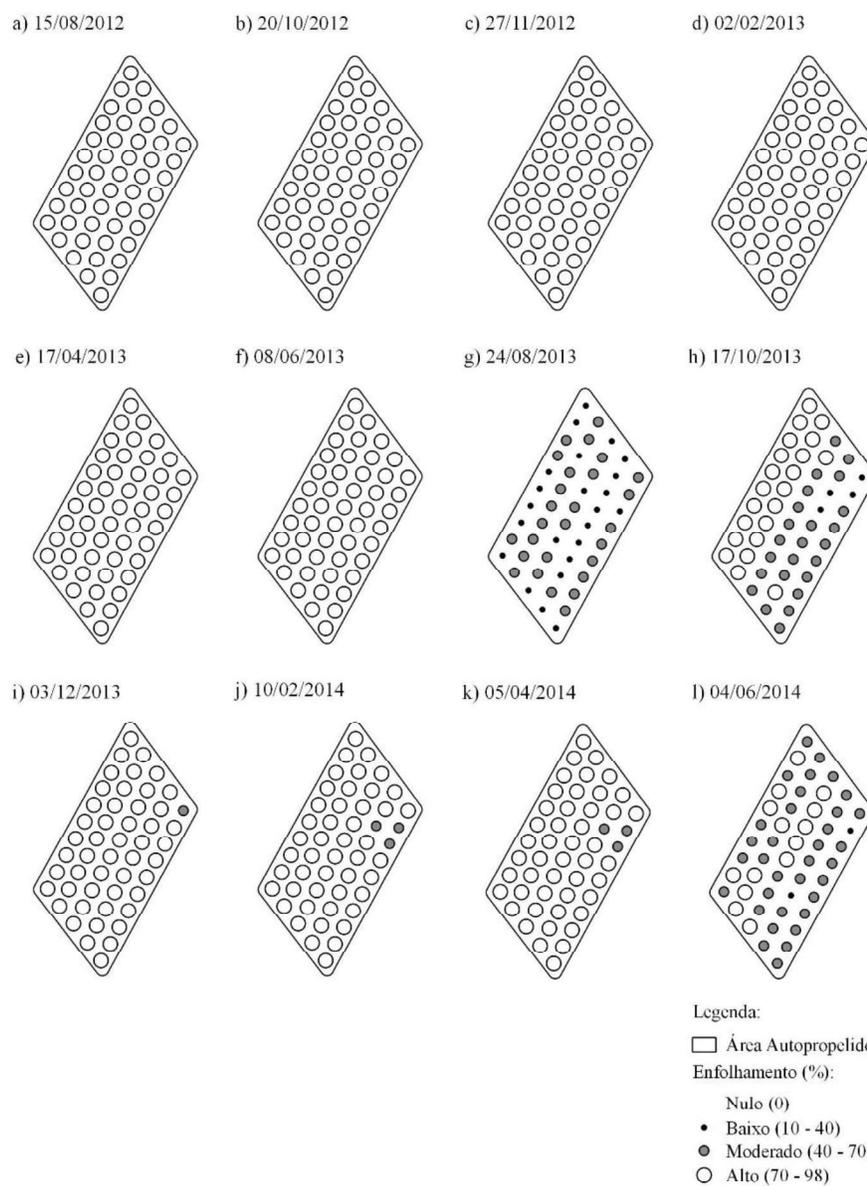


Figura 3. Mapas de distribuição espacial do enfôlhamto (%) de plantas de cafeeiro Acaiá 474/19 (*Coffea arabica* L.) em área cultivada sob sistema de irrigação por autopropelido em Carmo do Rio Claro, MG.

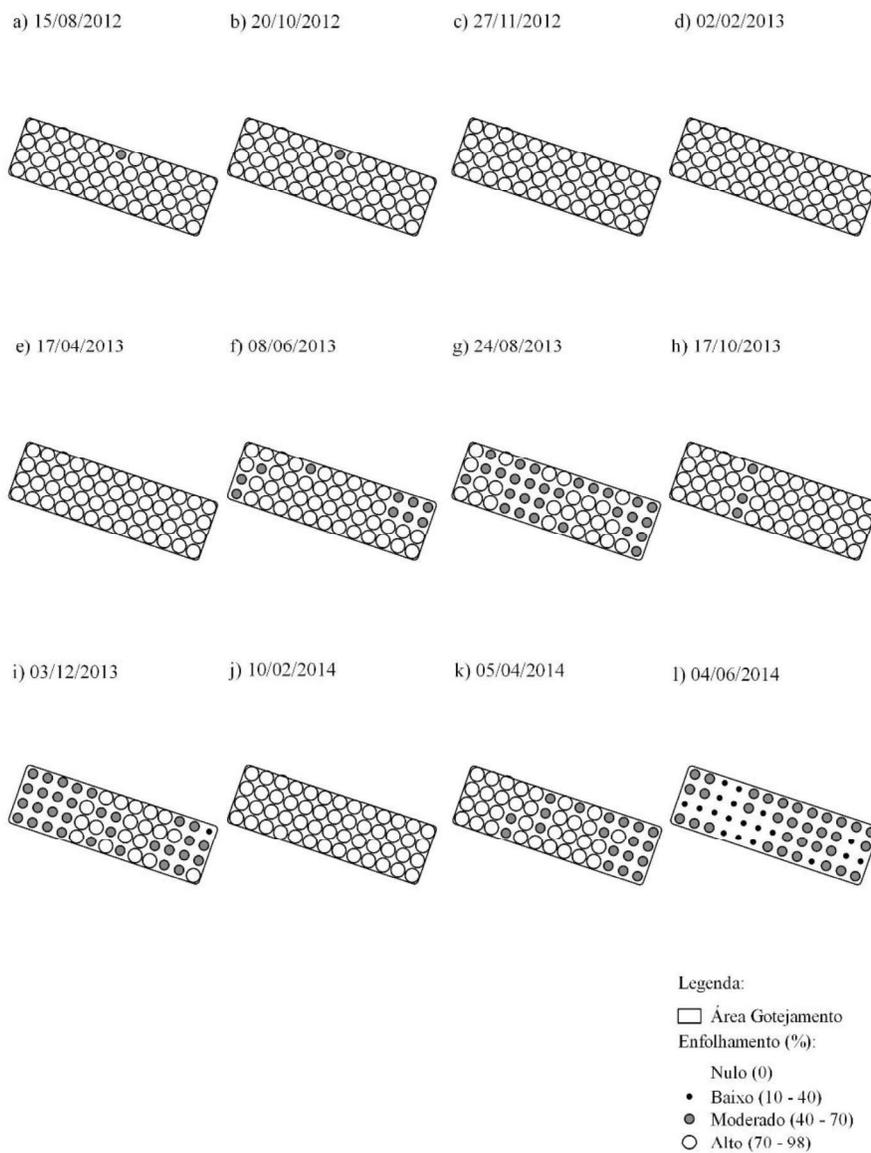


Figura 4. Mapas de distribuição espacial do enfoltamento (%) de plantas de cafeeiro Acaiá 474/19 (*Coffea arabica* L.) em área cultivada sob sistema de irrigação por gotejamento em Carmo do Rio Claro, MG.

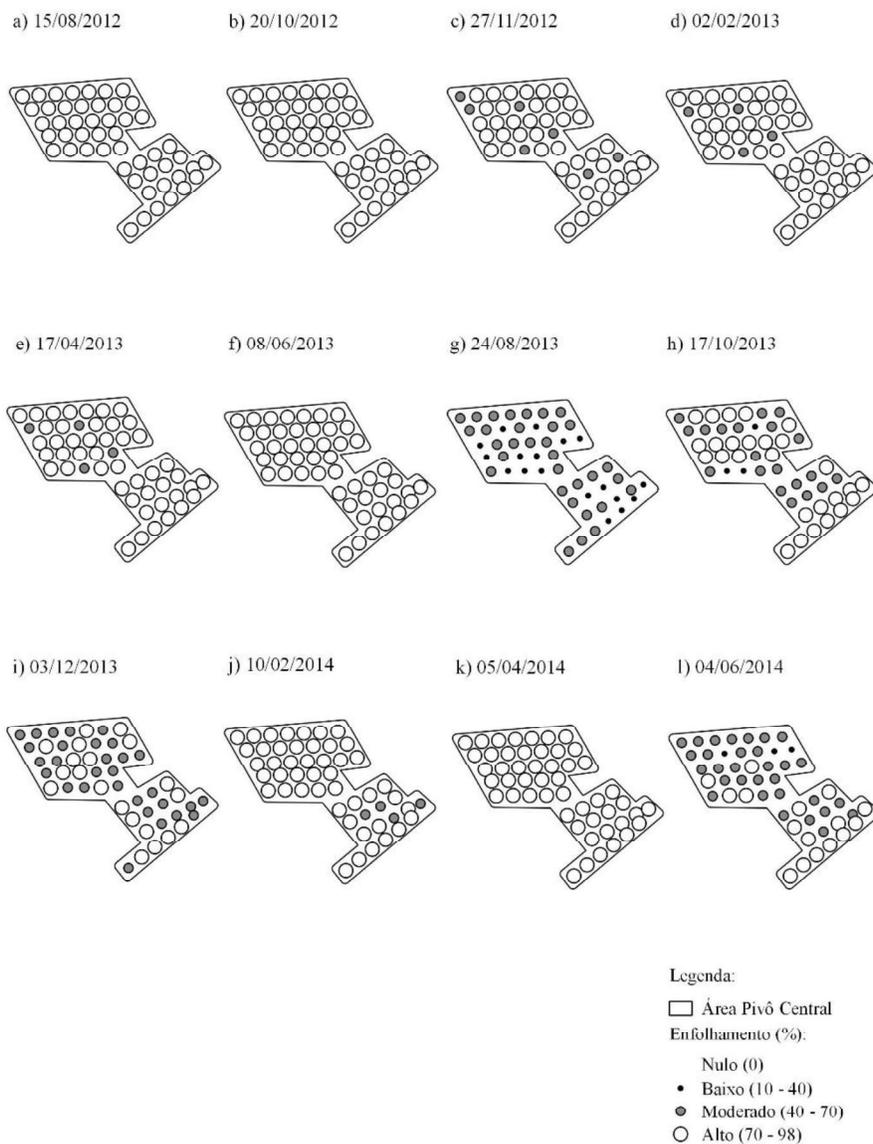


Figura 5. Mapas de distribuição espacial do enfoltamento (%) de plantas de cafeeiro Acaiá 474/19 (*Coffea arabica* L.) em área cultivada sob sistema de irrigação por pivô central em Carmo do Rio Claro, MG.

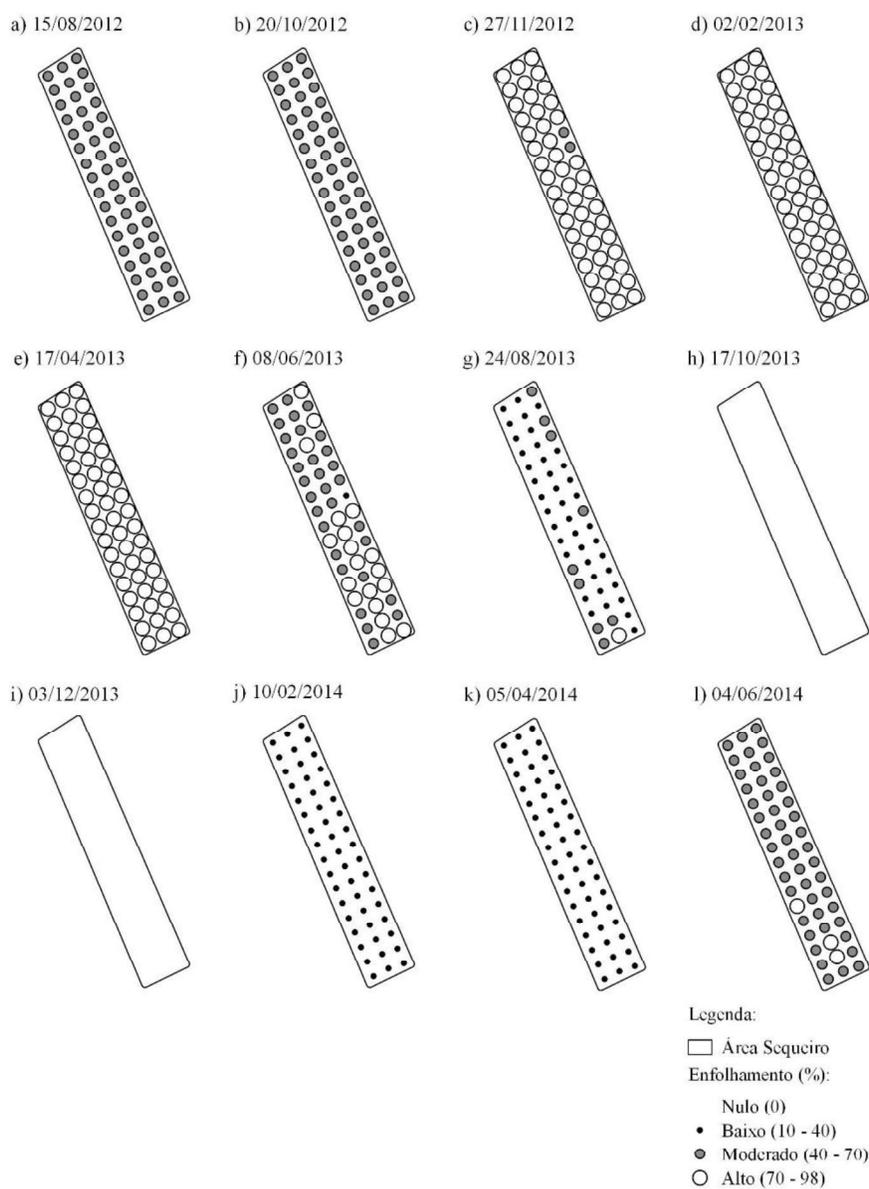


Figura 6. Mapas de distribuição espacial do enfollamento (%) de plantas de cafeeiro Acaiaá 474/19 (*Coffea arabica* L.) em área cultivada sob sistema de sequeiro em Carmo do Rio Claro, MG.

Os menores valores encontrados para enfolhamento médio variou entre os meses de junho e agosto, como já foi observado em outros trabalhos tratando sobre a perda associada à doença, que pode atingir até 50%. A principal injúria causada às plantas é a perda de folhas, responsável por reduzir sua área fotossintética, com conseqüente morte dos ramos plagiotrópicos e reflexos nas safras posteriores (Gree, 1993; Pozza et al., 2010).

A área foliar é um parâmetro indicativo de produtividade, pois é importante para a realização do processo fotossintético, que depende da taxa fotossintética por unidade de área foliar e da interceptação da radiação solar. Esses fatores são influenciados pelas características da arquitetura da copa e da dimensão do sistema fotoassimilador (Favarin et al., 2002).

Produtividade

No sistema de irrigação por autopropelido, a produtividade da safra 2012/2013 foi nula, devido a não computação de dados de campo nessa área, enquanto na safra 2013/2014 foi observada uma produtividade média de 6,1 litros.planta⁻¹ (Fig. 7).

No sistema de irrigação por gotejamento, a produtividade média da safra 2012/2013 foi de 7,0 litros.planta⁻¹, enquanto na safra 2013/2014 houve uma produtividade média de 8,4 litros.planta⁻¹ (Fig. 7).

Já no sistema de irrigação por pivô central, a produtividade média da safra 2012/2013 foi de 5,1 litros.planta⁻¹, e na safra 2013/2014 a produtividade média foi de 1,8 litros.planta⁻¹ (Fig. 7).

No sistema de sequeiro, a produtividade média da safra 2012/2013 foi de 7,8 litros.planta⁻¹, enquanto na safra 2013/2014, devido ao processo de recepa nessa área, a produtividade foi nula (Fig. 7).

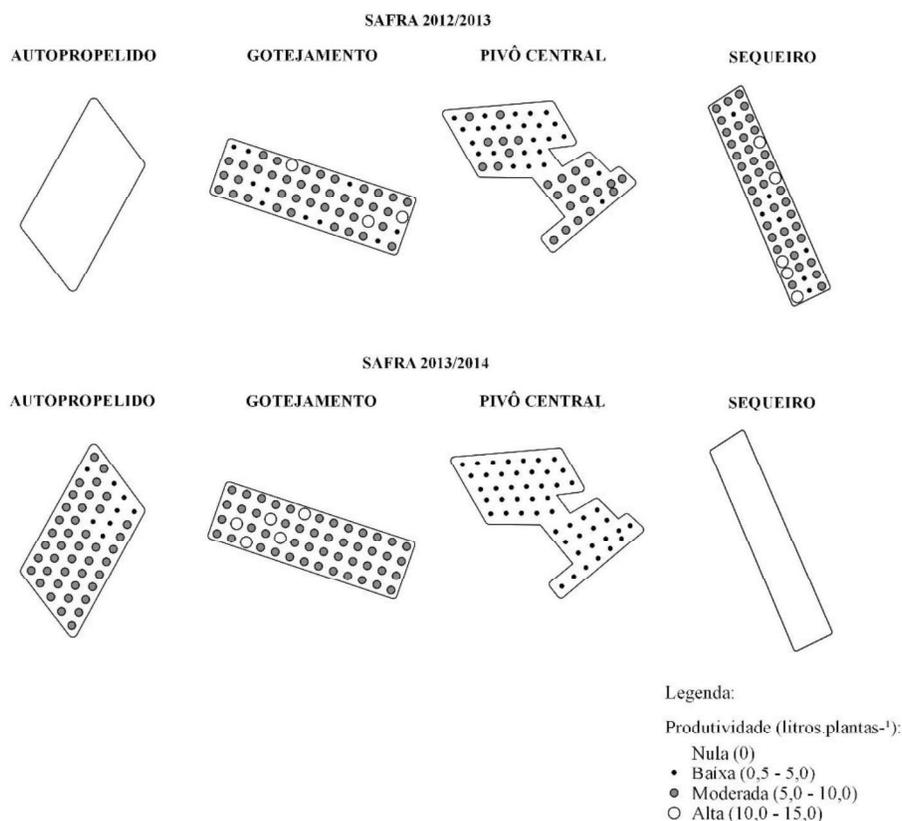


Figura 7. Mapas de distribuição espacial da produtividade (litros.planta⁻¹), safra 2012/2013 e 2013/2014, em áreas cultivadas sob sistema de irrigação por autopropelido, gotejamento, pivô central e sistema sob sequeiro.

Todas as áreas estudadas apresentaram bialidade espacial na produtividade (Fig. 7). Esses resultados condizem com outros trabalhos, que constataram que a irrigação o ano todo não reduz a bialidade de produção do cafeeiro (Faria; Siqueira, 2005; Silva et al., 2008). Além disso, a alteração no espaçamento do plantio também pode modificar o ciclo bial (Pereira et al., 2011, Valadares et al., 2013).

Em relação à ocorrência de anos de baixa e alta produtividade, isso ocorre devido aos fatores fisiológicos da cultura do cafeeiro, caracterizada pela

bienalidade. A ocorrência simultânea das funções vegetativas e reprodutivas no mesmo ramo plagiotrópico torna o volume da produção proporcional ao número de nós ou gemas formados na estação, e isso é comumente atribuído à diminuição de reservas das plantas (Rena; Maestri, 1985; DaMatta et al., 2007; Silva et al., 2010).

Outro fator que também pode influenciar a produtividade é a limitação hídrica, capaz de elevar a taxa de grãos malformados (chochos) quando a deficiência hídrica coincide com a fase de granação, o que reduz significativamente o crescimento vegetativo e a produção seguinte (Camargo et al., 2001). Tal fato é devido principalmente à alternância de produção do cafeeiro, ao padrão de produtividade ascendente e descendente ao longo da vida da cultura, à ocorrência simultânea do crescimento vegetativo e reprodutivo e por serem esses sorvedouros de assimilados internos da planta concorrentes entre si (Arruda; Grande, 2003).

Vale destacar que foi observada a presença da bienalidade espacial dentro da própria área, tanto na área irrigada por gotejamento quanto naquela irrigada por pivô central. Isso também foi constatado por Silva et al. (2010), que notaram que havia correspondência direta da variabilidade espacial de plantas com maior produtividade e menor enfolhamento no mesmo ano, bem como correspondência inversa em anos distintos, caracterizando a bienalidade da produtividade da cultura do café ao longo do espaço e do tempo durante os anos 2005, 2006 e 2007. Essa observação foi feita ainda por Carvalho et al. (2017), que avaliaram, em uma comparação visual, que as áreas estudadas entre 2012 e 2013 demonstraram a ocorrência da bienalidade da produção, pois as regiões que apresentaram as maiores produções em 2012 apresentaram os valores mais baixos em 2013. As plantas que produziram em 2012 usaram suas reservas para frutificação, o que influenciou negativamente o crescimento de ramos e, conseqüentemente, reduziu o rendimento em 2013. Isso pode ser confirmado pela diferença entre os

rendimentos de 2013 e 2012: o mapa mostrou que as áreas com maior diferença, positiva ou negativa, coincidiram com as áreas com maior ou menor rendimento em 2013, respectivamente. Isso ocorre, segundo Matiello et al. (2008), porque a planta de café sofre um estágio de metabolismo baixo após altos rendimentos.

Interpretação visual

Por meio de interpretação visual das imagens Landsat, juntamente com os trabalhos de campo realizados no município de Carmo do Rio Claro - MG, foi possível verificar as variações espectrais das áreas cafeeiras. Desse modo, foram utilizadas as composições coloridas falsa cor RGB 432 e cor natural RGB 321, para imagens Landsat-7, e RGB 543 e cor natural RGB 432, para imagens Landsat-8, fazendo a comparação com verificações de dados de campo. Assim, foi possível haver um melhor entendimento dos fatores que influenciam as reflectâncias dessa cultura ao longo do período estudado e estabelecer um padrão espectro-visual da cultura do cafeeiro para a área de estudo.

Na composição, a vegetação mais densa apresenta cores mais escuras, e a vegetação menos densa ou com menos massa verde (intercalada visualmente com solo) apresenta tons mais claros. Nesse caso, pode-se observar que as lavouras cafeeiras indicaram variabilidade de resposta espectral, com diferentes tons de coloração.

Visualmente é possível observar correspondências entre as feições apresentadas nas composições coloridas falsa cor (Fig. 8, 9, 10 e 11) e cor natural (Fig. 12, 13, 14 e 15), associadas à cobertura vegetal e aos estádios fenológico do cafeeiro (Tabela 1).

As variações de cores da composição falsa cor podem representar os diferentes estádios fenológicas do cafeeiro, em que os meses com vegetação vigorosa correspondem à cor vermelho magenta, com vegetação mais esparsa ou com menor vigor vegetativo correspondem à cor rosa, com vegetação estressada

correspondem à cor cinza escura ou azul metálico, com vegetação senescente correspondem à cor castanha ou bege, e com interferência do solo correspondem à cor azul-clara ou ciano. No caso das variações de cores da composição cor natural, correspondem à vegetação vigorosa a cor verde-escura, à vegetação mais esparsa ou com menor vigor vegetativo a cor verde-clara, à vegetação estressada a cor azul-escura, à vegetação senescente a cor marrom, e à interferência do solo a cor cinza.



Figura 8. Mapas de composição colorida falsa-cor RGB obtidas a partir de imagens do sensor Landsat-7/ETM+ das bandas 432 e do sensor Landsat-8/OLI-TIRS das bandas 543 de área cultivada sob sistema de irrigação por autopropelido.



Figura 9. Mapas de composição colorida falsa-cor RGB obtidas a partir de imagens do sensor Landsat-7/ETM+ das bandas 432 e do sensor Landsat-8/OLI-TIRS das bandas 543 de área cultivada sob sistema de irrigação por gotejamento.

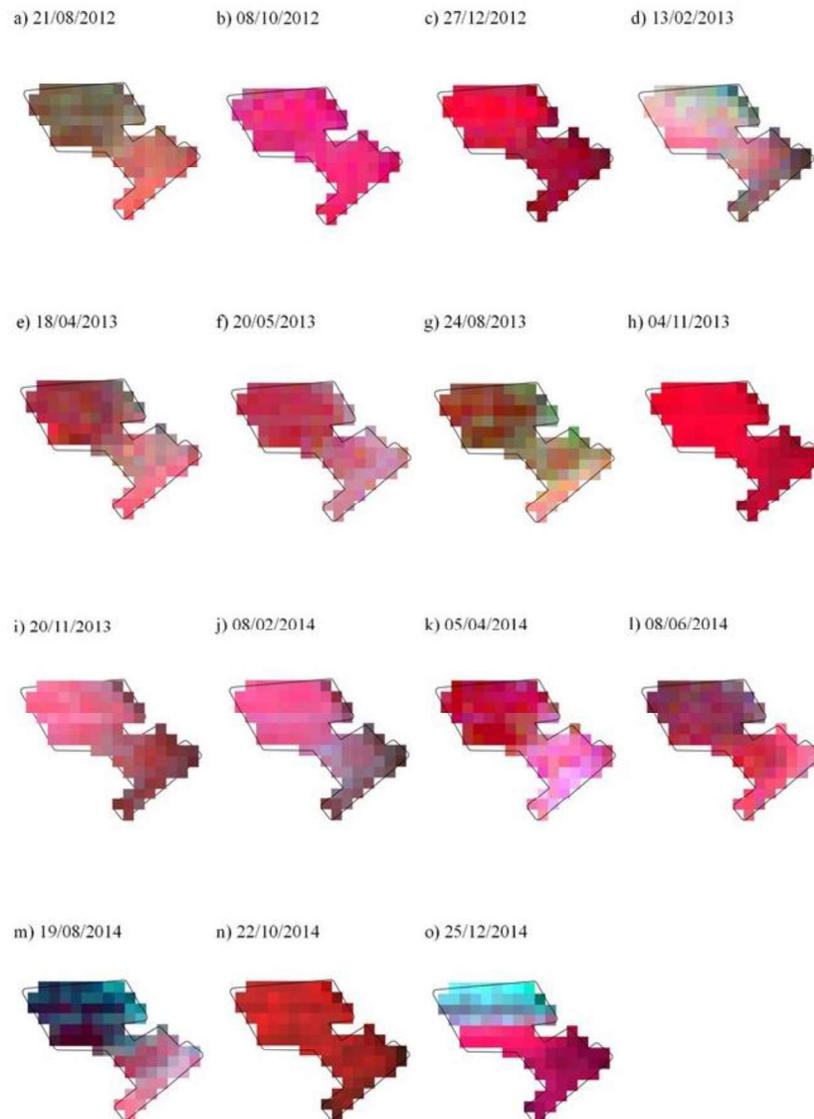


Figura 10. Mapas de composição colorida falsa-cor RGB obtidas a partir de imagens do sensor Landsat-7/ETM+ das bandas 432 e do sensor Landsat-8/OLI-TIRS das bandas 543 de área cultivada sob sistema de irrigação por pivô central.

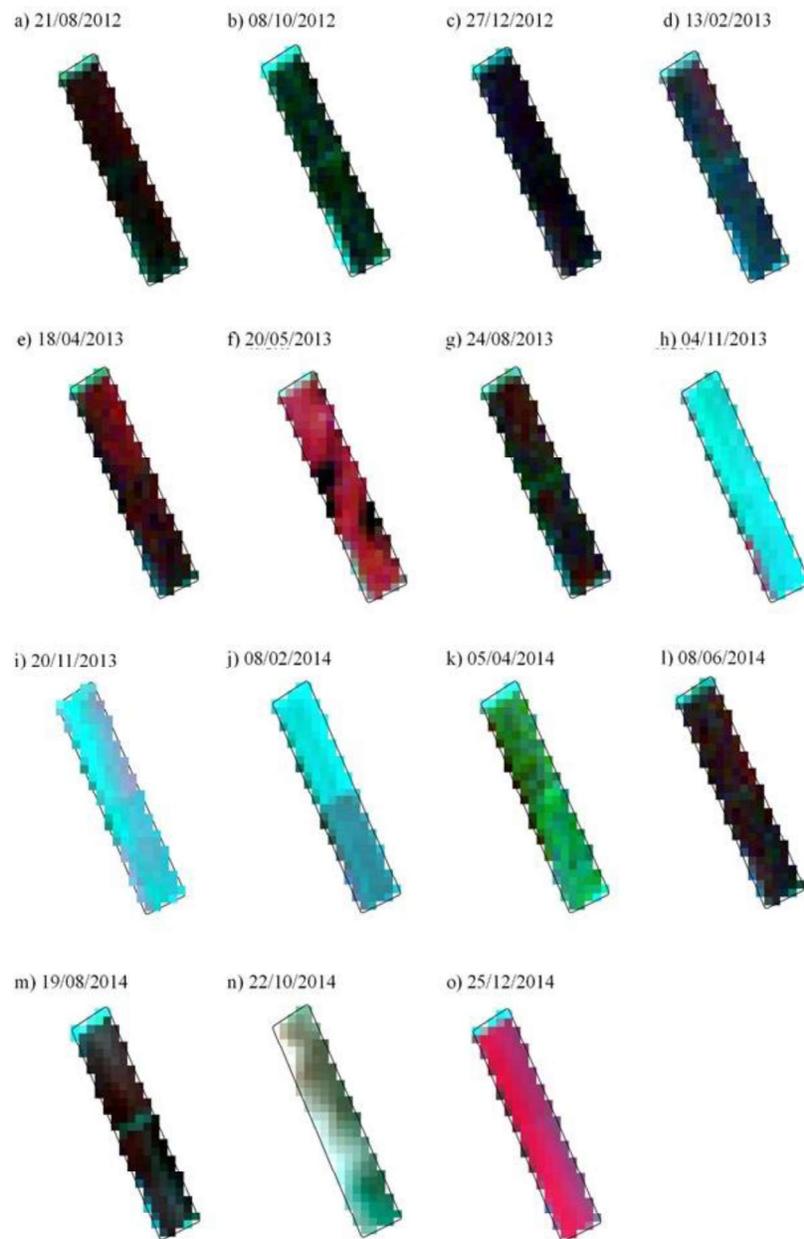


Figura 11. Mapas de composição colorida falsa-cor RGB obtidas a partir de imagens do sensor Landsat-7/ETM+ das bandas 432 e do sensor Landsat-8/OLI-TIRS das bandas 543 de área cultivada sob sistema de sequeiro.

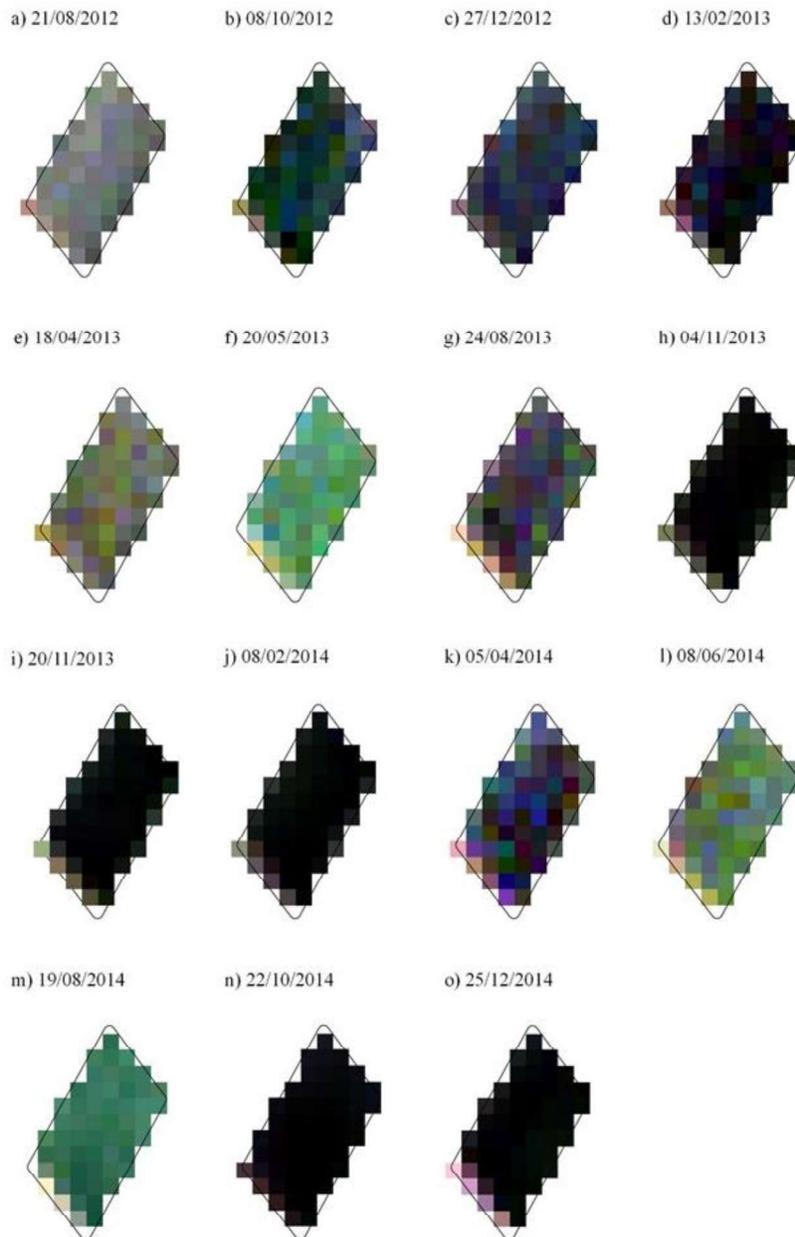


Figura 12. Mapas de composição colorida cor natural RGB obtidas a partir de imagens do sensor Landsat-7/ETM+ das bandas 321 e do sensor Landsat-8/OLI-TIRS das bandas 432 de área cultivada sob sistema de irrigação por autopropelido.

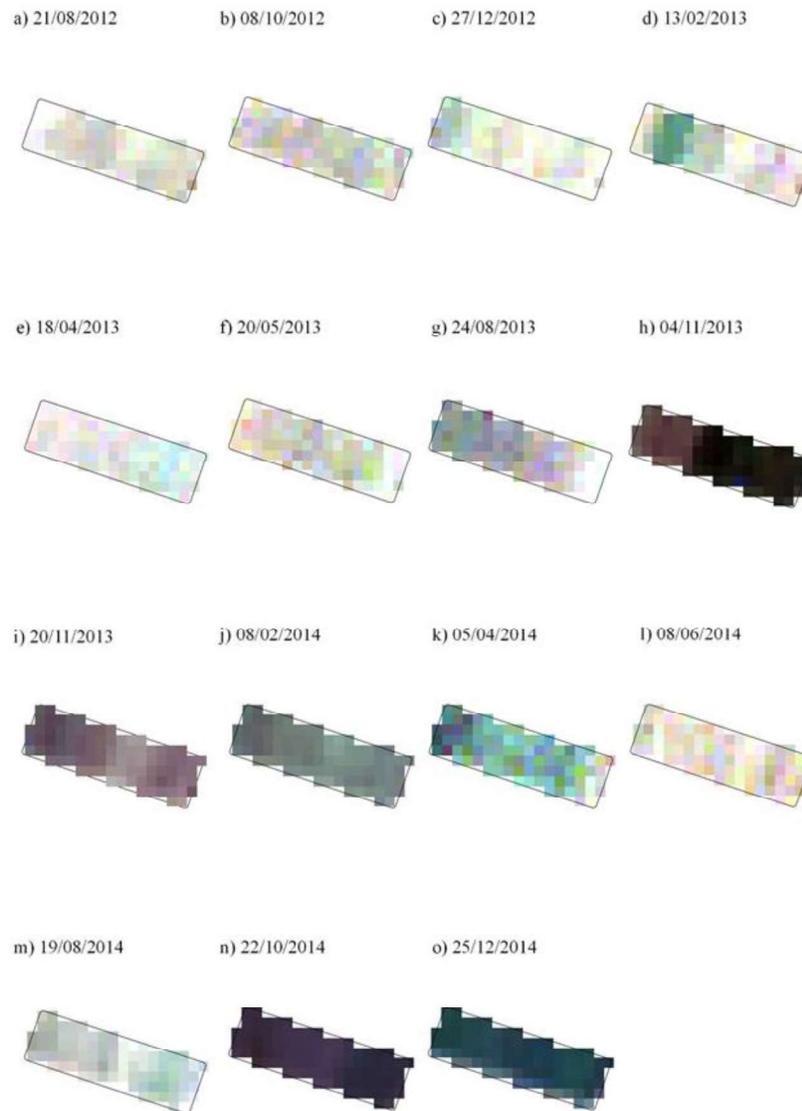


Figura 13. Mapas de composição colorida cor natural RGB obtidas a partir de imagens do sensor Landsat-7/ETM+ das bandas 321 e do sensor Landsat-8/OLI-TIRS das bandas 432 de área cultivada sob sistema de irrigação por gotejamento.

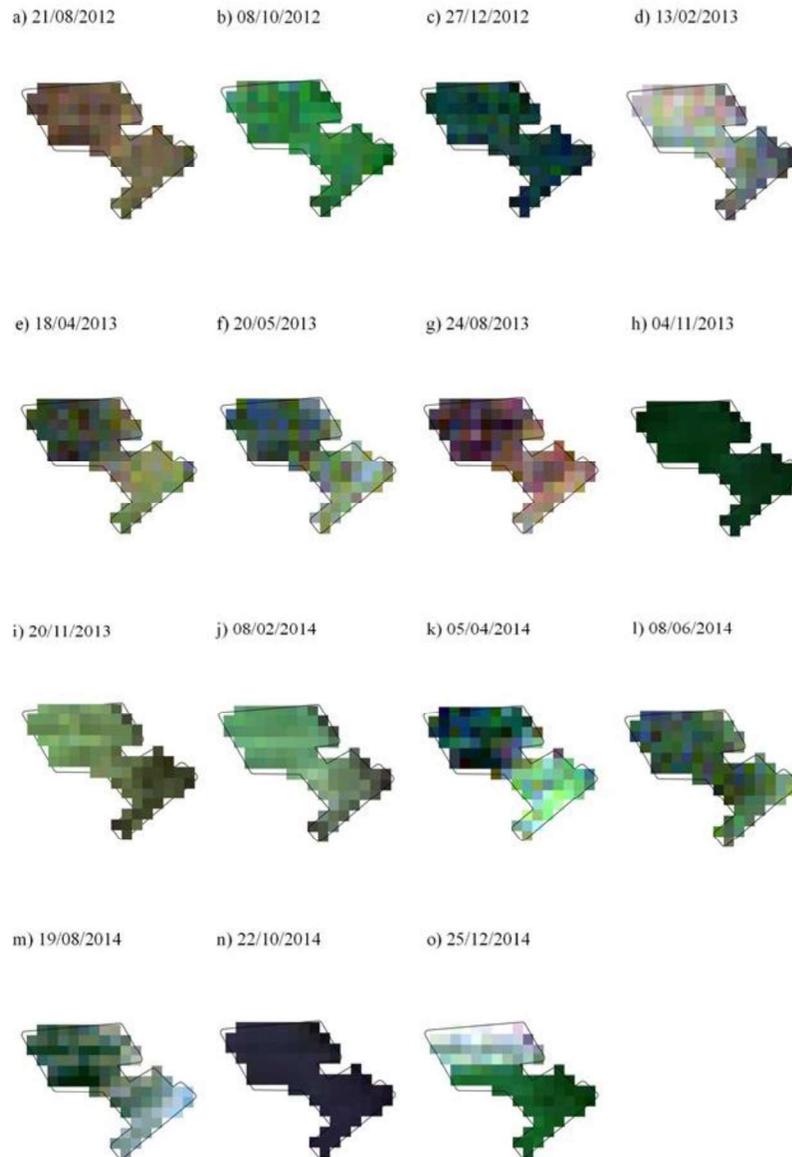


Figura 14. Mapas de composição colorida cor natural RGB obtidas a partir de imagens do sensor Landsat-7/ETM+ das bandas 321 e do sensor Landsat-8/OLI-TIRS das bandas 432 de área cultivada sob sistema de irrigação por pivô central.

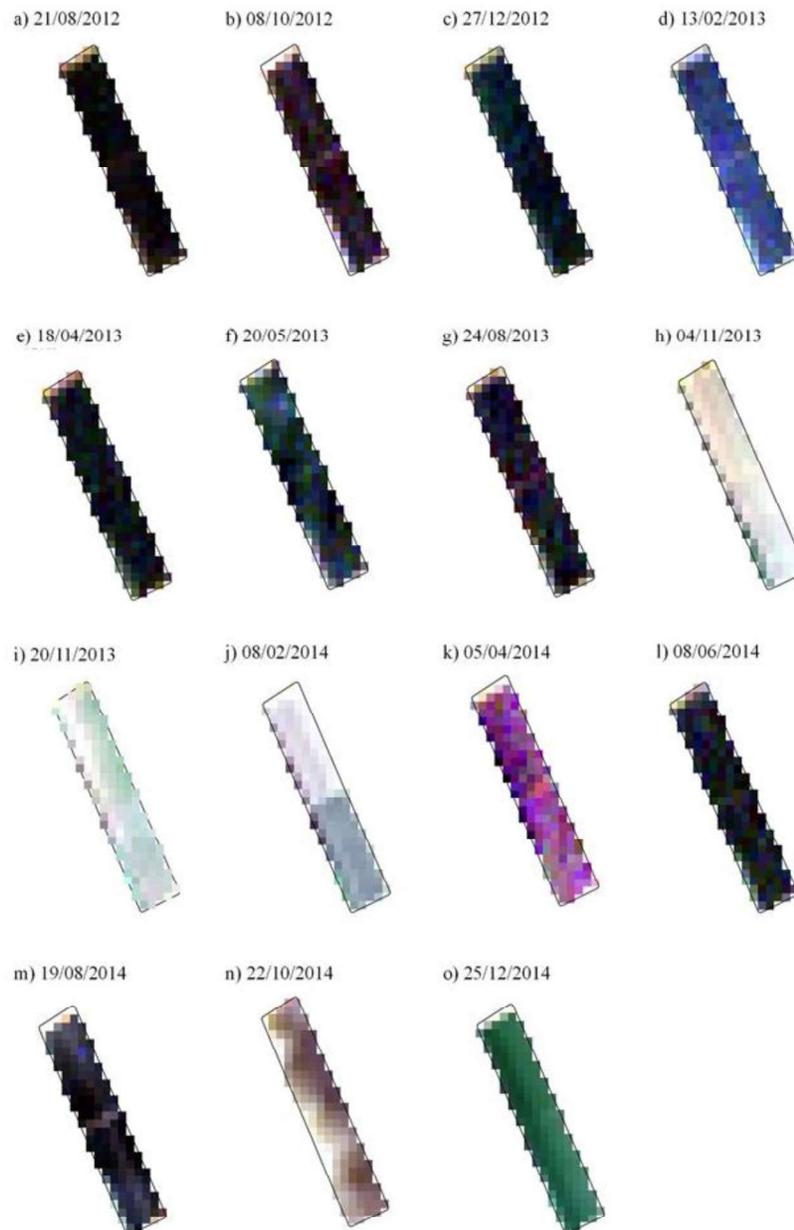


Figura 15. Mapas de composição colorida falsa-cor RGB obtidas a partir de imagens do sensor Landsat-7/ETM+ das bandas 321 e do sensor Landsat-8/OLI-TIRS das bandas 432 de área cultivada sob sistema de sequeiro.

Os cafeeiros apresentam diferentes estádios de crescimento (Fig. 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15), e a variabilidade de cores deve-se especialmente à grande diversidade espectral do cultivo, que é resultante de uma série de fatores, como variações nos tamanhos e formas de plantio, idade, manejo e estágio fenológico (Epiphany et al., 1994; Moreira et al., 2010, 2007, 2004; Tardin et al., 1992; Vieira et al., 2007, 2006).

Os meses entre abril e agosto dos anos estudados (Fig. 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15) representam a área irrigada por autopropelido, gotejamento, pivô central e sequeiro, em período de colheita e após a colheita. Observou-se grande variação, representando desde vegetação com menor vigor até vegetação estressada, como pode ser comprovado pela caracterização do enfolhamento das plantas *in situ* (Fig. 3, 4, 5 e 6).

Na área irrigada por gotejamento (Fig. 8 e 12), percebe-se que há interferência do solo, já que as plantas são mais jovens e o dossel é menos volumoso, mesmo apresentando alto enfolhamento (Fig. 4). Essa interferência do solo também pode ser observada nas imagens em que as plantas de cafeeiro da área de sequeiro passaram por recepa, em setembro de 2013, e nos meses seguintes (Fig. 11H, 11I, 11J, 15H, 15I e 15J). A recepa é uma prática recomendada quando as lavouras possuem muitos ramos inferiores (plagiotrópicos). Com isso, há uma redução na resposta espectral do dossel na faixa do infravermelho próximo e predomínio da resposta espectral do solo, deixando o aspecto da lavoura com falhas na imagem, mascarando a existência das lavouras de café (Moreira et al., 2008).

Segundo Moreira et al. (2004), analisando a resposta espectral da cultura do café por meio de imagens Landsat TM e ETM+ para fins de mapeamento, a fim de realizar previsão de safras e estimativa de área plantada de café-formação e café-produção no centro-sul de Minas Gerais, entre os anos de 1999 e 2001, foi

observado que lavouras plantadas no sistema tradicional têm uma resposta espectral muito influenciada pela componente solo.

Na área irrigada por pivô central (Fig. 10 e 14), nas imagens que sucedem a época de colheita, no mês de agosto, notou-se grande variação de cores, indicando plantas de estressadas a senescentes, com folhas secas e dossel irregular, podendo, assim, ser observada na representação do enfolhamento da área (Fig. 5).

O mapeamento baseado na interpretação visual de imagens Landsat possibilitou auxiliar o monitoramento de lavouras cafeeiras através da utilização de composição falsa cor, assim como fizeram alguns autores, que observaram os comportamentos espectrais de cana-de-açúcar, soja e milho e correlacionaram com verificações de campo (Sanches et al., 2005).

De acordo com Novo (2008), ao selecionar a combinação de canais e filtros, deve-se conhecer o comportamento espectral do alvo de interesse, o que facilita a extração de informações a partir dos dados de sensoriamento remoto, como a análise espectral da vegetação.

Uma das dificuldades ao obter a resposta espectral do café reside na mistura espectral com outros alvos, por exemplo, o solo, que deve ser levado em consideração na análise espectral. Isso porque, dependendo de como foi feito o manejo, os espaçamentos entre os pés de café pode ou não expor mais o solo, o que influencia em uma maior mistura espectral dos pixels (Moreira et al., 2004).

De acordo com Santos et al. (2012), outra dificuldade na identificação de áreas de café está no fato de que essa cultura geralmente cresce em regiões montanhosas, e isto faz com que existam sombras e distorções na resposta espectral, tornando difícil a classificação e a interpretação de alvos sombreados na imagem, visto que a resposta espectral é reduzida ou totalmente perdida. Além disso, o crescimento do café não é uma atividade sazonal e, portanto, em uma

mesma região pode haver plantações de café com diferentes idades, o que também afeta os padrões espectrais observados.

Segundo Trabaquini et al. (2011), informações sobre a distribuição de culturas agrícolas e as características dos ambientes onde essas lavouras estão localizadas são de extrema importância, possibilitando estruturar e viabilizar planejamentos agrícolas adequados para a região produtora.

Conclusão

Com a utilização das imagens multitemporais, foi possível realizar a interpretação visual das fases fenológicas do cafeeiro, visualizando a dinâmica e os comportamentos das lavouras nas diferentes épocas do estudo.

A identificação das fases fenológicas foi possível quando aliadas aos dados de campo, o que auxiliou na validação dos dados espectrais.

O solo é um fator importante na interpretação visual de imagens, pois tem grande influência na resposta espectral. Conforme o crescimento das plantas, esta interferência diminui, e as características do dossel são mais bem visualizadas.

Agradecimento

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de estudo que possibilitaram este trabalho.

Referências

- Albuquerque, M.P., Albuquerque, M.P. 2000. Processamento de imagens: métodos e análises. Rio de Janeiro – Brasil. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas MCT, 1-12.
- Arruda, F.B., Grande, E.M.A. 2003. Fator de resposta da produção do cafeeiro ao déficit hídrico em Campinas. *Bragantia*. 62(1), 139-145.
- Boldini, J.M. 2001. Epidemiologia da ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro irrigado e fertirrigado. Dissertação (Mestrado e Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 67 p.
- Borges, V.P., Oliveira, A.S., Silva, B.B. 2010. Mapeamento e quantificação de parâmetros biofísicos e radiação líquida em área de algodoeiro irrigado. *Ciência e Agrotecnologia*. 34(2), 485-493.
- Camargo, A.P., Camargo, M.B.P. 2001. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. *Bragantia*. 60(1), 65-68.
- Camargo, A.P., Camargo, M.B.P., Pallone Filho, W.J. 2001. Modelo climático-fenológico para determinação das necessidades de irrigação de café arábica na região Norte de São Paulo e no Triângulo Mineiro. Campinas: Instituto Agronômico, 26 p.
- Carvalho, L.C.C., Silva, F.M., Ferraz, G.A.S., Stracieri, J., Ferraz, P.P.F., Ambrosano, L. 2017. Geostatistical analysis of Arabic coffee yield in two crop seasons. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 21(6), 410-414.
- Chaves, E. 2015. Potássio, Fósforo, Boro e irrigação na distribuição espaço-temporal da cercosporiose do cafeeiro. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 156 p.
- Crósta, A.P. 1992. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas, UNICAMP, 170p.
- DaMatta, F.M., Ronchi, C.P., Maestri, M., Barros, R.S. 2007. Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 19, 485-510.
- Epiphânio, J.C.N., Formaggio, A.R. 1991. Sensoriamento Remoto de três parâmetros agrônômicos de trigo e de feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 26(10), 1615-1624.
- Epiphânio, J.C.N., Leonardi, L., Formaggio, A.R. 1994. Relação entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 29(3), 439-447.
- Epiphânio, J.C.N., Gleriani, J.M., Formaggio, A.R., Rudorff, B.F.T. 1996. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília. 31(6), 445-454.
- Epiphânio, J.C.N., Luiz, A.J.B., Formaggio, A.R. 2002. Estimativas de áreas agrícolas municipais, utilizando sistema de amostragem simples sobre imagens de satélite. *Bragantia*. 61(2), 187-197.
- Faria, R.T., Siqueira, R. 2005. Produtividade do cafeeiro e cultivos intercalares sob diferentes regimes hídricos. *Bragantia*. 64, 583-590.
- Favarin, J.L., Neto, D.D., García, A.G., Nova, N.A.V., Favarin, M.G.G.V. 2002. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília. 37(6), 769-773.
- Florenzano, T.G. 2011. Iniciação em sensoriamento remoto. 3ª ed. amp. e atual. São Paulo: Oficina de Textos. 128 p.

- Gree, G. 1993. Epidemiology of coffee leaf rust in the Eastern Highlands. Newsletter - Coffee Research Institute, Ruiru. 2(9), 16-20.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2010. IBGE Cidades@|Minas Gerais: Carmo do Rio Claro. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=311440&search=minas-gerais|carmo-do-rio-claro>>. Acesso em fevereiro de 2016.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). 2016. Rede de Estações: Estações Automáticas - Machado/MG. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: out./2017.
- Jensen, J.R. 2009. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução da 2ª ed. por (pesquisadores do INPE): José Carlos N. Epiphanyo (coordenador); Antonio R. Formaggio; Athos R. Santos; Bernardo F. T. Rudorff; Cláudia M. Almeida; Lênio S. Galvão. São José dos Campos: Parêntese. 672 p.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*. 15(3), 259-263.
- Liu, W.T.H. 2006. Aplicações de sensoriamento remoto. Campo Grande, Ed. UNIDERP. 908 p.
- Marques Filho, O., Neto, H.V. 1999. Processamento digital de imagens. Rio de Janeiro, Brasport. 331 p.
- Matiello, J.B., Garcia, A.W.R., Almeida, S.R. 2008. Adubação racional na lavoura cafeeira. Varginha: Bom Pastor. 114p.
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. 2016. Vegetal: Culturas – Café. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cafe/saiba-mais>. Acesso em: 10 mar. 2016.
- Moreira, M.A., Barros, M.A., Faria, V.G.C., Adami, M. 2007. Tecnologia de informação: imagens de satélite para o mapeamento de áreas de café de Minas Gerais. *Informe agropecuário*. 28(241), 27-37.
- Moreira, M.A., Adami, M., Rudorff, B.F. 2004. Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 39(3), 223-231.
- Moreira, M.A., Rudorff, B.F.T., Barros, M.A., Faria, V.G.C., Adami, M. 2010. Geotecnologias para mapear lavouras de café nos estados de Minas Gerais e São Paulo. *Engenharia Agrícola*. 30(6), 1123-1135.
- Moreira, M.A., Barros, M.A., Rudorff, B.F.T. 2008. Geotecnologias no mapeamento da cultura do café em escala municipal. *Sociedade & Natureza*. 20(1), 101-110.
- Neto, H.S. 2016. Análise espaço temporal do patossistema *Colletotrichum* em cafeeiro e sua relação com os nutrientes minerais magnésio, cálcio e potássio. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 87 p.
- Novo, E.M.L.M. 2008. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher.
- Pereira, S.P., Bartholo, G.F., Baliza, D.P., Sobreira, F.M., Guimarães, R.J. 2011. Crescimento, produtividade e bionalidade do cafeeiro em função do espaçamento de cultivo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 46, 152-160.
- Ponzoni, F.J., Shimabukuro, Y.E., Kuplich, T.M. 2012. Sensoriamento remoto da vegetação. 2ª edição atualizada e ampliada. São Paulo: Oficina de Textos. 177 p.

- Pozza, E.A., Carvalho, V.L., Chalfoun, S.M. 2010. Sintomas de injúrias causadas por doenças em cafeeiro. In: Guimaraes, R. J.; Mendes, A. N. G.; Baliza, D. P. (Ed.). *Semiologia do cafeeiro: sintomas de desordens nutricionais, fitossanitárias e fisiológicas semiologia do cafeeiro*. Lavras: Ed. UFLA. p. 68-106.
- QGIS. 2016. Versão 2.12.1. Copyright ©. GNU Free Documentation License. Disponível em: <http://qgis.org/pt_BR/site/about/index.html#>. Acesso em: 18 mar. 2016.
- Rena, A.B., Maestri, M. 1985. Fisiologia do cafeeiro. *Informe Agropecuário*. 11, 26-40.
- Rizzi, R., Rudorff, B.F.T. 2005. Estimativa da área de soja no Rio Grande do Sul por meio de imagens Landsat. *Revista Brasileira de Cartografia*. 57(3), 226-234.
- Sanchez, I.D., Epiphanyo, J.C.N., Formaggio, A.R. 2005. Culturas agrícolas em imagens multitemporais do satélite Landsat. *Agricultura em São Paulo*. 52(1), 83-96.
- Santos, J. A., Gosselin, P.H., Phillip-Folguet, S, Torres, R.S., Falcão, A.X. 2012. Multiscale Classification of Remote Sensing Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 50, 3764-3775.
- Silva Junior, C.A., Moreira, E.P., Frank, T., Moreira, M.A., Barcellos, D. 2014. Comparação de áreas de soja (*Glycinemax* (L) Merr.) obtidas por meio da interpretação de imagens TM/Landsat e MODIS/Terra no município de Maracaju (MS). *Bioscience Journal*. 30(2), 707-716.
- Silva, C.A., Teodoro, R.E.F., Melo, B. 2008. Produtividade e rendimento do cafeeiro submetido a lâminas de irrigação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília. 43(3), 387-394.
- Silva, F.M., Alves, M.C., Souza, J.C.S., Oliveira, M.S. 2010. Efeitos da colheita manual na bienalidade do cafeeiro em Ijaci, Minas Gerais. *Ciência e Agrotecnologia*. 34, 625-632.
- Souza, V.C.O., Vieira, T.G.C, Volpato, M.M.L., Alves, H.M.R. 2012. Espacialização e dinâmica da cafeicultura mineira entre 1990 e 2008, utilizando técnicas de geoprocessamento. *Coffee Science*. 7(2), 122-134.
- Tardin, A.T., Assunção, G.V., Soares, J.V. 1992. Análise preliminar de imagens TM visando a discriminação de café, citrus e cana-de-açúcar na região de Furnas-MG. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 27, 1355-1361.
- Trabaquini, K., Miglioranza, E., França, V., Neto, O.C.P. 2011. Caracterização de lavouras cafeeiras, utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto no município de Umuarama-PR. *Ciência e agrotecnologia*. 35(1), 35-44. 2011.
- United States Geological Survey (USGS). 2016. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/>>. Acesso em: 15 fev. 2016.
- Valadares, S.V., Neves, J.C.L., Rosa, G.N.G.P., Martinez, H.E.P., Venegas, V.H.A., Lima, P.C. 2013. Produtividade e bienalidade da produção de cafezais adensados, sob diferentes doses de N e K. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 48(3), 296-303.
- Vasco, G.B. 2016. Análise espaço temporal da ferrugem do cafeeiro e sua relação com o clima e a nutrição mineral com K e B. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 116 p.
- Vermote, E.F., D. Tanre, J.L. Deuze, M. Herman, and J.J. Morcrette. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 35, 675-686.

- Vieira, T.G.C., Alves, H.M.R., Lacerda, M.P.C., Veiga, R.D., Epiphanyo, J.C.N. 2006. Crop parameters and spectral response of coffee (*Coffea arabica* L.) áreas within the state of Minas Gerais, Brazil. *Coffee Science*. 1(2), 111-118.
- Vieira, T.G.C., Alves, H.M.R., Bertoldo, M.A., Souza, V.C.O. 2007. Geotecnologies in the assessment of land use changes in coffee Regions of the state of Minas Gerais in Brazil. *Coffee Science*. 2, 142-149.

(VERSÃO PRELIMINAR)