



**NICOLE LOPES BENTO**

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO EM LAVOURAS CAFEIRAS POR  
SISTEMA DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA**

**LAVRAS MG  
2020**

**NICOLE LOPES BENTO**

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO EM LAVOURAS CAFFEEIRAS POR SISTEMA DE  
AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA**

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

Professor Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz  
Orientador

**LAVRAS- MG  
2020**

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

Bento, Nicole Lopes.

Índices De Vegetação Em Lavouras Cafeeiras Por Sistema De  
Aeronave Remotamente Pilotada / Nicole Lopes Bento. - 2020.  
65 p. : il.

Orientador(a): Gabriel Araújo e Silva Ferraz.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Agricultura de Precisão. 2. Coffea arabica L. 3.  
Sensoriamento Remoto. I. Ferraz, Gabriel Araújo e Silva. II. Título.

**NICOLE LOPES BENTO**

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO EM LAVOURAS CAFEEIRAS POR SISTEMA DE  
AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA**

**VEGETATION INDICES IN COFFEE PLANTING RECENTLY PLANTED  
BY REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SYSTEMS**

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

APROVADA em 09 de outubro de 2020.

Dr. Rubens José Guimarães - UFLA

Dr. Luis Carlos Cirilo Carvalho - UESC

Professor Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz  
Orientador

**LAVRAS-MG  
2020**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por Sua infinita bondade, amor sem limites, presença constante e inexplicável em minha vida, pelo apoio e sustentação nos momentos de fraqueza, mantendo-me firme e confiante nas lutas diárias em busca de meus objetivos e sonhos.

A minha mãe Ana Cristina fonte de inspiração, pelos ensinamentos, dedicação e confiança a mim depositados. A minha irmã Ludmyla que torce e vibra sempre por minhas conquistas. Ao meu noivo e companheiro Jhones que fez meus dias mais felizes durante esses anos de mestrado e de todos os dias da minha vida.

Ao professor Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz pela orientação e por todo auxílio, apoio, ensinamentos, tranquilidade e sobretudo pela confiança depositada em mim para o desenvolvimento deste projeto.

Aos professores membros das bancas de qualificação e defesa que contribuíram significativamente na melhoria deste projeto: Dr. Rubens José Guimarães, Dr. Luis Marcelo Tavares de Carvalho (Passarinho) e Dr. Luis Carlos Cirilo Carvalho.

A toda a equipe NESA, com destaque aos colegas envolvidos no desenvolvimento deste trabalho: Brenon, Lucas, Luana, Sabrina, Pedro e em especial ao Rafael Barata pelo companheirismo e dedicação nos trabalhos do experimento de campo e nas análises posteriores.

A Universidade Federal de Lavras, UFLA, especialmente ao Departamento de Engenharia e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade concedida de realização do curso e pela contribuição à minha formação.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES), instituição de fomento, pelo apoio financeiro concedido para o desenvolvimento deste projeto – Código de Financiamento 001.

A Fazenda Samambaia, na pessoa do Daniel, pela disponibilidade da área experimental, além de todo o auxílio prestado para implementação do experimento, idas à campo e solução de dúvidas e sugestões para a efetivação do desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Dr. João Paulo Rodrigues Alves Delfino Barbosa do Setor de Fisiologia Vegetal do Departamento de Biologia da UFLA pelo auxílio prestado com o empréstimo do equipamento de clorofilômetro portátil para desenvolvimento desta pesquisa.

Estendo meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para concretização deste mestrado.

**Muito obrigada!**

## RESUMO

O Brasil é o principal produtor, exportador e segundo maior consumidor de café do mundo e Minas Gerais Estado com grande contribuição para o cenário econômico nacional. A aplicação de tecnologias no setor agrícola busca, portanto otimização no estudo, investigação e tomada de decisão inteligente garantindo maior lucratividade e rentabilidade das lavouras. Deste modo, a utilização de dispositivos eletrônicos com sensores embarcados para captura de fotografias aéreas das lavouras, com ênfase no Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada (RPAS), evidencia tal aplicabilidade, por meio da utilização de técnicas do Sensoriamento Remoto. Neste contexto propôs-se inicialmente realizar o levantamento de informações de caráter conceitual e de trabalhos desenvolvidos nos setores de estudo de modo a construir um referencial teórico para embasamento na efetivação dos objetivos propostos. Em sequência, o primeiro estudo propôs caracterizar três cultivares cafeeiras recém transplantadas, analisando o comportamento temporal das mesmas, evidenciado pela ação dos períodos seco e chuvoso no desenvolvimento das plantas no primeiro ano de formação no campo, bem como descrever o comportamento do perfil espectral das três cultivares para os dois períodos de estudo, diferenciar estatisticamente as cultivares por meio das variáveis estudadas e estimar equação de regressão linear entre os dados radiométricos dos índices de vegetação (IVs) aos dados de clorofila total (Chl t) e índice de área foliar (IAF). O experimento foi conduzido na Fazenda Samambaia, localizada no município de Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, com atividade agrícola cafeeira (*Coffea arabica* L.) recém transplantada, com cultivares Catucaí (2SL), Catuaí (IAC 62) e Bourbon (IAC J10) e idade de 5 meses no início dos trabalhos. As imagens foram obtidas por meio de sensores RGB e multiespectrais em Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada (RPAS), coletadas de dois em dois meses, de maio de 2019 a março de 2020, assim como os dados de altura, diâmetro de copa, clorofilas e índices de vegetação (IVs). De acordo com os resultados obtidos foi possível caracterizar e constatar diferenças entre os períodos de estudo, exceto para a variável clorofila. Foram detectadas diferenças estatísticas significativas que distinguem para o período chuvoso a cultivar Bourbon das cultivares Catucaí e Catuaí. A caracterização espectral demonstrou proximidade e sobreposição entre os espectros das cultivares em estudo para ambos os períodos de estudo, não sendo possível individualizar as cultivares cafeeiras. Foi possível a estimação de modelo e equação de regressão linear somente para o IAF para as três cultivares estudadas destacando a aplicabilidade de dados obtidos por RPAS em estudos da cafeicultura de precisão.

**Palavras-chave:** Agricultura de Precisão. *Coffea arabica* L. Sensoriamento Remoto.

## ABSTRACT

Brazil is the main producer, exporter and second-largest consumer of coffee in the world and Minas Gerais State with great contribution to the national economic scenario. The application of technologies in the agricultural sector, therefore, optimization in the study, research and intelligent decision making ensuring greater profitability of crops. Thus, the use of electronic devices with embedded sensors to capture aerial photographs of crops, with emphasis on the Remotely-Piloted Aircraft System (RPAS), demonstrates such applicability, through the use of Remote Sensing techniques. In this context, it was initially proposed to survey information of conceptual character and of works developed in the sectors of study to build a theoretical reference for the realization of the proposed objectives. In sequence, the first study proposed to characterize three recently planted coffee cultivars, analyzing their temporal behavior, evidenced by the action of the dry and rainy periods in the development of the plants in the first year of formation in the field, as well as describe the behavior of the spectral profile of the three cultivars for the two periods of study, statistically differentiate the cultivars using the studied variables and estimate linear regression equation between the radiometric data of the vegetation indexes (VIs) and the total chlorophyll data (Chl t) and leaf area index (LAI). The experiment was conducted at Samambaia Farm, located in the municipality of Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, with recently planted coffee (*Coffea arabica* L.) cultivars Catucaí (2SL), Catuaí (IAC 62) and Bourbon (IAC J10) and aged 5 months at the beginning of the work. The images were obtained through RGB and multispectral sensors in Remotely-Piloted Aircraft System (RPAS), collected every two months, from May 2019 to March 2020, as well as height data, crown diameter, chlorophylls, and vegetation indexes (VIs). According to the results obtained, it was possible to characterize and verify differences between the study periods, except for the chlorophyll variable. Significant statistical differences were detected that distinguish for the rainy period the Bourbon cultivar from the Catucaí and Catuaí cultivars. The spectral characterization showed proximity and overlap between the spectra of the cultivars for both periods of study, and it was not possible to individualize the coffee cultivars. It was possible to estimate the model and linear regression equation only for the LAI for the three cultivars studied highlighting the applicability of data obtained by RPAS in precision coffee farming studies.

**Keywords:** Precision farming. *Coffea arabica* L. Remote Sensing.

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Cafeicultura</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Sensoriamento Remoto (SR)</b> .....	<b>13</b>
<b>2.3</b>	<b>Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada-RPAS (<i>Remotely Piloted Aircraft Systems</i>)</b> .....	<b>15</b>
<b>2.4</b>	<b>Aplicações do Sensoriamento Remoto na Cafeicultura</b> .....	<b>17</b>
<b>2.5</b>	<b>Índices de Vegetação (IVs)</b> .....	<b>20</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Índices de Vegetação Sensíveis à Concentração de Pigmentos</b> .....	<b>22</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>26</b>
	<b>SEGUNDA PARTE</b> .....	<b>33</b>
	<b>ARTIGO - CARACTERIZAÇÃO DE CULTIVARES DE CAFÉ RECÉM TRANSPLANTADAS A PARTIR DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO OBTIDOS POR SISTEMA DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA</b> .....	<b>33</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>36</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>37</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>46</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>62</b>

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é atualmente o maior produtor e exportador de café do mundo, sendo Minas Gerais o maior estado produtor do país, com mais de 53% da produção e o Sul de Minas Gerais produz cerca de 30% do café brasileiro. Essa cultura merece, portanto, notoriedade em estudos científicos, uma vez que se refere a uma atividade agrícola de elevada importância econômica para o Brasil. Neste sentido, busca-se o aprimoramento tecnológico na cultura cafeeira, a qual possibilite ganhos de produtividade e rentabilidade das lavouras.

Novas metodologias e tecnologias têm sido utilizadas em vários setores agrícolas como ferramentas de auxílio à tomada de decisão. Dados provenientes de sensores remotos e auxílio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) são utilizados como ferramentas de caracterização, mapeamento, monitoramento, estudo e gerenciamento de propriedades ambientais e agrícolas, pela facilitação de obtenção de informações de caráter periódico com aplicabilidade a diferentes áreas e menores custos se comparados a metodologias tradicionais.

O uso de sistemas embarcados promove o monitoramento e controle em tempo real das atividades no campo, permitindo uma investigação detalhada acerca do que ocorre em ambiente agrícola. O Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada- RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*) constitui uma aplicação típica de um sistema embarcado, em que o piloto não está a bordo, mas controla aeronave remotamente por meio de uma interface digital. Essas tecnologias já são bem consolidadas em culturas anuais, porém para a cultura do cafeeiro ainda são poucas as pesquisas que avaliam a aplicabilidade do RPAS e também as informações que podem ser obtidas na cafeicultura por meio do uso desta tecnologia.

Neste sentido, em contexto agrícola, a cultura do cafeeiro merece destaque no âmbito da aplicabilidade de estudos com utilização de RPAS, sendo o imageamento aéreo de culturas agrícolas uma ferramenta potencial para agricultura de precisão, uma vez que possibilitam a obtenção de resultados importantes para o conhecimento acerca do desenvolvimento da cultura. A versatilidade da utilização de RPAS para mapeamento da lavoura as fazem uma poderosa tecnologia para os estudos da vegetação.

Como forma de realce da variabilidade da lavoura causada pela atuação de diversos fatores externos, os índices de vegetação (IVs) destacam as propriedades da vegetação por meio da reflectância espectral da cobertura vegetal, permitindo o estabelecimento de comparações espectrais e temporais da atividade fotossintética e variações estruturais do dossel, sendo,

contudo, transformada e combinada por meio de combinações matemáticas. Os IVs na lavoura são utilizados para obtenção de informações sobre os parâmetros da vegetação, sendo conhecidos na literatura mais de 150 índices difundidos em estudos.

A utilização de técnicas da cafeicultura de precisão aliado a conceitos de sensoriamento remoto (SR), por meio da aplicação de sensores embarcados, permitem, portanto, o acompanhamento da lavoura de maneira menos invasiva e com maior garantia de novas técnicas de produção para promoção de impactos positivos sobre produtividade, competitividade e qualidade final do produto, além da rapidez na obtenção das informações. Devido à grande importância da cafeicultura para o país, sobretudo no estado de Minas Gerais, torna-se indispensável o seu estudo e acompanhamento com o uso de novas tecnologias, principalmente em lavouras cafeeiras recém transplantadas, uma vez que trata-se de uma cultura perene, em que o desenvolvimento e acompanhamento inicial são de fundamental importância para obtenção de bons resultados futuros.

Neste contexto, objetivou-se inicialmente o levantamento relativo ao referencial bibliográfico, descrito como ‘Primeira Parte’, com enfoque nos conceitos e trabalhos desenvolvidos conforme os diferentes assuntos abordados neste trabalho. Em sequência, referente à ‘Segunda Parte’, o primeiro artigo propõe avaliar o comportamento da variabilidade dos dados aferidos em campo referentes a altura, diâmetro de copa, índice de área foliar (IAF) e teores de clorofila, bem como dos índices de vegetação (IVs) obtidos por RPAS, com sensor embarcado RGB e multiespectrais. Essas avaliações permitirão a caracterização e estudo temporal entre as épocas seca e chuvosa para as três diferentes cultivares cafeeiras recém transplantadas, bem como a caracterização do perfil espectral das cultivares de estudo, a identificação de diferenças estatísticas entre cultivares, a estimação de modelo de regressão linear entre os dados radiométricos proveniente dos índices de vegetação (IVs) aos dados de clorofila total (Chl t) e índice de área foliar (IAF), além da compilação dos dados obtidos para geração de base de dados permitindo comparação em experimentos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste referencial teórico será abordado o tema de sensoriamento remoto- SR aplicado a cultura cafeeira com ênfase na utilização do Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada- RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*) e sua aplicabilidade no contexto de obtenção de Índices de Vegetação- IVs, com explanação de contexto histórico, conceitos e estudos realizados por diferentes autores no contexto agrícola.

### 2.1 Cafeicultura

A chegada do café no Brasil, remonta a data de 1727 no norte do Brasil, em Belém, pelo sargento Mor-Francisco de Mello Palheta trazendo frutos e mudas da Guiana Francesa, conforme pedidos do governador do estado na época (IORI, 2014). Em meados do século 18 o café já representava significativa fonte de renda para o Brasil, sendo o estado de São Paulo considerado o grande produtor na época (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ- ABIC, 2012).

A cafeicultura é uma das atividades de elevada relevância no contexto do território nacional, contribuindo para o crescimento econômico do país e evidenciando destaque para o Brasil como maior produtor de café do mundo (FERRAZ *et al.*, 2017a). Conforme dados da Organização Internacional do Café (ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ - IOC, 2020) o Brasil é o maior produtor mundial de café, seguido pelo Vietnã e Colômbia.

No território nacional a área da cafeicultura é estimada em 1,885 milhões de hectares, com média de produção estimada de 61,6 milhões de sacas beneficiadas, com produção 25% maior que a obtida em 2019, considerando a estimativa de setembro do levantamento da safra de café de 2020 conforme a Companhia Nacional de Abastecimento (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO- CONAB, 2020). O estado de Minas Gerais é destaque na produção de café com estimativa de aproximadamente 33,5 milhões de sacas, seguido pelos estados do Espírito Santo, São Paulo, Bahia (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO- CONAB, 2020).

A cafeicultura brasileira é também importante para o mercado interno, pois além do país ser o maior produtor, refere-se ainda ao segundo maior consumidor de café do mundo (ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ- IOC, 2020). Além do aspecto econômico, a cafeicultura apresenta importante relevância social, uma vez que proporciona geração de empregos no campo com fixação de mão de obra rural (MACIEL, 2001).

O cafeeiro é originário da Etiópia sendo uma planta perene da família *Rubiaceae*, de porte do tipo arbustivo com altura de 2 a 5 metros, de habitat terrestre, com crescimento contínuo e abrange aproximadamente 10 mil espécies agrupadas em mais de 600 gêneros (SAKIYAMA *et al.*, 2015). Ainda conforme o mesmo autor, os solos exigidos para a cultura do cafeeiro são os com boa aeração e drenagem, sendo que em geral os solos bons para as grandes culturas brasileiras também são considerados adequados para a cafeicultura.

O gênero mais conhecido é o *Coffea* com duas principais espécies *Coffea arabica* L. (arábica) e o *Coffea Canephora* Pierre (conilon/robusta), ambas cultivadas para fins comerciais em todo o país. Segundo Carvalho *et al.* (2007) conforme levantamento da Embrapa Consórcio Pesquisa Café a espécie arábica tem teor de cafeína relativamente baixo (0,9 a 1,5%), produz frutos redondos, bebidas suaves, levemente amargos, cor achocolatada, crosta lisa e perfume intenso e o conilon refere-se a uma espécie mais resistente e produtiva que a arábica, possui grãos menos perfumados e a quantidade de cafeína é maior (2% e 4,5%).

No que diz respeito ao clima, a planta é indicada para localidades de clima tropical chuvoso com temperaturas amenas, não suportando geadas e nem temperaturas acima de 34°C (SEDIYAMA *et al.*, 2001). O regime de chuvas ideal para o café é encontrado em regiões com chuvas bem distribuídas durante todo o ano e com uma precipitação entre 600 e 1500 mm/ano (SAKIYAMA *et al.*, 2015). Segundo Ferreira *et al.* (2012) o intervalo ideal de temperatura do arábica refere-se de 18° a 22°C, e altitude entre 450 a 800 metros e para o conilon se desenvolve melhor com um intervalo ideal de temperatura de 22° a 26°C e altitude recomendada de até 450 metros.

Apesar das recomendações indicadas em literatura sabe-se que o cultivo de café no Brasil ocorre em diversidade de clima, solo, relevo, características fisiológicas, infestações fitossanitárias, manejo dentre outras características (FERRAZ *et al.*, 2012a). A diversidade destes fatores influencia fortemente, por sua vez, a produtividade da lavoura, resultando em diminuição na rentabilidade do produtor rural.

Como forma de controle e otimização da lavoura, a modernização da produção agrícola incentiva a adoção de novas práticas agrícolas chamada de Agricultura de Precisão, que no contexto da cultura do cafeeiro, Alves *et al.* (2006) introduziram a denominação de Cafeicultura de Precisão e conforme Ferraz *et al.* (2012b) define-se como:

Conjunto de técnicas e tecnologias capaz de auxiliar o cafeicultor a manejar sua lavoura, baseando-se na variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta, visando a maximizar a rentabilidade, a aumentar eficiência da adubação, pulverização e colheita, culminando na elevação da produtividade e da qualidade final do produto.

A Cafeicultura de Precisão vem sendo objeto de pesquisa de diversos estudos e com diferentes enfoques. Andrade *et al.* (2018), Ferraz *et al.* (2017b) Ferraz *et al.* (2019), Kamimura *et al.* (2013) e Silva *et al.* (2008) estudaram a variabilidade espacial das características químicas e físicas do solo em lavouras cafeeiras. Ferraz *et al.* (2012c), Ferraz *et al.* (2017a), Figueiredo *et al.* (2017) estudaram a variabilidade espacial de atributos da planta e Ferreira *et al.* (2003), Franklin *et al.* (2017) e Marin *et al.* (2019) estudaram infestações de pragas e doenças.

No estudo da cafeicultura, devido à dificuldade em se obter o preciso mapeamento do campo, visto a grande extensão de áreas destinadas ao plantio e produção para consumo interno e exportação, requer disponibilidade de mão-de-obra qualificada para acompanhamento e vistoria das plantas e com isso exige grande demanda em tempo e conseqüentemente aumento nos custos. O estudo do café recém transplantado é importante, uma vez que os tratamentos, manejos culturais e o comportamento da planta nesta etapa inicial serão cruciais para seu desenvolvimento futuro e conseqüentemente a produtividade da lavoura. Deste modo, a utilização de dados de SR são promissores e aplicáveis neste âmbito de estudos e desenvolvimento da cultura cafeeira (BERNARDES *et al.*, 2012).

## 2.2 Sensoriamento Remoto (SR)

O sensoriamento remoto (SR) refere-se à ciência que busca o desenvolvimento de obtenção de imagens da superfície terrestre com base na detecção e medição das respostas eletromagnéticas sem contato físico com o material por meio de instrumentos localizados em plataformas de satélites ou aeronaves (JENSEN, 2009). A análise posterior da informação se dá por meio visual ou via processamento digital.

A origem do SR está vinculada ao surgimento da fotografia aérea para fins bélicos, com auge no lançamento do primeiro satélite a órbita, o ERTS-1, posteriormente renomeado para Landsat 1, colocado em órbita em 1972 (ADMINISTRAÇÃO NACIONAL DA AERONÁUTICA E ESPAÇO- NASA, 2018). Estende-se aos dias atuais caracterizado por multiplicidade de sistemas sensores no processo de transformação da energia registrada para a obtenção de informações relevantes (NOVO, 2010). Destaca-se ainda por esforço multidisciplinar em diversas áreas, em que juntamente com o geoprocessamento referem-se a técnicas fundamentais para auxílio e manutenção de registros para diversas finalidades de uso ao longo do tempo (CAMPOS *et al.*, 2004).

Com relação a aplicação de técnicas de SR, o conjunto dos produtos gerados no processamento de dados refere-se a informações de alta complexidade de composição, de

elevada resolução espacial e espectral (FRANCISCO;ALMEIDA, 2012). O uso destas tecnologias vem ganhando destaque evidenciado pela grande gama de aplicabilidade em diferentes cenários e ambientes de estudo pelo mapeamento detalhado da superfície terrestre (AMARAL *et al.*, 2009).

O processo físico de obtenção de dados por meio de técnicas do SR utiliza a tecnologia de sensores para a detecção e classificação de objetos na Terra por meio da interação da radiação eletromagnética (REM) e os alvos desejados (PEREIRA *et al.*, 2017). Os sensores utilizados para a aquisição de sinais, para posterior interpretação de dados, captam e registram a radiação na forma de energia eletromagnética emitida/refletida pelo objeto de estudo, em função de seu comprimento de onda (TRENTIN, 2009).

Por meio da refletância dos objetos a informação obtida será posteriormente transformada em sinal passível de interpretação de dados, demonstrando as características físicas e químicas dos objetos de estudo, por meio do comportamento espectral dos alvos, em determinados comprimentos de onda, foco do SR (GUEDES;SILVA, 2018). A detecção dos alvos é dada por sensores sensíveis a identificação de diversas bandas do espectro do visível e não-visível.

As variações de energia eletromagnética da área observada podem ser coletadas por sistemas sensores imageadores ou não-imageadores. Os imageadores fornecem como produto uma imagem da área observada enquanto os não-imageadores fornecem dígitos ou gráficos como produto final (FLORENZANO, 2011). Os sistemas sensores podem ser classificados como passivos ou ativos. Os passivos não possuem fonte própria de energia eletromagnética, sendo dependentes de fontes externas, como por exemplo a radiação solar já os ativos possuem sua própria fonte de energia eletromagnética, utilizam, portanto, uma REM artificial (MOREIRA, 2001).

As características dos sensores se relacionam por sua vez com as resoluções do tipo espacial, espectral, radiométrica e temporal (GUEDES;SILVA, 2018). A resolução espacial refere-se à capacidade do sensor em distinguir objetos, sendo indicadora do tamanho do menor elemento a ser individualizado pelo sensor e dependente do detector, com relação ao tamanho do pixel (MOREIRA, 2001). A resolução espectral trata da largura espectral operante do sensor, sendo que define o intervalo espectral de realização de medidas (GALO, 2002). A resolução radiométrica define a eficiência do sistema na detecção de pequenos sinais, refere-se, portanto, à maior ou menor capacidade do sistema em detectar energia resposta dos elementos que compõe a cena, com base na faixa de valores numéricos associados aos pixels (FLORENZANO, 2011). Já a resolução temporal se relaciona com a repetitividade com que o

sistema sensor pode adquirir informações referentes ao objeto (MARINHO, 2014).

Existem atualmente diversos sensores que podem ser utilizados para a obtenção de imagens conforme o foco de estudo. Entre as mais usuais, citam-se sensores RGB, NIR, multiespectrais, hiperespectrais e termais. Os do tipo RGB captam imagens em cores primárias do espectro do visível, *Red* (Vermelho), *Green* (Verde) e *Blue* (azul), ou seja imagens convencionais; o *Nir* também chamado por *Near Infrared*, captam na faixa do infravermelho próximo, sendo importante para o sensoriamento na agricultura; os multiespectrais ou hiperespectrais são câmeras com múltiplos sensores, com filtros de alta qualidade, específicos para captação de diversos formatos de ondas refletidas; e os termais detectam radiação térmica permitindo a visualização da imagem com diferentes leituras de faixa de calor (JENSEN, 2009).

Os sensores de coleta de dados da superfície terrestre podem estar localizados por sua vez em satélites, denominados sistemas sensores orbitais, em dispositivos de uso em ambiente terrestre sub-orbital, por veículos aerotransportadores como aeronaves, balões e foguetes, ou na própria superfície terrestre utilizando-se radiômetros ou espectralradiômetros, elevando portanto a disponibilidade de informações sobre a superfície terrestre (CANDIDO, 2012). Devido a disseminação de sensores remotos do tipo sub-orbitais, no qual cita-se o Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada- RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*), vários estudos vêm sendo conduzidos com a utilização desta tecnologia, a qual garante melhor resolução (espacial, temporal, espectral e radiométrica) e versatilidade na disposição de diferentes tipos de sensores.

### **2.3 Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada- RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*)**

As Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs) também conhecidas popularmente como Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) e Drones (do termo ‘zangão’ em inglês) referem-se a tecnologia que vem ganhando destaque nos últimos tempos (BERETTA et al., 2018). Conforme descrito pelo “Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial - ANAC - RBAC nº 94” (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO- ANAC, 2017) a nomenclatura RPA refere-se às Aeronaves Remotamente Pilotadas que são aeronaves não tripuladas utilizadas para fins como experimentais, comerciais ou institucionais já os aeromodelos são as aeronaves não tripuladas remotamente pilotadas usadas para recreação e lazer.

Segundo Santos *et al.* (2019) o conceito do Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada (RPAS) leva em consideração a integração do veículo aéreo bem como o sensor acoplado na aeronave, sendo, portanto, mais efetivo em estudo para a geração de produtos a serem utilizados para tomada de decisão inteligente, se diferenciando da RPA que considera somente o veículo aéreo em si.

Como características as RPAs possuem peso leve, boa autonomia de bateria, versatilidade de sensores a serem acoplados, consolidando-se como uma nova forma de obtenção de parâmetros de qualidade espacial, espectral e temporal (SOBRINHO *et al.*, 2018). Diferem-se, portanto, das “Aeronaves Autônomas” que uma vez programadas, não permitem intervenção externa durante a realização do voo.

Essa tecnologia foi intensamente desenvolvida para aplicações civis durante as primeiras décadas de sua utilização (VALAVANIS, 2007). A primeira adaptação de aeronave para controle guiado surgiu em 1988 com fins de destruição ao território inimigo, levando a criação do RP-1 (BRASIL, 2011). No contexto agrícola, o primeiro voo de aeronave foi relatado no ano 1921, quando uma praga agrícola atacou uma área de reflorestamento sendo as autoridades do governo americano convencidos por entomologistas a usarem o método para aplicação de arsenato de chumbo (RASI, 2008). Segundo o mesmo autor, a aviação agrícola no Brasil iniciou-se somente em 1947, no Rio Grande do Sul, com a aeronave Muniz M-9, devido ao ataque de uma praga de gafanhotos nas proximidades de Pelotas. Atualmente no setor agrícola a introdução do RPAS proporciona grandes benefícios na gestão das atividades do campo, uma vez que tais plataformas agem como “um olho no céu” sendo vislumbrado como a “nova revolução no campo” (RODRIGUEZ *et al.*, 2012).

Em maio de 2017 a ANAC aprovou o regulamento especial para utilização de aeronaves não tripuladas o “Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial - ANAC - RBAC nº 94” (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO- ANAC, 2017) com objetivo de tornar viáveis as operações de tais equipamentos, preservando a segurança das pessoas ao considerar o nível de complexidade e de risco envolvido nas operações e nos tipos de equipamentos.

As RPAs são classificadas de acordo com suas características técnicas, como aerodinâmica, tamanho, dinâmica de voo, dentre outras, sendo subdivididos em 5 classes: asa fixa, asa-rotativa (multirotores), blimps (balões de ar), flapping-wing (batedores de asa) e híbridos. Ainda, duas classes são comumente mais conhecidas, os de asa fixa e os multirotores. Ambos são utilizados para levantamento de dados geográficos, porém cada um com suas especificidades de acordo com sua arquitetura (SOUSA, 2017). Conforme Alves Junior (2015) as RPAs de asa fixa se classificam como “aeronaves com asas fixas que exigem

uma pista para decolagem e pouso, ou uma catapulta no caso do lançamento” já os multirotores como “aeronaves com asas rotativas (hélices), pouso e decolagem na vertical, sendo que possuem a capacidade de pairar no ar e alta capacidade de execução de manobras”.

Ambos os modelos apresentam vantagens e desvantagens, sendo que os multirotores possuem maior versatilidade de voo e aterrissagem, uma vez possuem capacidade de planar e voar verticalmente sendo útil para decolagem em áreas menores, já os de asa fixa possuem maior tempo de autonomia de voo sendo, portanto ideal para levantamento aéreo mais longo (SANTOS *et al.*, 2019). Apesar de possuírem muitas vantagens interessantes para sua utilização, questões como estabilidade na disposição e carregamento de sensores, sensibilidade e potência dos motores, autonomia de bateria e questões ambientais como ventos e chuvas são desvantagens para esta tecnologia (SOUSA, 2017).

Contudo, independentemente do tipo de aeronave escolhida para operação, estas devem atender os regulamentos dos órgãos reguladores das localidades em que estão sendo operadas. Existem portanto autorizações e documentos para o uso do espaço aéreo que devem atender ao Art. 14 §4º da Lei 7.565, Código Brasileiro de Aeronáutica (CBA) (BRASIL, 1986) para a coordenação e segurança operacional conforme exigências previstas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), Secretaria da Receita Federal ou outros órgãos ligados ao assunto.

## **2.4 Aplicações do Sensoriamento Remoto na Cafeicultura**

As técnicas de SR são largamente aplicáveis na área agrícola, como técnica que permite o monitoramento de culturas agrícolas ao longo de seu ciclo de desenvolvimento (GAO *et al.*, 2017). Nesse sentido muitos são os produtos utilizados no monitoramento e controle das mais diversas culturas agrícolas, agindo, portanto, desde a detecção e prevenção de pragas e doenças, até a previsão de safras (CAMPBELL, 1987).

A produção de cenários acerca das condições das culturas por meio da visibilidade em imagens orbitais e sub-orbitais permitem a análise em intervalos regulares e inferiores a duração da safra, produzindo informações com elevado valor por meio de mapas como produto final (MCROBERTS, 2011). Os produtos gerados podem ser utilizados como base de dados importante para os envolvidos na cadeia de produtores agrícolas.

No setor agrícola, o SR, bem como a aplicação direta como tecnologia na Cafeicultura de Precisão, permite o acompanhamento praticamente em tempo real das informações das

lavouras (EBERHARDT *et al.*, 2015) podendo contribuir para a produtividade sem o comprometimento dos recursos naturais disponíveis. Possibilitam, portanto, a obtenção de informações acerca da área ocupada, de sua localização, bem como as respostas espectrais das culturas ali instaladas, estudo de índices de vegetação, permitindo o reconhecimento de problemas especiais incomuns a outros setores econômicos (ATZBERGER, 2013).

Devido ao grande investimento para a implantação de uma lavoura cafeeira, as mesmas requerem estratégias de monitoramento bastante confiáveis e com garantia de maiores produtividades, evidenciadas por controle de doenças, pragas, estresse hídrico e nutricional, com vistas a retribuição ao valor econômico das lavouras (CHEMURA *et al.*, 2017a) aliado a utilização de meios tecnológicos para maior eficiência das lavouras.

No contexto da cafeicultura o uso do SR já vem sendo aplicado a bastante tempo. Inicialmente os resultados obtidos no mapeamento da cafeicultura por SR, independentemente do procedimento adotado, foram desanimadores quando as imagens de satélites derivavam menores resoluções espaciais (MOREIRA *et al.*, 2008). O estudo se baseava em análise estritamente visual se desdobrando ao desenvolvimento de métodos de base na análise automática de imagens (CAETANO *et al.*, 2002).

Os primeiros estudos da aplicação desta tecnologia à cafeicultura remonta estudo de Epiphanyo *et al.* (1994) em que foram utilizadas imagens do sensor TM/Landsat-5 e dados coletados em campo para avaliação da influência dos parâmetros culturais do café sobre sua resposta espectral, evidenciando influência predominante de parâmetros de altura de planta e porcentagem de cobertura do terreno, com relação na resposta espectral do dossel do cafeeiro.

O estado de Minas Gerais teve sua área cafeeira mapeada manualmente com base em imagens provenientes do sensor TM/Landsat-5 para o ano de 2006 (MOREIRA *et al.*, 2008), com dificuldades de identificação encontradas entre áreas cafeeiras com áreas de cerrado e eucalipto. Em estudos de Vieira *et al.* (2006) a definição do padrão de identificação para a cafeicultura foi mais difícil que para outras culturas agrícolas devido as características da cultura a qual apresenta grande variabilidade entre as lavouras e sobreposição espectral com áreas de mata.

Machado *et al.* (2010) encontraram dificuldades com o uso de imagens na discriminação dos alvos devido ao efeito do sombreamento, ao relevo muito montanhoso da região e à similaridade espectral das coberturas, principalmente entre as classes de uso de café e mata, sendo o mapeamento entre a imagem classificada e a fotointerpretação considerada de regular a fraca na região das “Matas de Minas”.

Deste modo, conforme evidenciado por Marujo *et al.* (2017), as dificuldades no

mapeamento automático de áreas cafeeiras por meio de imagens orbitais, normalmente se explicam pela: semelhança no comportamento espectral do café com outras fisionomias, a variação em função de fatores da planta (sanidade, estado nutritivo e variedade), dos tratamentos culturais e manejo da cultura, do sombreamento proporcionado por seu cultivo em áreas montanhosas, mas também devido ao ciclo fenológico da planta, como evidenciado nos estudos precitados.

A classificação manual quando aplicada às grandes áreas torna-se inviável sendo os métodos de classificação automática uma alternativa de utilização. Andrade *et al.* (2011) e Girolamo Neto *et al.* (2015) incorporam o uso de atributos texturais para melhor identificar as áreas cafeeiras em áreas declivosas. A metodologia computacional de mineração de dados se apresentou alto potencial de aplicação, com utilização de diferentes técnicas de classificação, nas quais citam-se redes neurais (ANDRADE *et al.*, 2013), árvores de decisão (DELGADO *et al.*, 2012) e máquinas de vetores de suporte (BISPO *et al.*, 2014).

Dentre várias aplicações do uso das técnicas de SR na cafeicultura destacam-se o estudo de estimativa de produtividade de lavouras, como visto por Rosa *et al.* (2010) com a variável espectral de entrada índice de área foliar (IAF) para o cálculo da produtividade máxima. Volpato *et al.* (2011) demonstraram o grande potencial para o monitoramento da fenologia e produtividade de lavouras cafeeiras associadas à ocorrência de estresse hídricos e/ou de ocorrência de adversidades climáticas, na região de Três Pontas, sul de Minas Gerais.

Ademais, o SR foi utilizado na caracterização e monitoramento espectral de café especiais no sul de Minas Gerais, especificamente a região de Mantiqueira de Minas, uma das mais importantes regiões para a produção de cafés especiais no Brasil, conforme estudo de Alves *et al.* (2016); na avaliação do desempenho da classificação baseada em ao mapear lavouras de café representando três estágios fenológicos do café: frutificação, granação e repouso conforme estudo de Marujo *et al.* (2017); no acometimento por doenças, conforme exposto por Marin *et al.* (2019), ao correlacionar análises de folhagem da planta, incidência de doença e severidade a 15 índices de vegetação derivados de imagens multiespectrais constatando potencial de identificação e monitoramento de culturas afetadas pela ferrugem bacteriana do café em fazenda localizado no Sul de Minas Gerais; entre outras aplicações.

A renovação das plataformas de imageamento fazem com que a adoção de novas tecnologias englobe o setor agrícola. Uma alternativa viável à aplicação de estudos na cafeicultura refere-se ao uso da fotografia aérea, por meio de dispositivos RPAS, empregados como referência ao campo devido a sua maior resolução espacial e temporal, as quais garantem maior riqueza de detalhes, bem como a facilidade e flexibilidade de acesso a coleta de

informações de interesse de estudo.

No contexto da cafeicultura estudos pioneiros de Herwitz *et al.* (2004) evidenciam a aplicabilidade de RPAS movido a energia solar para monitoramento agrícola de área cafeeira no Havaí, por meio de imagens multiespectrais, para estudos do comportamento da cultura e identificação de falhas na lavoura. Johnson *et al.* (2004) desenvolveram um índice médio de amadurecimento de café, por meio de fotografias aéreas capturadas por RPAS no ano de 2002, com correlação significativa com base em coletas de campo evidenciando a aplicabilidade de um método alternativo e mais abrangente para monitoramento de maturação dos frutos e tomada de decisão para colheita.

Em estudos mais recentes, Chemura *et al.* (2017b) testaram a capacidade de imagens multiespectrais para avaliação do teor de água da planta, por meio do uso de algoritmos, como forma de detecção e monitorização do stress hídrico; Oliveira *et al.* (2018) utilizaram sensores RGB de alta resolução acoplados a um RPA no Sudeste do Brasil para detecção de falhas em áreas plantadas de café, por meio de operadores morfológicos, com identificação individual e comprimento total das falhas, sendo o método proposto confiável para identificação com precisão de falhas nas linhas de plantio de café; Santana (2019) avaliou a qualidade de duas técnicas de plantio em terrenos de alta declividade por meio de controle estatístico de processo (CEP) de dados obtidos remotamente por RPAS no município de Bom Sucesso na região dos Campos das Vertentes de Minas Gerais; Santos *et al.* (2020) propuseram um modelo para estimar medidas indiretas de parâmetros de altura e diâmetro de copa de cafeeiros utilizando dados detectados por RPAS.

## 2.5 Índices de Vegetação (IVs)

No contexto agrícola, as propriedades da reflectância, por meio dos produtos do SR, podem ser avaliadas por meio de combinações das diferentes bandas espectrais produzindo os índices de vegetação (IVs) (BERNARDI *et al.*, 2014). Segundo Atzberger (2013) os sistemas de monitoramento agrícola a partir da utilização de sensores remotos devem ser suficientes para fornecimento de informações adequadas sobre a produção agrícola sendo os IVs utilizados na obtenção de informações primordiais para tomada de decisão inteligente.

Os fatores bióticos e abióticos afetam a refletância espectral das culturas uma vez que proporcionam mudanças biofísicas e bioquímicas capturadas pelos sensores (MAHAJAN *et al.*, 2014). O comportamento apresentado por meio da refletância espectral, entretanto, não pode ser explicado somente pelas características intrínsecas da vegetação, devendo ainda incluir a

interferência de outras variáveis, como por exemplo, fonte de radiação, reflectância do solo, espalhamento atmosférico, características do dossel e da própria folha, teores de umidade, sombra, entre outros fatores (PONZONI;SHIMABUKURO, 2010). Neste contexto, para o realce da variabilidade causada por fatores externos, surgem os IVs, os quais combinam e transformam a resposta da reflectância espectral de culturas em valores numéricos, possibilitando o estudo e modelagem de dados espectrais em conjunto com outras informações interessantes de estudo.

Os IVs são medidas radiométricas adimensionais as quais indicam a abundância relativa e atividade da vegetação (JENSEN, 2011; PONZONI;SHIMABUKURO, 2010) sendo normalmente utilizados como indicadores úteis na agricultura. Estes índices baseiam-se no comportamento espectral da vegetação e são normalmente utilizados para obtenção de características dos vegetais (JENSEN, 2011). Inúmeros IVs já foram desenvolvidos para diferentes finalidades. Com intuito da investigação e acompanhamento direto da variabilidade da lavoura os IVs têm sido aplicados ao contexto da cafeicultura provenientes de sensores orbitais.

Coltri *et al.* (2013) investigaram a relação entre IVs de imagens de alta resolução e propriedades biofísicas do café, incluindo biomassa seca e carbono, com utilização de medidas de campo simples sem recorrer a métodos destrutivos, sendo constatada forte correlação entre Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação Rácio (RVI), Índice de Vegetação Verde (GVI) e biomassa seca permitindo estimar estoque de carbono em lavouras cafeeiras, e verificado correlação entre o RVI e índice de área da planta de café.

Chemura *et al.* (2018) aplicaram o mapeamento da variabilidade espacial do nitrogênio foliar por meio das relações com os Índice de Clorofila Invertida (IRECI), Índice de Diferença Normalizada Relativa (RNDVI) e Índice de Diferença Normalizada (NDVI), sendo determinado que as combinações por meio dos IVs produziram bons resultados na modelagem foliar do café.

Katsuhama *et al.* (2018) utilizaram IVs para a discriminação de áreas infestadas por ferrugem comparada e validada com resultados amostrados em campo, permitindo o controle em estágio inicial contra a infecção, evidenciando a aplicabilidade ao monitoramento de outras doenças na atividade cafeeira.

Putra e Soni (2018) identificaram com uso de câmera digital simples (RGB) a possibilidade de estimar rápido e precisamente teores de clorofila nas folhas, carotenoides e nitrogênio crítico em cafeeiro robusta a partir de medição de folhas diretas, sendo desenvolvidos e avaliados vários IVs por meio de experimentos de campo, validados com dados obtidos de

diferentes ferramentas como espectrofotômetro e medidos de clorofila, bem como a câmera digital.

A tecnologia da obtenção de IVs por meio de imagens sub-orbital, com captação por sensores acoplados a RPAS ainda é escassa, principalmente na aplicabilidade da cafeicultura de precisão, sobretudo em estudos em cafeeiros recém transplantados. Os resultados, entretanto, garantem maior precisão se comparado aos produtos obtidos por meio de imagens orbitais, devido a sua melhor resolução espacial e temporal. Deste modo, a aplicação do mapeamento do IVs por meio de RPAS no contexto da cafeicultura é incipiente, porém possibilita avanços importantes para este setor agrícola que é tão importante para a economia do país.

### **2.5.1 Índices de Vegetação Sensíveis à Concentração de Pigmentos**

Dentre os vários IVs encontrados na literatura, calculados pela combinação de bandas espectrais que retratam a interpretação acerca do comportamento e desenvolvimento de culturas, no caso específico deste estudo a cultura cafeeira, eles atuam fundamentalmente para compreender o funcionamento intrínseco das propriedades que afetam a medição da reflectância da cultura, bem como suas respostas aos valores obtidos pelos IVs.

A folha é o principal órgão absorvedor de radiação eletromagnética, sendo seu comportamento função de sua composição, morfologia e estrutura interna. As características marcantes ao espectro da folha se refere a alta absorção dos comprimentos de onda do ultravioleta, azul e vermelho, baixa absorção nos comprimentos de onda do verde e muito baixa absorção no comprimento de onda do infravermelho próximo, sendo a arquitetura da folha função estratégica da absorção de energia que afeta fortemente produção fotossintética da planta (KÄFER *et al.*, 2016).

A recepção de energia por uma planta ocorre pela captação e absorção da radiação solar luminosa, que quando convertida em energia química pelo processo de fotossíntese, proporciona manutenção e sobrevivência da planta (MESCHÉDE, 2011). Isto ocorre por intermédio de estruturas internas das folhas, as quais são primordiais para o funcionamento do processo, com destaque para o mesófilo, o qual contém os cloroplastos e os pigmentos cloroplastídicos, sendo fundamentais ao desenvolvimento e eficiência fotossintética das plantas e conseqüentemente ao crescimento e adaptabilidade a diversos fatores ambientais (OLIVEIRA, 2013). Salienta-se, entretanto, que a capacidade das plantas em captar energia luminosa não depende apenas das folhas individuais, mas também a integração de cada folha em um dossel eficaz (GIVNISH;MONTGOMERY, 2014).

Os pigmentos envolvidos no processo de fotossíntese são as clorofilas *a* (Chl *a*) e *b* (Chl *b*) e os carotenoides (Cn). A clorofila *a* (Chl *a*) têm função na coleta da energia contida nos fótons provenientes da luz solar para redução do CO<sub>2</sub> atmosférico a carboidratos (SENIGE *et al.*, 2006) promovendo a manutenção da planta. Já a clorofila *b* (Chl *b*) e os carotenoides (Cn) referem-se aos pigmentos acessórios, atuando no auxílio da absorção de luz e na transferência da energia radiante para os centros de reação (TAIZ;ZIEGER, 2009).

Os pigmentos cloroplastídicos absorvem energia de uma faixa ampla de comprimentos de luz, porém cada pigmento absorve apenas comprimentos de onda específicos para sua atuação, enquanto refletem os demais comprimentos de onda (PONZONI;SHIMABUKURO, 2007). No caso da clorofila *a* (Chl *a*) e clorofila *b* (Chl *b*) ambas absorvem comprimentos de onda azul e vermelho e ambas refletem o comprimento de onda do verde. Já os caratenoides (Cn) absorvem comprimentos de onda luz violeta e azul-esverdeada e refletem as demais (JENSEN, 2009).

Deste modo, os teores de clorofilas e caratenoides nas folhas são utilizados para estimar o potencial fotossintético nas folhas das plantas, uma vez que estão diretamente relacionados a absorção e transferência da energia luminosa, trazem consigo informações importantes sobre o desenvolvimento e crescimento de plantas a diferentes estágios fenológicos e condições ambientais. Portanto, a composição e os teores dos pigmentos foliares podem ser utilizados como parâmetros indicativos de estresse nas plantas (CODOGNOTTO *et al.*, 2002) resultando em respostas importantes para o entendimento do desenvolvimento da cultura.

A metodologia clássica de mensuração das clorofilas e caratenoides das folhas das plantas é resultante de coleta destrutiva da planta (MIELKE *et al.*, 2012). Por este modo a utilização de sensores portáteis medidores de pigmentos fotossintéticos e técnicas de SR aliado a utilização de IVs são interessantes, pois mantém a integridade da planta e produzem, na maioria das vezes bons resultados, uma vez que parte do pressuposto da utilização das características espectrais dos pigmentos cloroplastídicos.

Entre os IVs que realçam as características dos componentes dos pigmentos destacam-se neste estudo o Índice De Vegetação Da Diferença Normalizada (NDVI), Índice De Rededge Por Diferença Normalizada (NDRE), Índice De Refletância Da Absorção De Clorofila Modificada 1 (MCARI1), Índice De Clorofila Red Edge (CI) e Índice De Cobertura Verde (GCI), que utilizam bandas específicas que são especialmente sensíveis às variações de conteúdo de cor da vegetação e auxiliam no estudo da refletância de massas de plantas com base em seu conteúdo para aplicações práticas baseadas na agricultura de precisão, conforme descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Índices de vegetação utilizados, seguido por suas siglas, equações e referências

ÍNDICE DE VEGETAÇÃO	SIGLA	EQUAÇÃO	REFERÊNCIA
Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	NDVI	$(R_{NIR} - R_R) / (R_{NIR} + R_R)$	Rouse <i>et al.</i> (1973)
Índice da Diferença Normalizada- Red Edge	NDRE	$(R_{NIR} - R_{REG}) / (R_{NIR} + R_{REG})$	Buschmann e Nagel (1993)
Primeira Modificação ao Índice de Relação de Absorção de Clorofila	MCARI1	$1,2[2,5(R_{NIR} - R_R) - 1,3(R_{NIR} - R_G)]$	Haboudane <i>et al.</i> (2004)
Índice de Clorofila Red Edge	CI	$(R_{NIR} / R_{REG}) - 1$	Gitelson <i>et al.</i> (2003)
Índice do Conteúdo de Clorofila no Dossel	GCI	$(R_{NIR} / R_G) - 1$	Gitelson <i>et al.</i> (2005)

Legenda:  $R_{NIR}$ , valores de refletância obtidos pelo sensor na faixa do infravermelho próximo;  $R_{REG}$ , refletância na faixa entre o vermelho e o infravermelho (vermelho limítrofe);  $R_R$ , refletância da faixa do vermelho;  $R_G$ , refletância da faixa do verde.

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) foi proposto por Rouse *et al.* (1973) sendo frequentemente utilizado para medir a intensidade de atividade clorofiliana, inclusive visando comparação entre períodos distintos. É sensível a presença de vegetação sadia, ou seja, diminui a resposta de reflectância da banda do vermelho (devido a absorção da clorofila) e aumenta na banda do infravermelho próximo (devido ao espalhamento pelos tecidos da folha) fazendo com que os alvos sejam facilmente detectáveis, variando de -1 a 1, com considerações nesta escala de solo descoberto ou plantas mortas até plantas saudáveis (BERNARDI *et al.*, 2014).

O NDRE (*Normalized Difference Red Edge Index*) foi proposto por Buschmann e Nagel (1993) sendo semelhante ao NDVI, porém a banda no vermelho é substituída pela banda do vermelho limítrofe. Ao utilizar a banda específica de transição entre o vermelho e o infravermelho próximo, o vermelho limítrofe representa uma área exponencial de reflectância entre tais bandas e, portanto, evita a saturação e a perda da sensibilidade para valores de clorofila, sendo por este motivo indicado para percepção da transição de plantas saudáveis às inicialmente estressadas (HATFIELD *et al.*, 2008).

O MCARI1 (*Modified Chlorophyll Absorption In Reflectance Index 1*) foi proposto por Haboudane *et al.* (2004) com objetivo de reduzir a variabilidade da radiação fotossinteticamente ativa devido à presença de diversos materiais não fotossintetizantes, uma vez que considera as profundidades das folhagens no dossel na determinação das taxas de absorção realizadas pela clorofila. Segundo os autores que propuseram o índice a modificação ocorreu com a integração

do comprimento de onda no infravermelho próximo para aumentar a sensibilidade às alterações do IAF e refletindo uma medida da profundidade de absorção de clorofila.

O CI (*Red Edge Chlorophyll Index*) foi proposto por Gitelson *et al.* (2003) sendo utilizado para estimar o teor de clorofila em folhas e permite a identificação de mudanças no conteúdo de clorofila, uma vez que produzem grandes diferenças de reflectância e transmitância das folhas permitindo o estudo do comportamento da vegetação (GITELSON, 2005) ao considerar duas bandas espectrais importantes no estudo do comportamento vegetativo (infravermelho próximo e vermelho limítrofe).

O GCI (*Green Coverage Index*) foi proposto por Gitelson *et al.* (2005) e concentra-se também em estimar o conteúdo de clorofila, unicamente nas massas vegetais, através das bandas do verde e infravermelho próximo, podendo por meio deste índice estudar o desenvolvimento fenológico de culturas. O teor de clorofila demonstra o estado fisiológico da vegetação uma vez que reduz em plantas estressadas sendo, portanto, uma medida da saúde das plantas (STREIT, 2005).

Portanto a utilização de IVs para o monitoramento periódico da lavoura produz estudos com informações de fundamental importância para o setor agrícola, uma vez que permitem a rastreabilidade da variabilidade da saúde e desenvolvimento da lavoura, bem como proporciona a identificação de anomalias e falhas na vegetação que servem de base na determinação de condutas a serem adotadas para controle e solução de tais problemas.

## REFERÊNCIAS

- ABIC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ. **A história do café, origem e trajetória.** Disponível em <<http://abic.com.br/cafè-com/historia/>>. Acesso em: 01 nov. 2018.
- ALVES JÚNIOR, L. R. **Análise de produtos cartográficos obtidos com câmera digital não métrica acoplada a um Veículo Aéreo Não Tripulado em áreas urbanas e rurais no Estado de Goiás.** 114 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.
- ALVES, E. A. *et al.* **Cafeicultura de precisão: Boas práticas,** Viçosa, p. 189-223, 2006.
- ALVES, H. M. R. *et al.* Geotechnologies For The Characterization Of Specialty Coffee Environments Of Mantiqueira De Minas In Brazil, Int. Arch. **Photogrammetry. Remote Sensing,** Spatial Inf. Sci., XLI-B8, p. 797-799, 2016.
- AMARAL, M. V. *et al.* Avaliação E Comparação De Métodos De Classificação De Imagens De Satélites Para O Mapeamento de Estádios de Sucessão Florestal. **Revista Árvore,** Viçosa-MG, v.33, n.3, p.575-582, 2009.
- ANAC - AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial.** RBAC –E nº 94, 2017. Disponível em: <[https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94/@@display-file/arquivo\\_norma/RBACE94EMD00.pdf](https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf)>. Acesso em: Acesso em: 01 nov. 2018.
- ANDRADE, A. D. *et al.* Spatial Variability of Soil Penetration Resistance In Coffee Growing. **Coffee Science,** Lavras, v. 13, n. 3, p. 341-348, 2018.
- ANDRADE, L.N. Aplicação de redes neurais artificiais na classificação de áreas cafeeiras da região de Machado (MG). **Coffee Science,** v.8, n.1, p.78-90, 2013.
- ANDRADE, L.N. **Redes Neurais Artificiais aplicadas na identificação automática de áreas cafeeiras em imagens de satélite.** 87p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Departamento de ciência da computação, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- ATZBERGER, C. Advances in Remote Sensing of Agriculture: Context Description, Existing Operational Monitoring Systems and Major Information Needs. **Remote Sensing,** p. 949-978, 2013.
- BERETTA, *et al.* Topographic modelling using UAVs compared with traditional survey methods in mining. REM, **International Engineering Journal,** Ouro Preto, 71(3), p. 463-470, 2018.
- BERNARDES, T. *et al.* Monitoring biennial bearing effect on coffee yield using MODIS remote sensing imagery. **Remote Sensing,** 2012.
- BERNARDI, A. C. C.; *et al.* **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar.** Brasília, DF: Embrapa, 2014.

BISPO, R. C. *et al.* Using fraction images derived from modis data for coffee crop mapping. **Engenharia Agrícola**, v.34, n.1, p.102-111, 2014.

BRASIL, G. G. **Monitoramento Ambiental Com A Utilização De Veículos Aéreos Não Tripulados (Vants)**. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

BRASIL. Dispõe sobre o Código Brasileiro de Aeronáutica. **LEI Nº 7.565**, DE 19 DE DEZEMBRO DE 1986. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L7565.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L7565.htm)>. Acesso em: 01 nov. 2018.

BUSCHMANN, C. NAGEL, E. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. **International Journal of Remote Sensing** v. 14(4), p.711-722, 1993.

CAETANO, M. *et al.* Cartografia de ocupação do solo com imagens de satélite: estado da arte. In: Encontro De Utilizadores De Informação Geográfica, 7., 2002, Oeiras. **Actas Oeiras**, 2002.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**. New York, Guilford Press. 550p, 1987.

CAMPOS, S. *et al.* Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao uso da Terra em Microbacias Hidrográficas, Botucatu – SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.2, p.431-435, 2004.

CÂNDIDO, A. K. A. A. **Tratamento de Imagens Orbitais e Suborbitais para Caracterização Ambiental da Cabeira do rio São Lourenço- MT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal do Mato Grosso, 95 p, 2012.

CARVALHO, C. H. S. de. **Cultivares de café**. (Ed.) Brasília: EMBRAPA. 247 p, 2007.

CHEMURA, A. *et al.* Integrating age in the detection and mapping of incongruous patches in coffee (*Coffea arabica*) plantations using multi-temporal Landsat 8 NDVI anomalies. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 57, p. 1-13, 2017a.

CHEMURA, A. *et al.* Mapping spatial variability of foliar nitrogen in coffee (*Coffea arabica* L.) plantations with multispectral Sentinel-2 MSI data. ISPRS. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 138, p. 1-11, 2018.

CHEMURA, A. *et al.* Remote sensing leaf water stress in coffee (*Coffea arabica*) using secondary effects of water absorption and random forests. **Physics and Chemistry of the Earth**, Parts A/B/C, v. 100, p. 317-324, 2017b.

CODOGNOTTO, L. M. *et al.* Efeito do alumínio nos teores de clorofilas de plântulas de feijão-mungo e labe-labe. **Revista Ecosistema**, v.27, n.12, p. 27-30, 2002.

COLTRI, P. P. *et al.* Coffee Crop's Biomass and Carbon Stock Estimation With Usage of High Resolution Satellites Images. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1786-1795, 2013.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da**

**safrã brasileira: cafã 2020**. v. 6, n. 3 (2020) - Brasília: Conab, 2020. Quadrimestral  
Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. ISSN 2318-7913. Acesso em: 20 out, 2020.

DECEA - DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. ICA 100-40.  
**Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro**.  
Disponível em <<https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4510>>. Acesso em: 02 nov. 2018.

DELGADO, R. C. *et al.* Evolução espaço-temporal do cafã no estado de Minas Gerais por meio do classificador de árvore de decisão. **Enciclopã biosfera**, v.8, n.15, p. 904-913, 2012.

EBERHARDT, I. D. R. *et al.* Detecã de áreas agrícolas em tempo quase real com imagens Modis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, n.7, p.605-614, 2015.

EIPHANIO, J. C. N. LEONARDI, L. FORMAGGIO, A. R. Relações entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 3, 1994.

FERRAZ, G.A.S. *et al.* Agricultura de precisã no estudo de atributos químicos do solo e da produtividade de lavoura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 59-67, 2012b.

FERRAZ, G.A.S. *et al.* Comparativo entre os atributos químicos do solo amostrados de forma convencional e em malha. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 1, p. 17-29, 2017b.

FERRAZ, G.A.S. *et al.* Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 1, p. 76-89, 2012c.

FERRAZ, G.A.S. *et al.* Spatial variability of soil fertility attributes and productivity in a coffee crop farm. **Agronomy Research**, v. 17(4), p. 1630–1638, 2019.

FERRAZ, G.A.S. *et al.* Variabilidade espacial dos atributos da planta de uma lavoura cafeeira. **Revista Ciência Agronômica**. Fortaleza, v. 48, n. 1, p. 81-91, 2017a.

FERRAZ, G.A.S. *et al.* Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 140-150, 2012a.

FERREIRA, J. A. *et al.* Bioecologia Da Broca-Do-Cafã, *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera: Scolytidae), No Agroecossistema Cafeeiro Do Cerrado De Minas Gerais. **Ciência Agrotécnica**, Lavras. V.27, n.2, p.422-431, 2003.

FERREIRA, M. *et al.* Zoneamento agroclimatológico para a cultura do cafã no território rural do Caparaó capixaba. **Anais... Foz do Iguaçu. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**. p. 557. 2012.

FIGUEIREDO, V. C. *et al.* Análise Da Variabilidade Espacial Da Força De Desprendimento Dos Frutos Do Cafeeiro Sob Pivô Central. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 231-239, 2017.

FLORENZANO, T. G. **Iniciã em Sensoriamento Remoto**. Ed. Oficina de Textos, 3ª edição. São Paulo/SP, 2011.

- FRANCISCO, C. N. ALMEIDA, C. M. de. Interpretação de imagens orbitais por meio de sistema especialista para o mapeamento de cobertura da terra em região montanhosa. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, ano 24 n. 2, p. 283-302, 2012.
- FRANKLIN, *et al.* Comunidade de parasitóides associados ao bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella* Guérin-Mèneville) em folhas de café (*Coffea arábica* L.) cultivadas no Sudoeste de Minas Gerais. **Ciência et Praxis**, v. 10, n. 19, 2017.
- GALO, M. L. B. T. *et al.* Uso Do Sensoriamento Remoto Orbital No Monitoramento Da Dispersão De Macrófitas Nos Reservatórios Do Complexo Tietê. **Revista Planta Daninha**, Edição Especial. Viçosa-MG, v.20, p.7-20, 2002.
- GAO, F. *et al.* Toward mapping crop progress at field scales through fusion of Landsat and MODIS imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 188, p. 9-25, 2017.
- GIROLAMO NETO, C. *et al.* Classificação automática de áreas cafeeiras utilizando imagens de sensoriamento remoto e técnicas de mineração de dados. In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 17, **Anais...** João Pessoa. São José dos Campos: INPE, 2015. p. 1609- 1616, 2015.
- GITELSON, A. A. *et al.* Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 8, p. L08403, 2005.
- GITELSON, A. A. *et al.* Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. **Geophysical Research Letters**, v. 30(5), p. 1248, 2003.
- GIVNISH, T. J. MONTGOMERY, R. A. Common-garden studies on adaptive radiation of photosynthetic physiology among Hawaiian lobeliads. **Proceedings of the Royal Society B**, v.281, p. 1-8, 2014.
- GUEDES, J. C. F. SILVA, S. M. P. Sensoriamento Remoto No Estudo Da Vegetação: Princípios Físicos, Sensores E Métodos. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, v.12, n.29, p. 127-144, 2018.
- HABOUDANE, D. *et al.* Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modelling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, 90(3), p. 337- 352, 2004.
- HATFIELD, J. L. *et al.* Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. **Agronomy Journal**, v. 100, n. Supplement 3, p. S-117, 2008.
- HERWITZ, S. R. *et al.* Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support. **Computers and Electronics in Agriculture**, v..44, n.1, p.49-61, 2004.
- IOC - ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ. **Relatório 2020**. Disponível em: <<http://www.ico.org/>>. Acesso em: 15 jan. 2020.
- IORI, P. *et al.* Variação sazonal de pressão de pré-consolidação do solo em plantação de café de clima tropical. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 145-154, 2014.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2 ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos, SP. Ed. Parêntese, 2011.

JOHNSON, L. F. *et al.* Feasibility of monitoring coffee field ripeness with airborne multispectral imagery. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 20, n. 6, p. 845-849, 2004.

KÄFER, P. S. *et al.* Caracterização espectral e NDVI de espécies florestais das famílias Fabaceae, Myrtaceae, Rutaceae e Salicaceae. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13(23), p. 262-275, 2016.

KAMIMURA, K. M. *et al.* Variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho-amarelo, sob lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 877-888, 2013.

KATSUHAMA, N. *et al.* Discrimination of areas infected with coffee leaf rust using a vegetation index. **Remote Sensing Letters**, v. 9, n. 12, p. 1186-1194, 2018.

MACHADO, L. M. *et al.* Mapeamento de áreas cafeeiras (*Coffea Arabica* L.) Da zona da mata mineira usando sensoriamento remoto. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 2, p. 113-122, 2010.

MACIEL, A. L. de R. **Embriogênese somática indireta em Coffea arábica**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil. 60 p, 2001.

MAHAJAN, G. R. *et al.* Using hyperspectral remote sensing techniques to monitor nitrogen, phosphorus, sulphur and potassium in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 15, n. 5, p. 499-522, 2014.

MARIN, D. B. *et al.* Multispectral remote sensing in the identification and mapping of biotic and abiotic coffee tree variables. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 66, n. 2, p. 142-153, 2019.

MARINHO, C. A. B. **Proposta de ferramenta computacional para discriminação de feições espectrais de óxidos de ferro em solos da região agrícola do DF, por meio do sensor aerotransportado ADS-80**. Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade de Brasília, Instituto de Geociências. 113 p., 2014.

MARUJO, R. D. F. B. *et al.* Mapeamento da cultura cafeeira por meio de classificação automática utilizando atributos espectrais, texturais e fator de iluminação. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 164 - 175, 2017.

MCROBERTS, R. E. Satellite image-based maps: scientific inference or pretty pictures? **Remote Sensing of Environment**, v.115, p.715-724, 2011.

MESCHEDE, D. K. *et al.* Alteração fisiológica da cana-de-açúcar pela aplicação de Glyphosate e Sulfometuron-Methyl. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 413-419, 2011.

MIELKE, M. S. SCHAFFER, B.; SCHILLING, A. C. Evaluation of reflectance spectroscopy indices for estimation of chlorophyll content in leaves of a tropical tree species. **Photosynthetica**. v.50, p. 343-352, 2012.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 208p., 2001.

MOREIRA, M. A. Geotecnologias no mapeamento da cultura do café em escala municipal. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, 20 (1), 101-110 p., 2008.

NASA - ADMINISTRAÇÃO NACIONAL DA AERONÁUTICA E ESPAÇO. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. **Landsat missions**. Disponível em: ≤ <https://landsat.usgs.gov/landsat-1-history>≥. Acesso em: 16 out 2018.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4ª ed. São Paulo: Blucher, 2010.

OLIVEIRA, H. C. *et al.* Failure detection in row crops from UAV images using morphological operators. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 15, n. 7, p. 991-995, 2018.

OLIVEIRA, N. K. **Características de anatomia foliar de cafeeiros implantados com o uso de polímero hidrorretentor**. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Fitotecnia). Universidade Federal de Lavras- UFLA, 2013.

PEREIRA, L. E. *et al.* Application Of Aerial And Orbital Sensor Photographs To Identify And Delineate Water Bodies. **Boletim Ciências Geodésicas Curitiba**, v. 23, n.4, p. 591-605, 2017.

PONZONI, F. J. SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da Vegetação**. ed. São José dos Campos: Editora: Parêntese, 127p, 2007.

PONZONI, F. J. SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. ed. São José dos Campos: Editora: Parêntese, 128 p, 2010.

PUTRA, B. T. W. SONI, P. Enhanced broadband greenness in assessing Chlorophyll a and b, Carotenoid, and Nitrogen in Robusta coffee plantations using a digital camera. **Precision Agriculture**, v. 19, n. 2, p. 238-256, 2018.

RASI, R. J. **Desenvolvimento de um Veículo Aéreo Não Tripulado para Aplicação em Pulverização Agrícola**. Monografia de Especialização. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas- RS, 2008.

RODRIGUEZ, A. *et al.* The eye in the sky: combined use of unmanned aerial systems and GPS data loggers for ecological research and conservation of small birds. **PLoS One**, 7(12), p. e50336, 2012.

ROSA, V. G. C. *et al.* Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.12, p.1478-1488, 2010.

ROUSE, J. W. *et al.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Third earth resources technology satellite-1 symposium. **National Aeronautics and Space Administration**, p. 309-330, 1973.

SAKIYAMA, N. *et al.* **Café arábica do plantio a colheita**. Viçosa: Editora UFV, p. 316, 2015.

SANTANA, L. S. **Uso de aeronave remotamente pilotada na análise qualitativa no**

- plântio de cafeeiro**. 2019. 66 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.
- SANTOS, L. M. *et al.* Biophysical parameters of coffee crop estimated by UAV RGB images. **Precision Agriculture**, p. 1-15, 2020.
- SANTOS, L. M. *et al.* Use of remotely piloted aircraft in precision agriculture: A review. **DYNA MEDELLÍN**, v. 86, p. 284-291, 2019.
- SEDIYAMA, G. C. *et al.* Zoneamento Agroclimático do Cafeeiro (coffea arábica L.) para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.9, n.3, p 501-509, 2001.
- SENGE, M. O. *et al.* Synthesis, reactivity and structure of chlorophylls. (Eds.) Chlorophylls and Bacteriochlorophylls: biochemistry, biophysics, functions and applications. **Springer Science**, p. 27-37, 2006.
- SILVA, F. M. da. *et al.* Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 231-241, 2008.
- SOBRINHO, M. F. O. *et al.* Uso De Veículos Aéreos Não Tripulados (Vant) Para Mensuração De Processos Florestais. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.15 n.27; p. 117-129, 2018.
- SOUSA, H. L. Sensoriamento Remoto com VANT's: uma nova possibilidade para aquisição de geoinformações. **Revista Brasileira Geomática**, Curitiba, v. 5, n. 3, p. 326-342, 2017.
- STREIT, N. M. *et al.* As clorofilas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 748-755, 2005.
- TAIZ, L., ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Artmed, Porto Alegre, Brasil. 819p, 2009.
- TRENTIN, A. B. **Sensoriamento Remoto Aplicado ao Estudo do Comportamento Espectral da Água no Reservatório Passo Real – RS**. 2009. 101 p. Dissertação (Mestrado em Geografia e Geociências). Universidade Federal De Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- VALAVANIS, K. Advances in unmanned aerial vehicles: state of the art and the road to autonomy. Tampa, Florida. **Springer**, 552p, 2007.
- VIEIRA, T. G. C. *et al.* 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, 2006.
- VOLPATO, M. M. L. Relação entre variáveis meteorológicas e o NDVI de produtos MOD13Q1 em áreas cafeeiras do município de Três Pontas, MG. **Anais...** Curitiba, PR. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2011.

## **SEGUNDA PARTE**

### **ARTIGO – CARACTERIZAÇÃO DE CULTIVARES DE CAFÉ RECÉM TRANSPLANTADAS A PARTIR DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO OBTIDOS POR SISTEMA DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA**

Autores: Nicole Lopes Bento<sup>1</sup> e Gabriel Araújo e Silva Ferraz<sup>1</sup>

Filiação: <sup>1</sup>Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil.

## RESUMO

Os Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS) destacam-se como técnica eficiente de detecção remota aplicada ao estudo e mapeamento de culturas. No Brasil, que é o principal produtor e exportador e o segundo maior consumidor de café do mundo, os RPAS auxiliam na tomada de decisões e pode aumentar a produtividade e a geração de empregos e renda. Objetivou-se neste estudo a caracterização de três cultivares de *Coffea arabica* L. (Catucaí, Catuaí e Bourbon) recém transplantadas. A área de estudo compreende lavoura localizada em Minas Gerais, Brasil, com plantas de café com idade inicial de avaliação de 5 meses e dados e imagens aéreas obtidas entre Maio/2018 a Março/2019 no intervalo de 2 meses cada. O comportamento temporal foi determinado com base nos valores médios mensais. O perfil espectral foi obtido com valores médios do último mês de cada período (seco e chuvoso). As diferenças estatísticas foram obtidas com base no teste não paramétrico de comparações múltiplas. A estimação de equação linear foi obtida por meio correlação de Spearman ( $\rho$ ) coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE). Conclui-se que as épocas de estudo influenciam o comportamento e desenvolvimento das cultivares cafeeiras, sendo detectadas diferenças estatísticas significativas para as variáveis estudadas, exceto para a variável clorofila. Devido a proximidade e sobreposição dos valores de reflectância, as bandas espectrais não foram utilizadas para a individualização de cultivares. Observou-se somente correlação entre os Índices de Vegetação (IVs) e índice de área foliar (IAF) sendo possível a estimação de equação de regressão linear para cada cultivar em estudo.

**Palavras-chave:** Agricultura de Precisão. Assinatura Espectral. *Coffea arabica* L. Sensoriamento Remoto.

## ABSTRACT

Remotely piloted aircraft systems (RPAS) stand out as an efficient remote detection technique applied to the study and mapping of crops. In Brazil, which is the main producer and exporter and the second-largest consumer of coffee in the world, RPAS help in decision making and can increase productivity and the generation of jobs and income. The objective of this study was to characterize three cultivars of *Coffea arabica* L. recently planted. The study area encompasses farming located in Minas Gerais, Brazil, with a coffee plantation of the initial age of 5 months where data and aerial images were obtained from May/2018 to March/2019 in the interval of 2 months each. The temporal behavior was determined based on monthly mean values. The spectral profile was obtained with mean values of the last month of each period (dry and rainy). The statistical differences were obtained based on the non-parametric test of multiple comparisons. The estimation of linear equation was obtained through Spearman correlation ( $\rho$ ) coefficient of determination ( $R^2$ ) and Square Root of Mean Error (RMSE). It is concluded that the study seasons influence the behavior and development of coffee cultivars, and significant statistical differences are detected for the variables studied, except for the chlorophyll variable. Due to the proximity and overlap of the reflectance values, spectral bands were not used to individualize of cultivars. We only observed a correlation between the Vegetation Indices (VIs) and Foliar Area Index (LAI) and it was possible to estimate the linear regression equation for each cultivar under study.

**Keywords:** Precision farming. Spectral Signature. *Coffea arabica* L. Remote Sensing.

## 1 INTRODUÇÃO

A cultura cafeeira possui grande importância socioeconômica no Brasil que é atualmente o maior produtor mundial, segundo maior consumidor e líder em exportações mundiais (ABIC, 2020). Por se tratar de uma cultura perene e cultivada em grandes áreas está sujeita a riscos que afetam diretamente a produtividade e conseqüentemente a economia do país. A cafeicultura brasileira, se mantém em crescimento constante, e é caracterizada por utilização de tecnologias que garantam ao mercado quantidade e qualidade do produto, contrapesar das irregularidades encontradas no campo (CONAB, 2020).

Neste contexto, o sensoriamento remoto apoiado a utilização de plataformas aéreas, por meio de um mapeamento detalhado da área de estudo, traduz a obtenção de informações precisas sob o dossel da cultura e em tempo hábil para ações corretivas. O uso de sensores dispostos em plataformas aéreas sub-orbitais, neste enfoque, o Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada- RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*), refere-se a uma alternativa de fácil aquisição de dados e flexibilidade quando comparado às plataformas clássicas, proporcionando a obtenção de dados confiáveis e com campo de visada mais detalhado das condições do objeto de estudo, assegurando possibilidade em discriminar com rigor o estado de sanidade das plantas (TSOUROS *et al.*, 2019).

A utilização de sensores embarcados em aeronaves em estudos em café vem sendo evidenciados em diferentes aplicações. Carrijo *et al.* (2017) utilizaram RPAS na detecção de frutos maduros em plantas de café, Chemura *et al.* (2017) testaram a capacidade de imagens multiespectrais para avaliação do teor de água como forma de detecção e monitorização do stress hídrico em lavoura cafeeira, Oliveira *et al.* (2019) estudaram formas de segmentação para detecção de nematoides na cafeicultura utilizando imagens aéreas provenientes de RPAS, Cunha, Sirqueira Neto e Hurtado (2019) desenvolveram método para determinação de volume da vegetação das lavouras cafeeiras a partir de imagens digitais capturadas por RPAS, Santos *et al.* (2020) propuseram modelo de estimação de medidas indiretas de parâmetros de altura e diâmetro de copa de cafeeiros utilizando dados detectados por RPAS, entre outras aplicabilidades.

Estudos com sensores acoplados a sistemas orbitais já se encontram difundidos na literatura em estudos no contexto da Cafeicultura de Precisão. A aplicabilidade, porém, de estudos neste âmbito com aplicabilidade de sensores sub-orbitais evidenciados pela aplicação de Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada- RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*) são mais escassos e para o caso da utilização desta tecnologia no estudo em lavouras cafeeiras recém

transplantadas ainda mais incipiente e menos difundido em literatura, porém de fundamental importância econômica, destacando a importância da aplicabilidade e desenvolvimento do estudo proposto.

A aplicação das técnicas do sensoriamento remoto aliado a utilização de plataformas aéreas remotas propiciam avaliação eficiente, precoce, objetiva e não destrutiva, por intermédio da resposta espectral das plantas à diversos fatores de atuação do meio ambiente (LI *et al.*, 2010). O estudo pós transplântio de mudas cafeeiras é importante, sendo que na maioria dos casos, os erros de manejo cometido nos primeiros meses refletem em toda vida útil da cultura, influenciando longevidade, qualidade do produto, produtividade da lavoura, custos de produção e conseqüentemente na rentabilidade da atividade desenvolvida (MESQUITA *et al.*, 2016).

Perante o exposto, objetivou-se caracterizar três cultivares cafeeiras (*Coffea arabica* L.) recém transplantadas, de modo a verificar influência das épocas seca e chuvosa no desenvolvimento e comportamento das variáveis das plantas aferidas em campo. Procedeu-se o estudo temporal dos dados de altura, diâmetro de copa, teor de clorofila e dados radiométricos provenientes dos índices de vegetação, o levantamento dos perfis espectrais para as duas épocas de estudo, a diferenciação estatística para as cultivares cafeeiras, estimou-se equações que correlacionem índice de área foliar (IAF) e clorofila total (Chl t) aos índices de vegetação (IVs) e possibilitou-se a criação de um banco de dados para auxílio em trabalhos futuros.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### Área de Estudo

A área de estudo compreende a Fazenda Samambaia, com área total de 275,00 hectares, entre os meridianos 506000 e 508000 m W, e paralelos 7680000 e 7690000 m S, na projeção UTM zona 23 S e referencial geodésico Sirgas 2000 (Figura 1), localizada no município de Santo Antônio do Amparo na Zona Campos das Vertentes, Estado de Minas Gerais - MG (EMBRAPA, 2006).

A fazenda possui área de lavoura cafeeira (*Coffea arabica* L.) recém transplantada (nos meses de novembro e dezembro de 2018) com diferentes cultivares, com idade de 5 meses no início dos trabalhos, sendo as cultivares Catucaí (2SL), Catuaí (IAC 62) e Bourbon (IAC J10) (Figura 2), cadastradas no Registro Nacional de Cultivares - RNC, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2018) foco deste estudo. As sub-áreas de estudo foram padronizadas em 0,60 ha, espaçamento de 3,8 m entrelinhas, 0,5 m na linha de plantio, altitude

média de 1022,00 m e presença de braquiária nas entrelinhas. O município encontra-se inserido no Bioma de Mata Atlântica e com solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (EMBRAPA, 1999).

Figura 1 - Localização da área de estudo com cultivares A) Catucaí (2SL), B) Catucaí (IAC 62) e C) Bourbon (IAC J10).

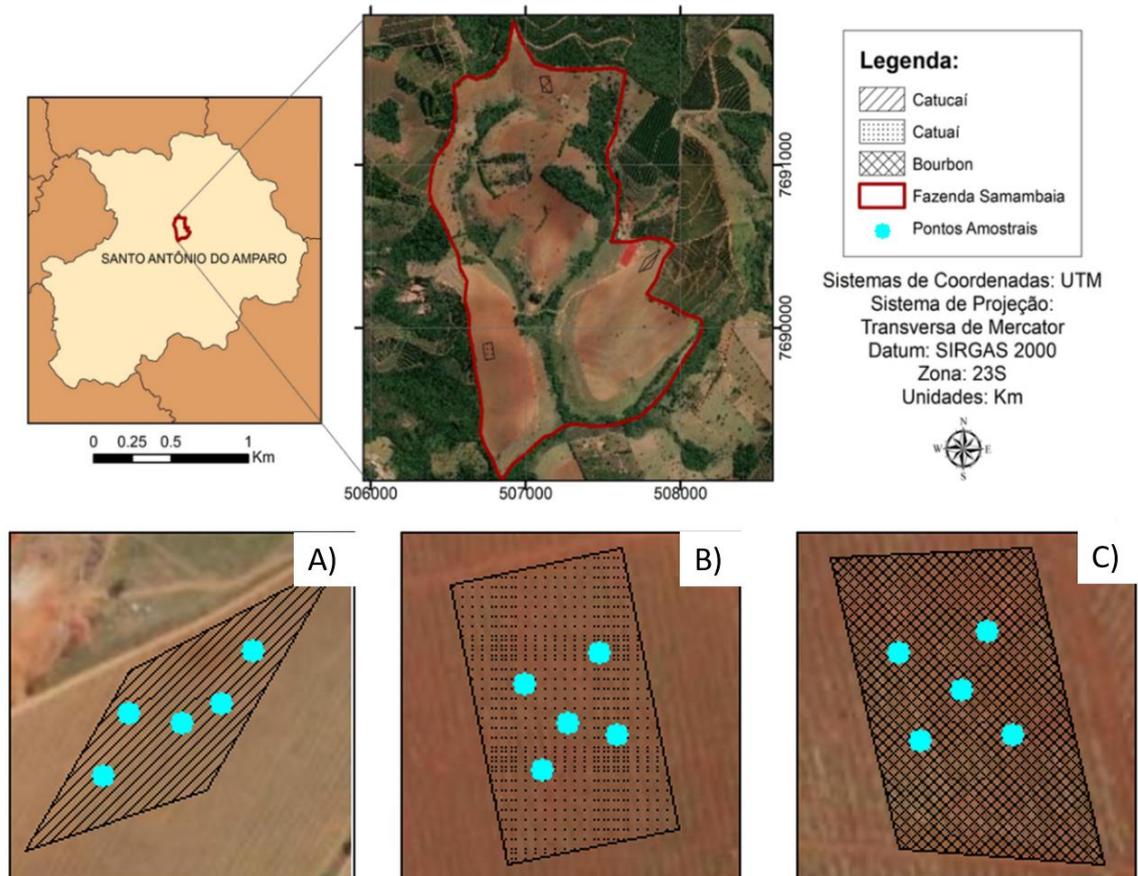


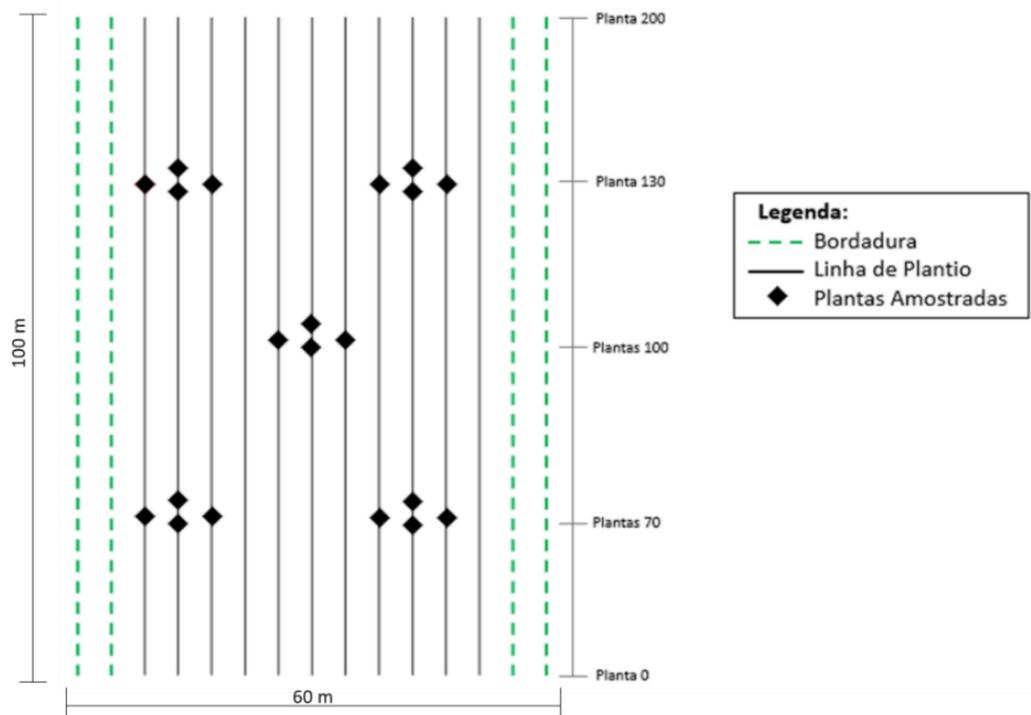
Figura 2 - Cultivares de *Coffea arabica* L. transplantadas na fazenda Samambaia A) Catucaí (2SL), B) Catucaí (IAC 62) e C) Bourbon (IAC J10).



A área da fazenda era anteriormente destinada a pastagem (*Brachiaria decumbens*) em condição de degradação. Para a preparação do solo para implantação das lavouras cafeeiras procedeu-se inicialmente gradeamento e subsolagem, aplicação em área total de calcário dolomítico, sendo posteriormente realizado o manejo de plantas daninhas, seguidos por controle químico e abertura de sulcos. Com o solo preparado procedeu-se a marcação de linhas de plantio por alinhamento mecanizado e posterior transplântio de mudas de saquinhos multifuros com espaçamento 50 cm entre plantas na linha com auxílio de transplantadora mecânica no mês de dezembro de 2018. Em julho de 2019 realizou-se o procedimento de cobrir parte do ramo ortotrópico das plantas com solo com intuito de equilíbrio de umidade e temperatura favorecendo o desenvolvimento dos cafeeiros.

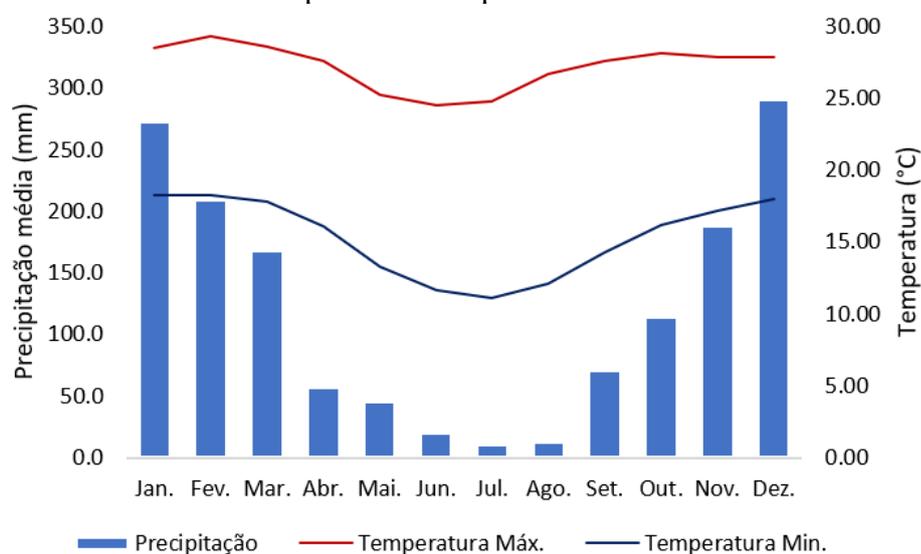
As três sub-áreas de estudo foram padronizadas em 0,60 ha, com 15 linhas de plantio e 200 plantas por linha, totalizando 3000 plantas por área. Para este estudo considerou-se 5 pontos amostrais, distribuídos de maneira sistemática de forma homogênea para cada área plantada. Cada ponto amostral foi composto de 4 plantas de café, conforme metodologia descrita por Ferraz *et al.* (2017), que indica a amostragem de duas plantas localizadas na linha de plantio dos cafeeiros (considerado como ponto central) e mais duas plantas, em cada uma das linhas laterais ao ponto central, totalizando 20 plantas em cada área estudada e 60 plantas em toda a área de estudo, conforme representação apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Representação esquemática do experimento com pontos amostrais para a área experimental.



O clima de acordo com a classificação de Köppen é classificado como Subtropical Chuvoso (Cwb) de inverno seco e verão temperado, com temperaturas médias que variam de 18°C a 22°C (ALVARES *et al.*, 2013). Segundo dados das normais climatológicas do INMET (2020), com dados mais próximos a área de estudo para o município de Lavras, foi possível a caracterização da precipitação média anual e temperaturas médias, máximas e mínimas da região (Figura 4), sendo possível constatar os meses de outubro a março como meses chuvosos e quentes e os meses de abril a setembro como meses secos e frios na região analisada, permitindo portanto um estudo evidenciando os efeitos das épocas de estudo na lavoura cafeeira recém transplantada e seu desenvolvimento no primeiro ano de implantação.

Figura 4 - Distribuição anual da precipitação média mensal e temperaturas médias máximas e mínimas para o município de Lavras- MG.



### Obtenção das Imagens Aéreas

As imagens foram coletadas em intervalos de 2 meses, no período de maio de 2019 a março de 2020 (maio/ julho/ setembro/ novembro/ janeiro/ março). O levantamento das imagens utilizadas para a determinação dos IVs na área de estudo da cultura cafeeira foi realizado por meio da Aeronave Remotamente Pilotada Matrice 100 (DJI, 2015) (Figura 5), com sensor embarcado para captação de imagens aéreas referente a câmera multispectral Parrot Sequoia (MICASENSE, 2016) e valores de reflectância descritos nas bandas espectrais do verde (550 a 590 nm), vermelho (660 a 700 nm), vermelho limitrófe (735 a 745 nm), infravermelho próximo (760 a 820 nm) e RGB (380 a 720 nm).

O plano do voo foi realizado no software Precision Flight (PRECISION HAWK, 2010) sendo os parâmetros de entrada do sistema para definição de voo por waypoints, considerado

como automático, com determinação do local de lançamento e pouso da aeronave, condições topográficas da área, altura de voo definido em 50 metros, velocidade de voo de 8 m/s, nível de sobreposição (*overlap X sidelap*) de 80% X 80% e direção de voo do tipo transversal à linha de plantio.

Figura 5 - RPA Matrice 100 e sensor embarcado Parrot Sequoia.



A extremidades das áreas de estudo e as plantas amostradas foram demarcadas com pontos de controle (alvos), por meio de placas de identificação dispostas no terreno, com o intuito de possibilitar a correta identificação do posicionamento das plantas analisadas, como garantia de precisão das informações coletadas em campo por meio das imagens obtidas pelo sensor acoplado ao RPA. Os alvos foram confeccionados em placa quadrada de madeira com 30 cm x 30 cm, pintados nas cores branca e vermelha para destaque nas imagens a serem coletadas com o sobrevoo (Figura 6).

Figura 6 - Pontos de controle: A) Detalhes dos alvos. B) Alvos fixados na área do cafeeiro.

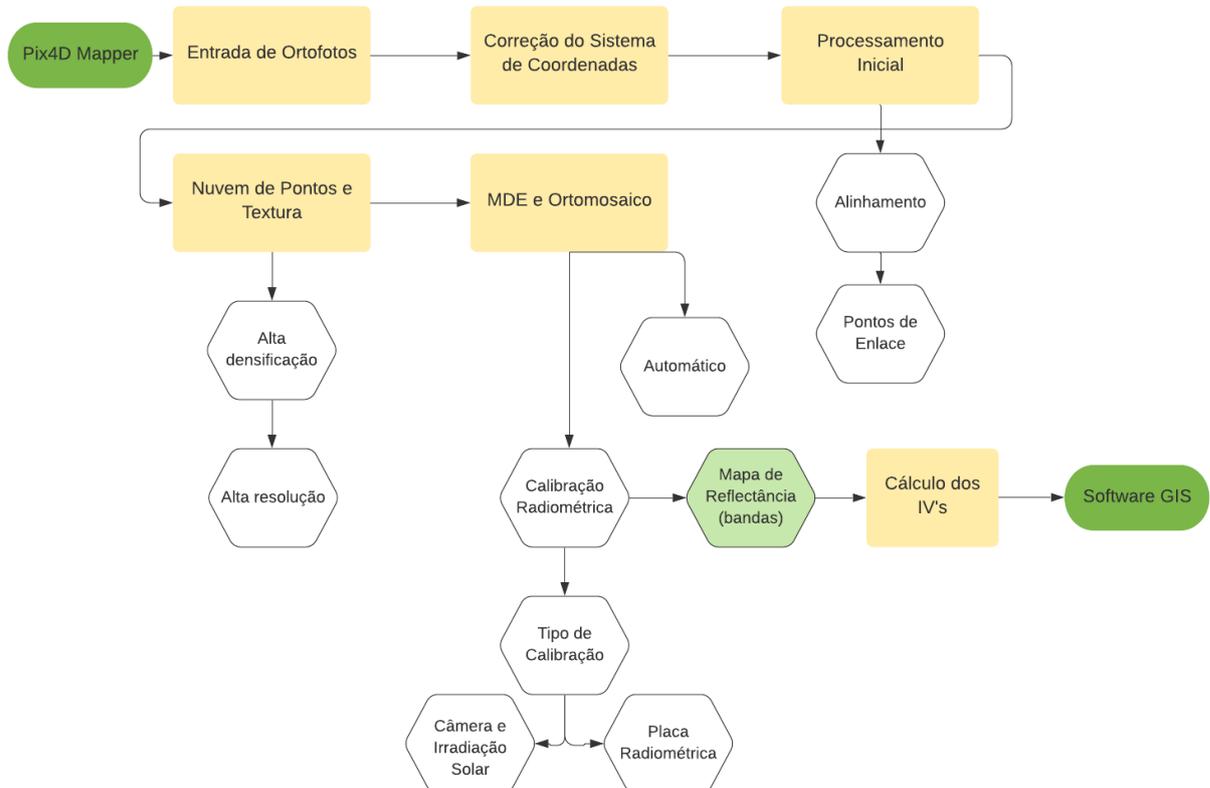


A calibração radiométrica do sensor ocorreu antes e após os voos, por meio da compensação precisa das condições de luz incidente e da geração de dados quantitativos, com auxílio de placa calibradora, sendo possível a captura das imagens conforme sobrevoo nas áreas de estudo, com horário padronizado entre 11:00 e 13:00 horas, possibilitando assim efeito comparativo entre imagens dos meses de estudo.

### Processamento das Imagens

O processamento das imagens foi realizado por meio do software PIX4D Mapper (PIX4D SA, 2019) conforme metodologia descrita na Figura 7. Todos os itens do processamento foram configurados para alta resolução. Inicialmente a referência espacial das imagens foi corrigida para Sirgas 2000 UTM zona 23S e efetuada a correção radiométrica das imagens. Em seguida as imagens foram alinhadas por meio de triangulação, medição automática e enlace de correção automática, gerando nuvem densa de pontos e textura das imagens para a geração da modelagem digital do terreno por meio do modelo digital de elevação (MDE) e geração do mosaico final de dados de reflectância das áreas para cada data de estudo. De posse a tais mosaicos fez-se possível o estudo acerca dos IVs.

Figura 7 - Fluxograma de processamento das imagens no software Pix4D Mapper.



## Dados de Campo

Nas datas concomitantes a obtenção das imagens coletou-se dados de campo referentes as medições das plantas, de altura, diâmetro de copa e teor de clorofila, para posteriores estudos, bem como para auxílio ao acompanhamento da lavoura.

As medições de altura de planta e diâmetro de copa foram realizadas com auxílio de trena convencional (Figura 8- A e B) medindo-se a distância entre o nível do solo até a inserção do par de folhas na região terminal do ramo ortotrópico (medida vertical) e do maior diâmetro de copa da planta (medida horizontal). Estas informações foram utilizadas para o cálculo do índice de área foliar (IAF) segundo Equação (1) conforme Favarin *et al.* (2002).

$$IAF = 0,0134 + 0,7276 \times D^2 \times h \quad (1)$$

Em que:

IAF - índice de área foliar (adimensional)

D - diâmetro das plantas (m)

h - altura das plantas (m).

A medição do teor de clorofila ocorreu com auxílio de medidor portátil de clorofila atLEAF Chl meter (ATLEAF, 2019) utilizando uma média da leitura de três folhas de plantas cafeeiras com leituras nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo (Figura 8- C). A conversão de unidades obtidas pelo clorofilômetro para teor de clorofila total (Chl t) e clorofila *a* (Chl a) e clorofila *b* (Chl b) seguem equações (2), (3) e (4) respectivamente conforme Padilla *et al.* (2018).

$$\text{Clorofila total} = \text{clorofila } a + \text{clorofila } b \quad (2)$$

$$\text{Clorofila } a = -5,774 + (0,43 * \text{atLEAF}) + (0,0045) * (\text{atLEAF}^2) \quad (3)$$

$$\text{Clorofila } b = 0,04 * (\text{atLEAF}^{1,57}) \quad (4)$$

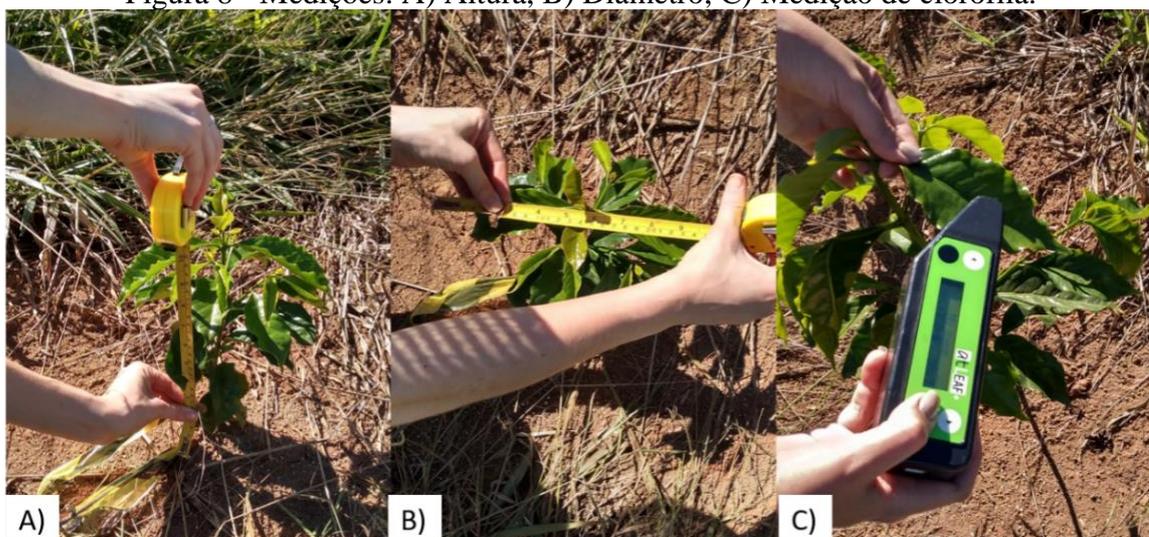
Em que:

Clorofila total (Chl t), Clorofila *a* (Chl a), Clorofila *b* (Chl b)- ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )

atLEAF – medição obtida no clorofilômetro atLEAF (IRC).

Procedeu-se amostragem de solo no mês de agosto para avaliação da fertilidade nos pontos amostrais por meio da retirada de subamostras coletadas na projeção da copa do cafeeiro, de 0 a 20 cm de profundidade, com auxílio de um trado holandês, para cada uma das quatro plantas do ponto amostral, que foram homogeneizadas, para formação de amostra composta e encaminhada as análises laboratoriais fertilidade e matéria orgânica.

Figura 8 - Medições: A) Altura, B) Diâmetro, C) Medição de clorofila.



### Índices de Vegetação

Os IVs foram calculados com base na combinação de bandas espectrais descritas na Tabela 1. Para este estudo em questão considerou-se 5 diferentes IVs de modo a identificar relações indiretas entre os resultados encontrados por meio de imagens de sensoriamento remoto e dados coletados em campo. A escolha de tais índices se baseou na capacidade em discernir características da planta, bem como respostas a condições de estresse da vegetação por meio da utilização de dados de sensoriamento remoto.

Tabela 1 - Índices de vegetação utilizados, seguido por suas siglas, equações e referências

ÍNDICE DE VEGETAÇÃO	SIGLA	EQUAÇÃO	REFERÊNCIA
Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	NDVI	$(R_{NIR} - R_R) / (R_{NIR} + R_R)$	Rouse <i>et al.</i> (1973)
Índice da Diferença Normalizada- Red Edge	NDRE	$(R_{NIR} - R_{REG}) / (R_{NIR} + R_{REG})$	Buschmann e Nagel (1993)
Primeira Modificação ao Índice de Relação de Absorção de Clorofila	MCARI1	$1,2[2,5(R_{NIR} - R_R) - 1,3(R_{NIR} - R_G)]$	Haboudane <i>et al.</i> (2004)
Índice de Clorofila Red Edge	CI	$(R_{NIR} / R_{REG}) - 1$	Gitelson <i>et al.</i> (2003)
Índice do Conteúdo de Clorofila no Dossel	GCI	$(R_{NIR} / R_G) - 1$	Gitelson <i>et al.</i> (2005)

Legenda:  $R_{NIR}$ , valores de refletância obtidos pelo sensor na faixa do infravermelho próximo;  $R_{REG}$ , refletância na faixa entre o vermelho e o infravermelho (vermelho limítrofe);  $R_R$ , refletância da faixa do vermelho;  $R_G$ , refletância da faixa do verde.

Os IVs foram obtidos com o auxílio do Software ArcGIS 10.4 (ESRI, 2015) e QGIS 3.6.2 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2019) em ambiente SIG, por meio do conjunto de funções do AcrToolbox na ferramenta de ‘Álgebra de Mapas’, no qual permite cálculos entre raster’s (pixel á pixel) a partir de scripts escritos em Python. As imagens foram georreferenciadas para garantia do correto posicionamento para o cálculo entre bandas, sendo os valores do IVs extraídos com base no conjunto de pixels referentes as plantas de estudo.

### **Análises**

A análise do comportamento temporal dos dados de campo e IVs foi obtida com base em dados médios mensais para cada cultivar cafeeira por plotagem gráfica em planilha eletrônica dos valores dos índices estudados ao longo do tempo, com consideração de período seco (meses maio, julho e setembro) e período chuvoso (meses novembro, janeiro e março). Considerou-se nesta análise o comportamento da distribuição pluviométrica e térmica da região (Figura 4) uma vez que se refere a uma lavoura cafeeira recém transplantada, ou seja, em fase de formação e crescimento, sendo que no primeiro ano de formação da lavoura as épocas fisiológicas não estão bem definidas e, portanto, a interferência pluviométrica e térmica exercem grande influência ao desenvolvimento das plantas de café (CARVALHO;FAZUOLI, 1993).

A caracterização espectral das três cultivares cafeeiras foi realizada para o período seco (mês setembro) e para o período chuvoso (mês março) por intermédio da geração de assinatura espectral, sendo utilizadas as bandas Verde (*green*) e Vermelho (*red*) do espectro visível e as bandas do Vermelho Limítrofe (*red edge*) e Infravermelho Próximo (*nir*) do espectro infravermelho. A partir de 20 pontos de interesse referentes a cada cultivar de estudo, com o auxílio do QGIS 3.6.2 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2019), foram obtidos os valores de amplitude de cada banda espectral para caracterização do comportamento da reflectância dos pixels em cada banda estudada.

O estudo das diferenças estatísticas consistiu em verificar diferenças entre cultivares para dois períodos de estudo com base nos dados de campo e IVs. Procedeu-se inicialmente a análise de diferenças estatísticas entre os meses que compõem os períodos individualmente, e como não foram detectadas diferenças estatísticas significativas, os meses foram agrupados por períodos permitindo a análise em questão. Testou-se a normalidade dos dados por intermédio do teste estatístico de Anderson-Darling (ANDERSON;DARLING, 1952) e como verificado a não normalidade dos dados procedeu-se a análise de diferenças estatísticas com base no teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (KRUSKAL-WALLIS, 1952) sendo posteriormente

aplicado o teste de comparações múltiplas de Dunn (DUNN, 1964) todos a 5% de probabilidade no software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009).

A correlação entre os dados de teor de Chl t e IAF obtidas em campo com os valores de radiometria dos IVs foram realizadas para análise do ajuste e estimação de equações que correlacione tais informações. Verificou-se o coeficiente de correlação de Spearman ( $\rho$ ) e realizou-se análise de regressão com obtenção do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Para a validação foi calculada a Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE), sendo este um método bastante utilizado para verificação da acurácia de modelos estimadores, por intermédio do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009) e Orange Canvas (DEMSAR *et al.*, 2013).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos neste estudo para as três cultivares cafeeiras recém transplantadas encontram-se descritos na Tabela 2. Não foram constatadas alterações entre os pontos amostrais com base nos dados de análise de fertilidade do solo, sendo a adubação nas três áreas igual e suficiente, de modo que nenhum componente do solo afetou diferencialmente o desenvolvimento das plantas cafeeiras e, portanto, desconsiderou-se qualquer tipo de interferência deste tipo.

Considerando a época final de estudo para as variáveis de altura, diâmetro de copa, IAF e clorofilas (*a*, *b* e total) a cultivar cafeeira Bourbon apresentou valores superiores, seguido pelas cultivares Catucaí e Catuaí respectivamente. Para os IVs estudados a cultivar cafeeira Bourbon obteve também valores superiores, seguidos, porém pelas cultivares Catuaí e Catucaí respectivamente.

Tabela 2 - Valores médios de altura e diâmetro (m), índice de área foliar (IAF), teores de clorofila ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) *a* (Chl *a*), *b* (Chl *b*) e total (Chl *t*) e índices de vegetação (IVs) de três diferentes cultivares cafeeiras (Catucaí, Catuaí e Bourbon) para 6 épocas de estudo

Variáveis	Época do Ano					
	Mai.	Jul.	Set.	Nov.	Jan.	Mar.
	<b>Catuaí</b>					
Altura	0,3640	0,3850	0,4285	0,5185	0,5650	0,7040
Diâmetro	0,3660	0,3925	0,3780	0,5395	0,6370	0,8180
IAF	0,0516	0,0596	0,0608	0,1290	0,1893	0,3856
Chl <i>a</i>	33,4218	58,1544	27,9196	45,9925	33,9694	57,7955
Chl <i>b</i>	22,9043	39,3491	19,2844	31,2814	23,2565	39,1206
Chl <i>t</i>	56,3261	97,5034	47,2039	77,2739	57,2259	96,9162

NDVI	0,6594	0,5216	0,4692	0,7945	0,8415	0,8661
NDRE	0,2989	0,1416	0,1439	0,1946	0,2424	0,2512
MCARI	0,6049	0,3681	0,1838	0,5176	0,7945	0,8037
CI	0,3583	0,2984	0,1922	0,3550	0,5564	0,6091
GCI	3,8332	2,9340	1,6324	2,3137	4,4002	7,7259
<b>Catuaí</b>						
Altura	0,2915	0,3420	0,3630	0,4680	0,5000	0,6480
Diâmetro	0,3775	0,4015	0,3620	0,5230	0,6070	0,7985
IAF	0,0464	0,0573	0,0508	0,1106	0,1521	0,3237
Chl a	36,9960	72,8914	45,2988	38,2035	33,7714	53,4747
Chl b	25,2779	49,0714	30,8099	26,0830	23,1305	36,2568
Chl t	62,2739	121,9628	76,1087	64,2865	56,9019	89,7315
NDVI	0,6131	0,4959	0,2012	0,7944	0,8380	0,8973
NDRE	0,1380	0,1044	0,1170	0,1711	0,2166	0,2666
MCARI	0,4055	0,3286	0,0121	0,5783	0,6116	0,8557
CI	0,2344	0,3221	0,2674	0,4147	0,5562	0,7306
GCI	3,7529	2,9721	1,4153	4,9472	6,4406	7,7372
<b>Bourbon</b>						
Altura	0,3970	0,4490	0,5045	0,6758	0,7158	0,9295
Diâmetro	0,3625	0,4170	0,3965	0,6763	0,7195	0,9421
IAF	0,0540	0,0747	0,0771	0,2529	0,3004	0,6411
Chl a	49,3509	65,9867	82,4485	49,5503	37,8851	42,7662
Chl b	33,5182	44,5331	55,3159	33,6354	25,8741	29,1262
Chl t	82,8691	110,5198	97,7644	83,1857	63,7592	71,8924
NDVI	0,6445	0,5504	0,3570	0,8273	0,9066	0,9113
NDRE	0,1240	0,0554	0,1303	0,2073	0,2169	0,2709
MCARI	0,4337	0,1023	0,1269	0,7358	0,7705	0,8719
CI	0,2881	0,1413	0,3019	0,5226	0,6436	1,0420
GCI	4,4683	1,1590	1,8431	4,7386	6,8972	8,0345

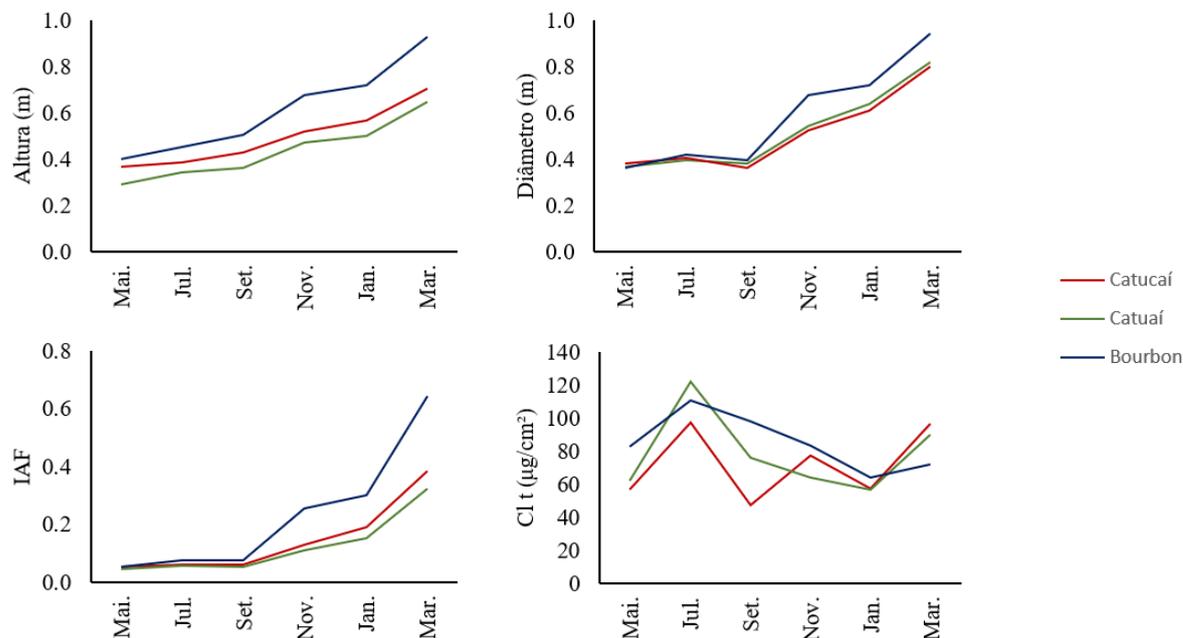
### Caracterização Temporal

O comportamento temporal dos dados obtidos pelas medições de campo de altura, diâmetro de copa, índice de área foliar (IAF) e clorofila total (Chl t) estão apresentados na Figura 9. Ao estudar o desenvolvimento e comportamento de cultivares cafeeiras recém transplantadas ressalta-se o acompanhamento de tais variáveis, as quais evidenciam fases de formação e crescimento das cultivares, sendo tais variáveis fundamentais para o estudo do IAF.

É fato conhecido que a altura do cafeeiro aumenta com a idade, o que foi constatado em todas as cultivares que apresentaram crescimento linear, evidenciando destaque a cultivar Bourbon (0,9295 m) que apresentou maior porte com relação à altura as demais cultivares, Catucaí (0,7040 m) e Catuaí (0,6480 m), consideradas de porte médio a baixo segundo a Embrapa Consórcio Pesquisa Café (CARVALHO *et al.*, 2007) o que também se verificou neste estudo. Para a época seca, entretanto, observou-se menor crescimento quando comparada com

a época chuvosa.

Figura 9 - Análise temporal dos dados medidos em campo: altura, diâmetro de copa, índice de área foliar (IAF) e clorofila total (Chl t) para as três cultivares cafeeiras de estudo.



No que diz respeito a variável diâmetro de copa foi percebido que para os meses iniciais de estudo de maio e julho o crescimento foi linear, entretanto houve queda no valor da variável para o mês de setembro em todas as cultivares, justificado pela ação intensa do frio na região nos meses anteriores, que promoveu interrupção do crescimento das folhas mais jovens, clorose e queima nas bordas e total em algumas folhas, queda de folhas e consequentemente redução nos valores de diâmetro de copa. Nos meses seguintes devido a redução da ação do frio o desenvolvimento das folhas foi retomado, sendo notória a elevação nos valores desta variável. Em estudos de Freitas *et al.* (2007), também foram observadas a influência de condições ambientais de temperatura local da área de cultivo no diâmetro de copa de cultivares de café. Neste estudo a cultivar Bourbon apresentou maior diâmetro de copa (0,9421 m), seguidas pelas cultivares Catucaí (0,8180 m) e Catuaí (0,7985 m) respectivamente.

O comportamento do IAF ao longo do tempo reflete os processos de copa e estado geral do cafeeiro (FAVARIN *et al.*, 2002). Para as cultivares Catucaí e Bourbon o IAF apresentou crescimento linear, entretanto para a cultivar Catuaí observou-se uma leve redução para o mês de setembro seguido por aumento nos meses seguintes. Percebe-se, deste modo, que os efeitos térmicos que ocasionaram redução do diâmetro de copa no mês de setembro para todas as cultivares não foram suficientes para afetar os valores do IAF das cultivares Bourbon e Catucaí,

diferentemente do que se observa para a cultivar Catuaí que respondeu com maior queda da variável e conseqüentemente o valor do IAF refletiu maior sensibilidade para esta cultivar se comparada as demais. Nos meses seguintes o crescimento foi linear com maiores valores de IAF para as cultivares Bourbon (0,6411), Catucaí (0,3856) e Catuaí (0,3237) respectivamente, com valores próximos e superiores aos encontrados em estudos de Pereira, Camargo e Villa Nova (2011) que observaram o IAF de 0,27 em cafeeiros não irrigados para análise 15 meses após transplântio.

Em geral o crescimento dos ramos laterais (plagiotrópicos) e das folhas acompanharam as curvas de temperatura, sobretudo as de temperaturas média e mínima (Figura 4). Conforme estudos de Alégre (1959) a temperatura média favorável ao crescimento e desenvolvimento do cafeeiro situa-se entre 16 e 23°C, com faixa ótima encontrada de 18 a 21°C. Verifica-se, portanto, que a diminuição no desenvolvimento foliar e conseqüentemente redução nos valores de diâmetro de copa das cultivares cafeeiras estudadas ocorreu no período com registro de temperatura abaixo da faixa admitida como ótima por Alégre (1959), atingindo valores de temperatura média mínima inferiores a 15°C para a área estudada. Entretanto no que diz respeito à altura de plantas (ramo ortotrópico) a média das temperaturas parece não ser suficiente para explicar decréscimos na altura de planta, uma vez que a variável se manteve crescente neste estudo, evidenciado principalmente pela fase inicial de desenvolvimento das plantas, fase em que provavelmente o crescimento dos ramos ortotrópicos está em constante desenvolvimento (AMARAL;RENA;AMARAL, 2006).

Para a variável Chl t o comportamento apresentado pela cultivar Catucaí foi de aumento considerável para o mês de julho, queda no mês de setembro, aumento para o mês de novembro e redução para o mês de janeiro. Já as cultivares Catuaí e Bourbon também apresentaram aumento considerável no mês de julho, porém queda tanto para os meses de setembro, novembro e janeiro. No mês de março todas as cultivares obtiveram aumento considerável nos teores de clorofila sendo que a cultivar Catucaí apresentou maior teor de Chl t (9,9162 µg/cm<sup>2</sup>), seguidas pelas cultivares Catuaí (89,7315 µg/cm<sup>2</sup>) e Bourbon (71,8924 µg/cm<sup>2</sup>). Os valores superiores de Chl t observado para os meses secos e com temperatura reduzida (maio, julho, setembro) com relação aos meses chuvosos e com temperatura elevada (novembro, janeiro e março) não seguiram o padrão esperado para as épocas estudadas. O déficit hídrico e térmico não afetou de forma significativa os pigmentos fotossintéticos nas épocas de avaliação.

O comportamento apresentando pelos pigmentos cloroplastídicos podem refletir o estado de defesa da planta, uma vez que as plantas submetidas ao déficit hídrico podem apresentar aumento significativo na concentração de pigmentos fotossintéticos, demonstrando

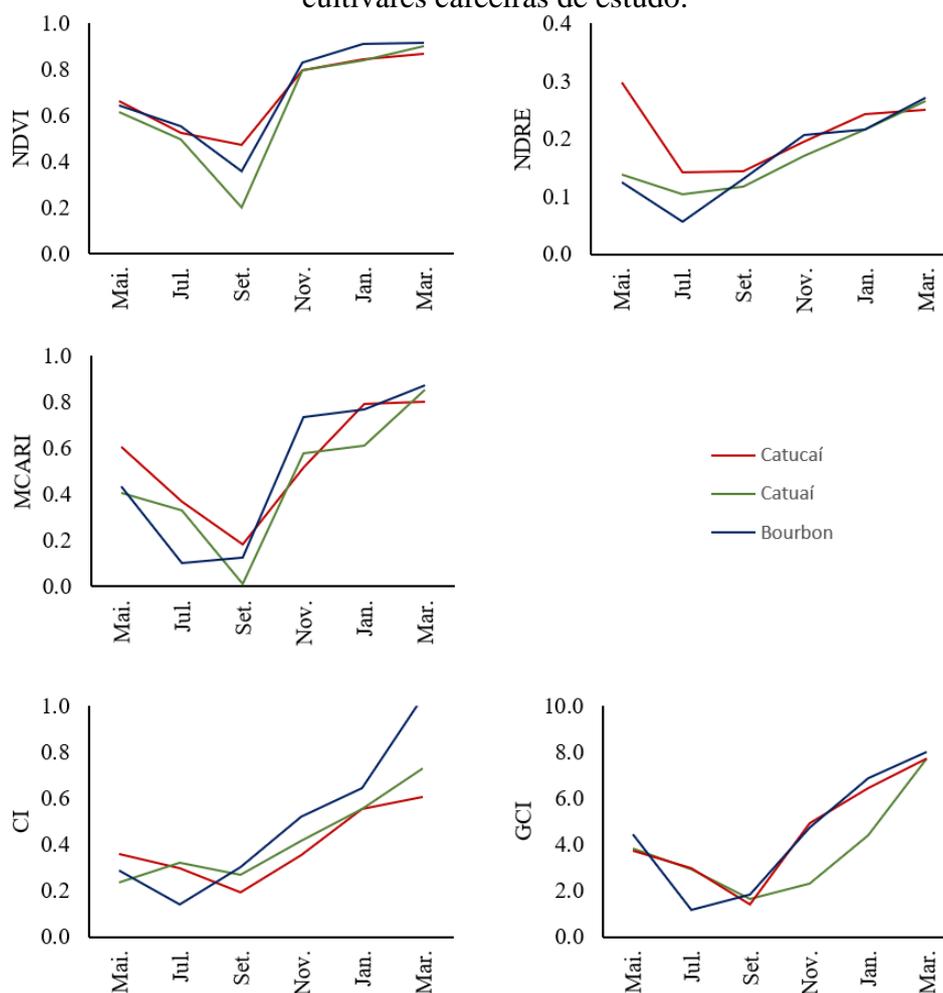
resistência ao déficit hídrico visando potencializar o desempenho da assimilação fotossintética do CO<sub>2</sub> para manter o crescimento e desenvolvimento, mantendo as atividades fisiológicas normalizadas e favorecendo os padrões metabólicos sem alterações que comprometam a dinâmica da espécie, sendo necessário uma diminuição no teor de água na folha suficientemente grande para promover a degradação das clorofilas (PELOSO *et al.*, 2017; ARAÚJO *et al.*, 2008). Esse comportamento dos pigmentos cloroplastídicos pode ainda estar relacionado com a amostragem das folhas para análise de clorofila, uma vez que a medição ocorreu em folhas aleatórias e diferentes em cada avaliação e com a escolha de folhas mais visíveis e livres da ação de queima e clorose devido a ação do frio (MESQUITA *et al.*, 2016) que pode ter tendenciado a medida.

Contudo, os dados obtidos pela metodologia de mensuração de clorofila pelo clorofilômetro portátil não explicam satisfatoriamente o comportamento térmico e pluviométrico evidenciado nas medições das demais variáveis analisadas. Deste modo a utilização da metodologia de medição de clorofila por utilização do clorofilômetro portátil não foi eficiente para evidenciar o comportamento das diferentes épocas deste estudo em questão, considerando plantas cafeeiras em fase inicial de desenvolvimento para o primeiro ano de formação da lavoura.

O comportamento temporal dos IVs de NDVI, NDRE, MCARI1, CI e GCI encontram-se apresentados na Figura 10. A utilização de IVs derivados de sensores remotos que ressaltam características específicas das plantas atuam como tecnologia de otimização do trabalho em campo, uma vez que promovem a obtenção de informações confiáveis para o monitoramento contínuo do desenvolvimento e condições de estresse em lavouras cafeeiras (MIRIK *et al.*, 2013).

Os IVs NDVI e NDRE variam de -1 a +1, em que os maiores valores estão associados à vegetação vigorosa e saudável (CORDEIRO *et al.*, 2017). No NDVI a utilização da banda do vermelho visível realça maior absorção da radiação pela atividade fotossintética e a banda do infravermelho próximo (*nir*) realça maior reflectância para plantas saudáveis devido a condição de espalhamento interno. Já o NDRE considera outra banda espectral de bastante interesse para o estudo de culturas agrícolas, que refere-se a banda de transição do vermelho limítrofe (*red edge*) a qual capta a luz refletida entre o visível e o infravermelho e por consequência serve melhor o propósito de indicador do vigor vegetativo possibilitando uma percepção mais rápida da transição das plantas saudáveis às inicialmente estressadas (RODRIGUEZ *et al.*, 2006).

Figura 10 - Análise temporal dos IVs: NDVI, NDRE, MCARI1, CI e GCI para as três cultivares cafeeiras de estudo.



Para este estudo os valores do NDVI reduziram nas três cultivares para os meses de julho e setembro, observando aumento para os meses seguintes de novembro, janeiro e março, com valores superiores para a cultivar Bourbon (0,9113) seguido pelas cultivares Catuaí (0,8973) e Catucaí (0,8661). Além dos efeitos térmicos Braga *et al.* (2003) evidenciaram em seus estudos que a vegetação leva em média de 30 a 60 dias para responder aos efeitos da variação do regime pluvial. Deste modo justifica-se a queda no índice para os meses secos (julho e setembro) em que os efeitos do acúmulo pluviométrico e térmico não afetaram os valores, em contraste ao acréscimo para os meses chuvosos (novembro, janeiro e março), em que tais variações já refletem em efeitos de desenvolvimento da cultura e conseqüentemente acréscimo ao NDVI. Resultados de redução do NDVI pela ação do déficit hídrico foram também evidenciados em estudos de Volpato *et al.* (2013), Alves (2015) e Almeida, Sediyaama e De Alencar (2017).

Nas cultivares estudadas o NDRE decresceu no mês de julho, observando aumento para os meses seguintes, indicativo de relação com o stress das plantas e do seu tecido foliar

enfraquecido, tanto pela ação térmica como pluviométrica. O maior valor do índice foi observado na cultivar Bourbon (0,2709), seguidos pelas cultivares Catuaí (0,2666) e Catuaí (0,2512). A maior sensibilidade ao déficit hídrico pela utilização deste índice (banda do vermelho limítrofe) evidenciou queda imediata aos valores para o mês de julho e aumento para o mês de setembro, no qual a ação pluviométrica influenciou suavemente no valor do índice, ressaltando valor ainda mais elevado para os meses de novembro, janeiro e março com maior acúmulo pluviométrico local.

Ressalta-se que a utilização do NDRE é mais indicada devido a facilidade de saturação do NDVI. Segundo Hatfield *et al.* (2008) os comprimentos de onda das bandas do NDRE, assim como a banda do verde, evitam a saturação e a perda concomitante da sensibilidade para valores de clorofila e são geralmente preferidos porque são mais sensíveis a moderados e altos teores de clorofila. A peculiaridade de rápida saturação do NDVI o torna insensível ao aumento da biomassa vegetal conforme o desenvolvimento vegetativo, deste modo, o índice estabiliza em um patamar apresentando sempre o mesmo valor (ou proximidade dele) embora haja aumento da densidade do dossel (MICHELON *et al.*, 2019). Percebe-se que para o mês de março os valores de NDVI já se aproximaram do limiar máximo admitido pelo IV de 1. Já os valores do NDRE apresentam valores que atendem à demanda de explicação do fenômeno, mas encontram-se ainda distante do limiar máximo de saturação do índice.

O MCARI1 consiste em uma equação que tem como variáveis as bandas do vermelho, verde e infravermelho próximo o qual foi desenvolvido para ser sensível à variação da clorofila devido a presença de materiais não fotossintetizantes, apresentando sensibilidade às alterações do IAF (DAUGHTRY *et al.*, 2000). Neste estudo observou-se redução no índice em todas as cultivares de estudo para o mês de julho. Para o mês de setembro as cultivares Catuaí e Catuaí continuaram apresentando redução ao valor do índice, já a cultivar Bourbon apresentou leve acréscimo. Nos meses seguintes de novembro, janeiro e março todas as cultivares apresentaram aumento considerável, sendo o maior valor observado para a cultivar Bourbon (0,8719), Catuaí (0,8557) e Catuaí (0,8037) respectivamente. A sensibilidade a detecção de clorofila pela utilização da banda do verde neste índice (HATFIELD *et al.*, 2008) evidenciou a ocorrência de noites frias nos meses de julho que propiciou queda imediata no índice, uma vez que o frio paralisa o desenvolvimento do tecido foliar e reduz os valores de clorofila nas folhas e também pela ação pluviométrica acumulada no mês de novembro que efetivaram aumento considerável aos valores do índice para este mês e para os meses seguintes.

O CI é utilizado para estimar o teor de clorofila no dossel de culturas agrícolas, utilizando a razão de refletividade nas bandas de bordas vermelha e infravermelho próximo. O

comportamento apresentado por este índice foi semelhante ao MCARI1 sendo que para o mês de março as cultivas Bourbon (1,0420), Catuaí (0,7306) e Catucaí (0,6091) obtiveram os valores mais elevados. Ao considerar a ação do efeito dos diferentes níveis de clorofila nas folhas, a redução para o mês de julho em todas as cultivares se justifica pela ação do frio que promove queda aos valores de clorofila com base na banda do vermelho limítrofe, mais sensível a tal variação e conseqüentemente nos valores observados para o índice (GITELSON *et al.*, 2005). A sensibilidade da banda do vermelho limítrofe porém não foi suficiente na combinação deste IV para detectar aumento já para o mês de setembro como detectado pelo NDRE nas cultivares Catucaí e Catuaí detectando somente para a cultivar Bourbon.

O GCI é também utilizado para estimar o teor de clorofila foliar em uma ampla gama de espécies de plantas utilizando a razão de refletividade nas bandas verde e infravermelho próximo, as quais fornecem uma boa previsão do conteúdo do pigmento, permitindo maior sensibilidade a sanidade das culturas (GITELSON *et al.*, 2003). O comportamento temporal deste índice foi semelhante aos índices MCARI1 e CI com maiores valores observados para o mês de março para as cultivares Bourbon (8,0345), Catuaí (7,7372) e Catucaí (7,7259) respectivamente.

Para os IVs somente o NDRE detectou sensibilidade a elevação pluviométrica e térmica já para o mês de setembro (último mês seco e frio) evidenciando aumento em todas as cultivares. O NDVI se apresentou de maneira padrão em todas as cultivares com aumento somente no mês de novembro (primeiro mês chuvoso e quente). Nos demais IVs MCARI1, CI e GCI a cultivar Bourbon respondeu mais rapidamente ao acúmulo da precipitação e aumento da temperatura, já apresentando elevação ao valor do IV para o mês de setembro, diferente das demais cultivares Catucaí e Catuaí que apresentaram elevação somente no mês de novembro.

Foi notório que para a cultivar Catuaí recomenda-se maiores cuidados no primeiro ano após o transplante, principalmente no período de baixa precipitação, uma vez que as variáveis de campo e IVs apresentaram maiores oscilações nas amplitudes de abrangência com diferença se comparada com as demais cultivares.

Observa-se, entretanto, que os valores de Chl t não seguiram tendência de comportamento similar aos IVs sensíveis a este pigmento. Essas variáveis (Chl t e IVs) captam variações temporais em escalas hierárquicas diferentes, uma vez que os IVs medidos por intermédio da resposta espectral consideram a integração da copa da planta como um todo, e o teor de clorofila medido por intermédio do clorofilômetro portátil considera a folha como indivíduo de estudo, indicando, portanto, diferentes processos nas cultivares cafeeiras, que em plantas jovens evidenciam maiores efeitos. Deste modo os IVs são indicadores mais

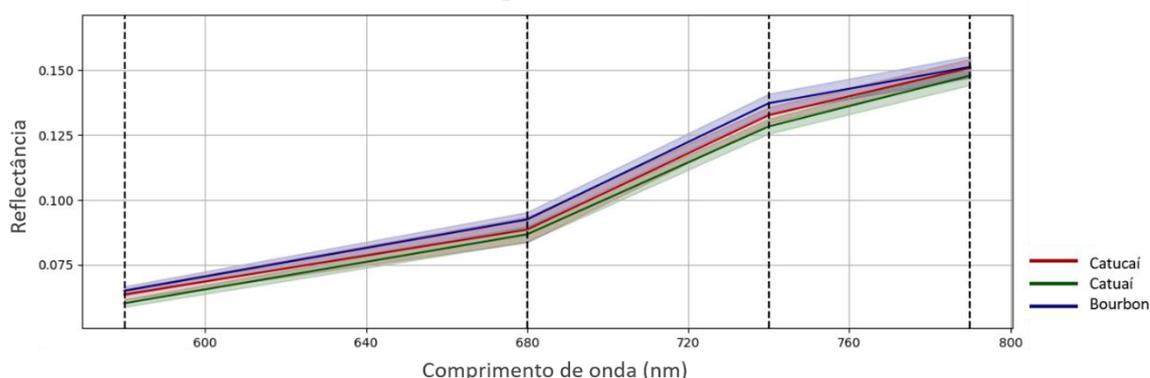
integrativos da copa, uma vez que identificaram a queima e desfolha causada pela queda de temperatura e ação pluviométrica na atuação dos valores de pigmentos cloroplastídicos. Portanto o comportamento apresentado pelos IVs corrobora com o crescimento vegetativo do cafeeiro, responsivo as condições ambientais externas, devido a influência climática, principalmente relacionado a temperatura do ar e precipitação atmosférica como evidenciado neste estudo.

### Caracterização Espectral

A caracterização do espectro de reflectância de alvos é evidenciada pela sua assinatura espectral a qual refere-se a reflectância em função do comprimento de onda (JENSEN, 2009). Cada objeto possui uma assinatura espectral única, podendo ser usada em diversas classificações (NASA, 2016), sendo neste estudo realçada as diferenças espectrais de cultivares cafeeiras. A assinatura espectral de uma folha é função primordialmente de sua composição, morfologia e estrutura interna, uma vez que os espaços intercelulares e os pigmentos existentes nos cloroplastos os constituintes das folhas são considerados como fatores importantes em tal caracterização (MOREIRA, 2011).

Na Figura 11 encontram-se traçadas as assinaturas espectrais das três cultivares cafeeiras para o período seco. Observa-se grande semelhança entre as assinaturas espectrais das três cultivares com sobreposição na amplitude de abrangência dos valores de reflectância espectral.

Figura 11 - Assinaturas espectrais das três cultivares cafeeiras Catucaí, Catuaí e Bourbon para o período seco.



Na faixa do verde (580 nm) a cultivar Bourbon apresentou valor de reflectância superior as demais cultivares, sendo evidenciado neste caso pela presença de pigmentos cloroplastídicos da planta, com maiores teores na cultivar Bourbon que nas demais cultivares. Entre as bandas

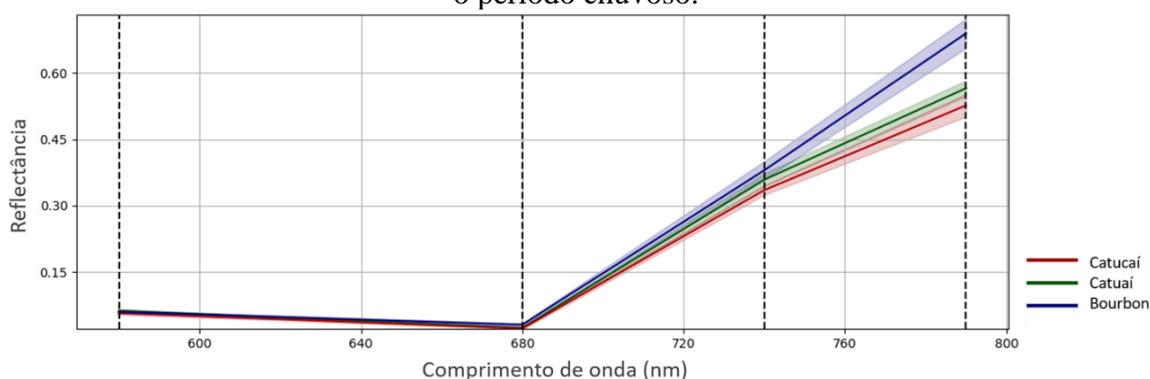
da região do visível esta faixa apresenta os maiores valores de reflectância para plantas saudáveis, sendo as alterações de maiores valores de reflectância para as demais faixas está associada a algum estresse submetido a vegetação e conseqüentemente alterações nos níveis dos pigmentos cloroplastídicos atuantes no comportamento e desenvolvimento das plantas.

Na faixa do vermelho (680 nm) novamente a cultivar Bourbon apresentou valor de reflectância superior as outras cultivares, faixa essa em que a reflectância é baixa e também afetada pelos pigmentos cloroplastídicos. Esperava-se entretanto valores inferiores de reflectância nesta faixa se comparado a faixa do verde, porém ao se tratar do estudo no período seco, destacam-se as respostas apresentada pelas cultivares pelos efeitos térmicos e pluviométricos, no qual houve redução nos teores dos pigmentos cloroplastídicos capaz de provocar queima aos tecidos nas folhas, fazendo com que as folhas apresentassem aparência amareladas ou cloróticas e de queima total ou parcial, que se expressa no comportamento da faixa vermelha, que em plantas estressadas se apresentam com aumento aos valores de reflectância nesta faixa espectral (MESQUITA *et al.*, 2016).

Nas faixas do vermelho limítrofe (740 nm) e infravermelho próximo (790 nm) o comportamento dos valores de reflectância das cultivares foram próximas com valores de reflectância média com destaque novamente para a cultivar Bourbon com valores superiores as demais cultivares, com maior sensibilidade a detecção de alterações evidenciados anteriormente pelos IVs.

Na Figura 12 encontram-se traçadas as assinaturas espectrais das três cultivares cafeeiras para o período chuvoso. Neste período observa-se grande semelhança entre as assinaturas espectrais das cultivares Catucaí e Catuaí e uma leve diferenciação da cultivar Bourbon com sobreposição na amplitude de abrangência dos valores de reflectância espectral para as bandas do verde, vermelho e vermelho limítrofe.

Figura 12 - Assinaturas espectrais das três cultivares cafeeiras Catucaí, Catuaí e Bourbon para o período chuvoso.



Na faixa do verde (580 nm) e do vermelho (680 nm) observa-se grande semelhança entre as reflectâncias das cultivares cafeeiras e com valores de reflectância superior ao observado no período seco. Diferentemente do observado para o período seco, verifica-se ainda, que a faixa do vermelho apresenta valores levemente inferiores aos valores da banda verde, fato que normalmente se observa em plantas saudáveis, uma vez que a região do vermelho absorve maior quantidade de energia radiante, devido à sua importância para os processos de fotossíntese (JENSEN, 2009).

Valores superiores de reflectância foram também observados para as faixas do vermelho limítrofe (740 nm) e do infravermelho próximo (790 nm) ao comparar com o seco, sendo a faixa do infravermelho próximo com maiores valores refletidos, evidenciando que plantas saudáveis têm pouca absorção do fluxo radiante nesta faixa, mas um aumento na reflectância devido à presença das estruturas vegetais e da morfologia interna das folhas (JENSEN, 2009). Em estudos de Chemura *et al.* (2017) também observou-se que os valores de reflectância nas folhas de café estavam superiores na região do infravermelho próximo quando comparado com a região do visível, pois folhas saudáveis apresentaram alto valores de reflectância no infravermelho próximo e folhas não sadias apresentaram redução nos valores de reflectância na região do infravermelho próximo, justificando neste estudo a atuação pluviométrica e térmica das épocas estudadas e seus efeitos nas cultivares cafeeiras.

Para ambos os períodos de estudo observa-se aproximação entre os perfis espectrais das cultivares cafeeiras, evidenciando pela sobreposição de valores conforme amplitude de distribuição dos valores de reflectância para as diferentes bandas espectrais, destacando a não possibilidade de individualização entre as cultivares cafeeiras na fase inicial de desenvolvimento e fixação no campo conforme espectro de reflectância espectral.

### **Análise Estatística**

Na Tabela 3 encontram-se descritas as diferenças estatísticas significativas determinadas para as variáveis de estudo (altura, diâmetro, IAF, Chl t e IVs) considerando o estudo entre cultivares cafeeiras para os períodos de estudo, divididos entre seco (meses maio, julho e setembro) e chuvoso (meses novembro, janeiro, março).

Na Tabela 3 verifica-se que para às variáveis medidas em campo de altura, diâmetro, IAF e Chl t a cultivar Bourbon sempre obteve valores superiores as demais cultivares, exceto para o diâmetro de copa no período seco que não detectou diferenças estatísticas significativas entre as cultivares estudadas.

Tabela 3 - Resultados da análise de diferenças estatísticas de comparação múltiplas pelo teste de Dunn à considerando períodos seco e chuvoso para as três cultivares cafeiras de estudo

Período	Seco			Chuvoso		
	Catucaí	Catuaí	Bourbon	Catucaí	Catuaí	Bourbon
Altura	39,0000 <b>B</b>	34,0000 <b>C</b>	43,5000 <b>A</b>	55,0000 <b>B</b>	53,0000 <b>B</b>	74,0000 <b>A</b>
Diâmetro	38,5000 <b>ns</b>	38,5000 <b>ns</b>	38,5000 <b>ns</b>	61,0000 <b>B</b>	62,5000 <b>B</b>	75,0000 <b>A</b>
IAF	0,0560 <b>AB</b>	0,0497 <b>B</b>	0,0578 <b>A</b>	0,1609 <b>B</b>	0,1587 <b>B</b>	0,3042 <b>A</b>
Chl t	60,1060 <b>B</b>	76,2352 <b>B</b>	107,5461 <b>A</b>	62,4363 <b>B</b>	67,3542 <b>B</b>	72,3014 <b>A</b>
NDVI	0,5314 <b>A</b>	0,4931 <b>B</b>	0,5350 <b>A</b>	0,8338 <b>C</b>	0,8516 <b>B</b>	0,8994 <b>A</b>
NDRE	0,1571 <b>A</b>	0,1195 <b>B</b>	0,1079 <b>B</b>	0,2107 <b>B</b>	0,2141 <b>B</b>	0,2236 <b>A</b>
MCARI1	0,3531 <b>A</b>	0,2916 <b>B</b>	0,1517 <b>B</b>	0,7720 <b>B</b>	0,6561 <b>B</b>	0,8158 <b>A</b>
CI	0,3037 <b>A</b>	0,2718 <b>B</b>	0,2549 <b>B</b>	0,5364 <b>B</b>	0,5456 <b>B</b>	0,6425 <b>A</b>
GCI	2,6725 <b>ns</b>	2,7145 <b>ns</b>	2,7490 <b>ns</b>	4,2556 <b>B</b>	6,3561 <b>A</b>	6,9511 <b>A</b>

\*letras iguais nas linhas indicam igualdade entre si ao nível significativo de 5% de probabilidade;

\*ns= não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

No período seco para a variável altura todas as cultivares se diferenciaram estatisticamente, sendo a cultivar Bourbon maior, seguido pelas cultivares Catucaí e Catuaí, e no período chuvoso detectado semelhanças estatísticas entre as cultivares Catucaí e Catuaí que se diferenciaram estatisticamente da cultivar Bourbon. Para o diâmetro de copa no período chuvoso detectou-se semelhanças estatísticas entre as cultivares Catucaí e Catuaí que diferenciaram do Bourbon não sendo detectadas diferenças estatísticas para o período seco. Para o IAF no período seco a cultivar Catucaí foi semelhante as demais, que se diferenciaram estatisticamente entre si e no período chuvoso a cultivar Bourbon se diferenciou estatisticamente das demais cultivares que foram semelhantes estatisticamente entre si. A Chl t apresentou semelhanças entre os períodos secos e chuvosos detectando semelhanças estatísticas significativas entre as cultivares Catucaí e Catucaí se diferenciando estatisticamente da cultivar Bourbon.

Conforme dados de Carvalho *et al.* (2007) segundo estudo desenvolvido pela Embrapa Consórcio Pesquisa Café a cultivar Bourbon apresenta porte alto e diâmetro de copa grande e as cultivares Catucaí e Catuaí apresentam por sua vez porte baixo e diâmetro de copa médio. No que diz respeito a estas variáveis, detectou-se semelhanças estatísticas significativas somente para o período chuvoso conforme descrito em literatura com relação a altura e diâmetro entre as cultivares Catucaí e Catuaí quando comparadas a cultivar Bourbon, sendo no período seco consideradas todas diferentes estatisticamente (altura) e iguais estatisticamente (diâmetro). O mesmo foi observado para o IAF no período chuvoso, que difere porém do período seco ao considerar semelhanças estatísticas entre as cultivares Catucaí e Bourbon, fato que normalmente não se verifica em estudos cafeeiros, mas que se justifica neste estudo ao

considerar a fase inicial de desenvolvimento pós transplântio das mudas, em que as plantas ainda encontram-se pequenas e com proximidade nos valores das variáveis medidas em campo.

Para a variável de Chl *t*, entretanto, independentemente da época, não se observou mudança no padrão comportamental ao contrastar o período seco do período chuvoso, assim como observado em estudos de Cai *et al.* (2005), em que verificaram que a ocorrência de uma restrição hídrica moderada não alterou os teores de clorofila em plantas de café.

Ainda conforme a Tabela 3 para os IVs o NDVI variou para as cultivares durante o ciclo de desenvolvimento, sendo observado para o período seco semelhanças estatísticas significativas entre as cultivares Catucaí e Bourbon que se diferenciaram da Catucaí, no entanto, para o período chuvoso esse comportamento foi distinto para cada cultivar. O NDRE, MCARI1 e CI apresentaram diferenças estatísticas significativas semelhantes para os dois períodos de estudo, observando-se para o período seco semelhanças estatísticas significativas entre as cultivares Catucaí e Bourbon e diferenças estatísticas significativas da cultivar Catucaí e para o período chuvoso semelhanças estatísticas significativas entre as cultivares Catucaí e Catucaí que se diferenciaram estatisticamente da cultivar Bourbon. O GCI não detectou diferenças estatísticas entre as cultivares para o período seco, sendo que para o período chuvoso detectou semelhanças estatísticas entre as cultivares Catucaí e Bourbon que se diferenciaram da Catucaí.

A detecção de semelhanças e diferenças estatísticas significativas se apresentou de forma similar entre os IVs, exceto para o NDVI e GCI, sendo notório que a ação pluviométrica e térmica propicia a modificação das variáveis que refletem por sua vez mudanças estatísticas captadas. O NDVI e GCI detectaram diferenças estatísticas não coincidentes com nenhum outro IV. No NDRE, MCARI1 e CI o padrão foi o mesmo e no GCI as diferenças estatísticas significativas foram por sua vez somente detectadas no segundo período de estudo (chuvoso) de menor déficit hídrico e de temperaturas menos elevadas, com semelhanças entre as cultivares Catucaí e Bourbon.

Os resultados provenientes do IVs demonstraram que cada cultivar apresenta um comportamento distinto, o que está relacionado com suas características morfológicas e de desenvolvimento inicial da cultura, com maior semelhança observada entre as cultivares Catucaí e Catucaí que se diferem mais fortemente da cultivar Bourbon para a maioria das variáveis analisadas. Destaca-se ainda que os resultados não se mantiveram os mesmos ao longo do desenvolvimento da cultura, neste estudo evidenciado pela separação entre períodos seco e chuvoso, que pode ser explicado pelo início da fixação das mudas em campo, bem como pela influência do ambiente, que pode interferir nos valores obtidos pelos IVs.

Deste modo, com relação às características associadas aos períodos de estudo somente

a altura das plantas no período seco e somente o NDVI no período chuvoso foram eficientes na discriminação e individualização das cultivares estudadas. Já conforme as considerações de semelhanças com relação ao porte das cultivares Catucaí e Catuaí descritas em literatura, detectou-se neste estudo somente para o período chuvoso em que as plantas de café já estão mais desenvolvidas e com mais de um ano de fixação no campo, sendo observados além da altura e diâmetro de copa semelhanças estatísticas significativas nos IVs NDRE, MCARI1, CI. Evidencia, portanto, que o aumento do tempo de fixação no campo, efeitos da ação pluviométrica e aumento da temperatura média influencia positivamente nas semelhanças observadas entre as cultivares cafeeiras Catucaí e Catuaí e diferenciação da cultivar Bourbon.

### Correlação e Estimação de Equação Linear pelos IVs

Na Tabela 4 encontram-se descritos os Coeficientes de Correlação de Spearman ( $\rho$ ), Coeficientes de Determinação ( $R^2$ ) e a Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) para os dados de Chl t e IAF com relação aos dados dos IVs para as três áreas para o período de estudo.

Tabela 4 - Coeficientes de Correlação de Spearman ( $\rho$ ), Coeficientes de Determinação ( $R^2$ ) e a Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) para as três cultivares cafeeiras de estudo

IVs	Chl t			IAF		
	RMSE	$R^2$	$\rho$	RMSE	$R^2$	$\rho$
<b>Catucaí</b>						
NDVI	26,505	-0,012	-0,053	0,068	0,483	0,536
NDRE	26,969	-0,047	-0,231	0,092	0,062	0,319
MCARI1	26,346	0,001	-0,096	0,075	0,377	0,679
CI	26,072	0,021	-0,053	0,069	0,470	0,629
GCI	25,179	0,087	-0,092	0,066	0,568	0,723
<b>Catuaí</b>						
NDVI	28,540	-0,008	-0,146	0,086	0,382	0,634
NDRE	28,712	-0,020	-0,133	0,060	0,704	0,848
MCARI1	28,813	-0,028	-0,038	0,076	0,520	0,737
CI	28,663	-0,017	-0,078	0,055	0,751	0,875
GCI	28,636	-0,015	-0,112	0,068	0,512	0,790
<b>Bourbon</b>						
NDVI	21,406	0,532	-0,179	0,179	0,493	0,662
NDRE	27,442	0,231	-0,480	0,151	0,598	0,773
MCARI1	22,900	0,464	-0,681	0,171	0,484	0,695
CI	27,158	0,247	-0,496	0,130	0,701	0,836
GCI	23,544	0,434	-0,658	0,164	0,527	0,726

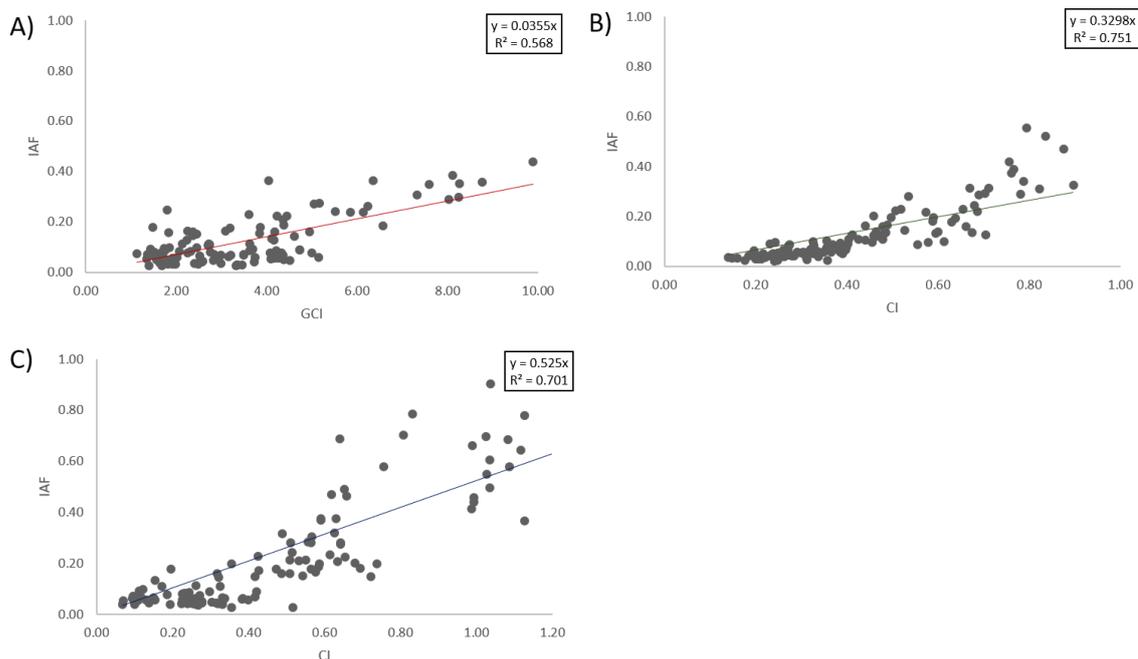
As correlações entre os dados de Chl t e os IVs foram verificadas, porém com fraca correlação estatística para todas as cultivares estudadas, evidenciados pelo baixo valor do

coeficiente de correlação de Spearman, baixo coeficiente de determinação e erro considerado como elevado fato este que não garante a correta estimativa de equação de regressão.

Já as correlações entre o IAF e os IVs foram verificadas e observado que para a cultivar Catucaí os IVs MCARI1, CI e GCI apresentaram coeficiente de correlação considerado como forte (0,679, 0,629 e 0,723) e erro reduzido (0,075, 0,069 e 0,066), porém somente o GCI apresentou coeficiente de determinação moderado e aceitável (0,568). Já para as cultivares Catucaí e Bourbon todos os IVs apresentaram coeficiente de correlação de moderado a forte porém somente os IVs NDRE e CI apresentaram coeficiente de determinação de médio a alto (0,704 e 0,751 para o Catucaí e 0,598 e 0,701 para o Bourbon) e erro reduzido (0,060 e 0,068 para o Catucaí e 0,151 e 0,130 para o Bourbon) evidenciando maiores valores para o IV CI para ambas as cultivares.

Considerando as cultivares estudadas, os modelos que melhor representam as relações entre o IAF e os dados de radiometria expresso pelos IVs (Tabela 4) foram selecionados observando-se os maiores coeficientes estatísticos de correlação de Spearman ( $\rho$ ) e determinação ( $R^2$ ), bem como os valores de estimativa do erro (RMSE). Deste modo, foram propostos os modelos de regressão linear do IAF com o GCI para a cultivar Catucaí, do IAF com o CI para as cultivares Catucaí e Bourbon (Figura 13) expresso por meio da equação de regressão que podem por sua vez estimar os valores de IAF de maneira indireta pela utilização dos IVs.

Figura 13 - Gráficos de dispersão, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e equações de regressão entre IAF e (A) GCI- Catucaí (B) CI- Catucaí (C) CI- Bourbon.



## 4 CONCLUSÕES

- A análise do comportamento temporal dos dados medidos em campo e dos índices de vegetação seguiram o padrão das épocas (seca e chuvosa), evidenciando redução nos valores observados para a época seca e fria e aumento para a época chuvosa e quente, exceto para dados de clorofila que não seguiram o padrão de modificação coerente com as épocas consideradas. Com relação aos dados de altura de planta, apesar de não apresentarem queda nos meses secos, foi possível observar uma redução na magnitude do crescimento dos dados quando comparada aos meses referentes a época chuvosa. Já os IVs foram mais sensíveis na detecção de acréscimos já no fim da época seca para a cultivar Bourbon, a qual apresentou elevação a partir do mês de setembro, sendo que nas demais cultivares o acréscimo foi observado somente em novembro, com exceção do NDRE capaz de detectar aumento em todas as cultivares já no mês de setembro;
- A caracterização do espectro de reflectância permitiu a identificação entre as cultivares para a época seca e chuvosa, porém não foi possível diferenciar e individualizar as cultivares de estudo devido à sobreposição na amplitude de abrangência dos valores de reflectância espectral;
- Para as diferenças estatísticas detectou-se variações entre os períodos de estudo para as cultivares, exceto para dados de clorofila que não apresentaram alteração no padrão comportamental conforme as diferentes épocas estudadas. Evidenciou-se semelhanças estatísticas entre as cultivares Catucaí e Catuaí que se diferenciaram da cultivar Bourbon somente o período chuvoso. Foi possível a individualização das cultivares no período seco para a variável altura e para o período chuvoso pela variável NDVI;
- Observou-se baixa correlação estatística entre as variáveis radiométricas obtidas por intermédio dos IVs com a variável Chl t não sendo possível estimar equação entre tais variáveis, diferente do observado entre os dados radiométricos dos IVs e o IAF, o qual obteve maiores coeficientes de correlação, determinação e menor RMSE, possibilitando a geração de modelos de regressão linear do IAF com o GCI para a cultivar Catucaí e CI para as cultivares Catuaí e Bourbon.
- Foi possível ainda a geração de um banco de dados para comparação em estudos de experimentos futuros referente as variáveis aferidas em campo bem como aos dados radiométricos obtidos pelos índices de vegetação.

## REFERÊNCIAS

- ABIC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ. **Dados sobre a cultura cafeeira**. Disponível em <<http://abic.com.br/>>. Acesso em: 05 jan. 2020.
- ALÈGRE, C. Climats et caféiers d'Arabie. **Agronomie Tropicale**, v.14, p.23-58, 1959.
- ALMEIDA, T. S.; SEDIYAMA, G. C.; DE ALENCAR, L. P. Estimativa da produtividade de cafeeiros irrigados pelo método zona agroecológica espectral. **Revista Engenharia Na Agricultura-REVENG**, v. 25, n. 1, p. 1-11, 2017.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Vol. 22, Nº. 6, 711–728, 2013.
- ALVES, J. D. Reflexões Sobre A Poda Do Café. **Revista Cafeicultura**, 2015.
- AMARAL, J. A. T. do; RENA, A. B.; AMARAL, J. F. T. do. Crescimento vegetativo sazonal do cafeeiro e sua relação com fotoperíodo, frutificação, resistência estomática e fotossíntese. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 377-384, 2006.
- ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. Asymptotic Theory of Certain "Goodness of Fit" Criteria Based on Stochastic Processes. **Annals... of Mathematical Statistics**. no. 2, 193--212. 23, 1952.
- ARAÚJO, W. L. Limitations to photosynthesis in coffee leaves from different canopy positions. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 46, n. 10, p. 884-890, Out. 2008.
- AtLEAF– **atLEAF chlorophyll meter**. Disponível em <<https://www.agriculturesolutions.com/atleaf-digital-chlorophyll-meter>>. Acesso em: 03 abr. 2019.
- BRAGA, C. C. *et al.* Tempo de resposta da vegetação às variabilidades sazonais da precipitação no Nordeste do Brasil. Santa Maria. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 1, p. 149-157, 2003.
- BUSCHMANN, C.; NAGEL E. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. **International Journal of Remote Sensing** 14(4), p.711-722, 1993.
- CAI, Z. Q. *et al.* Responses of two field-grown coffee species to drought and rehydration. **Photosynthetica**, v. 43, n. 2, p. 187- 193, 2005.
- CARRIJO, G. L. *et al.* Automatic detection of fruits in coffee crops from aerial images. **Annals...** In Latin American Robotics Symposium (LARS) and 2017 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), 2017.
- CARVALHO, A; FAZUOLI, L. C; In: Furlani, A. M. C; VIEGAS, G. P. O melhoramento de plantas no Instituto Agrônomo. Campinas: **Instituto Agrônomo**, p. 29-76, 1993.
- CARVALHO, C. H. S. de. **Cultivares de café**. / (Ed.) Brasília: EMBRAPA. 247 p, 2007.
- CHEMURA, A. *et al.* Remote sensing leaf water stress in coffee (*Coffea arabica*) using secondary effects of water absorption and random forests. **Physics and Chemistry of the**

**Earth**, Parts A/B/C, v. 100, p. 317-324, 2017.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: café** – v. 6, n. 3 (2020) – Brasília: Conab, 2020. Quadrimestral Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. ISSN 2318-7913. Acesso em: 20 out, 2020.

CORDEIRO, A. P. A. *et al.* Regiões Homogêneas De Vegetação Utilizando A Variabilidade Do NDVI. **Ciências Florestais**, Santa Maria, v. 27, n. 3, p. 883-896, 2017.

CUNHA, J. P. A. R.; SIRQUEIRA NETO, M. A.; HURTADO, S.M. C. Estimating Vegetation Volume Of Coffee Crops Using Images From Unmanned Aerial Vehicles. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 39, n. spe, p. 41-47, 2019.

DAUGHTRY, C. S. T. *et al.* Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, n. 2, p. 229-239, 2000.

DEMSAR, J. *et al.* Orange: Data Mining Toolbox in Python, **Journal of Machine Learning Research**, Aug: 2349–2353, 2013.

DJI – **UAV Matrice 100**. (2015). Disponível em < <https://www.dji.com/br/matrice100>>. Acesso em: 22 dez. 2018.

DUNN, O. J. Multiple Comparisons Using Rank Sums. **Technometrics**. 6 (3): 241–252, 1964.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Baruqui, A. M. Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da zona Campos das Vertentes. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento: ISSN 1678- 0892**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro. 412 pp. 2005, 1999.

ESRI – **ArcGIS: Software**. Disponível em < <http://www.esri.com/software/arcgis/index>>. Acesso em: 22 nov. 2018.

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

FERRAZ, G. A. E S. *et al.* Variabilidade espacial dos atributos da planta de uma lavoura cafeeira. **Revista Ciência Agronômica**. Fortaleza, v. 48, n. 1, p. 81-91, 2017.

FREITAS, Z. M. T. S. *et al.* Avaliação de caracteres quantitativos relacionados com o crescimento vegetativo entre cultivares de café arábica de porte baixo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 2, p. 267-275, 2007.

GITELSON, A. A. *et al.* Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 8, p. L08403, 2005.

GITELSON, A. A. *et al.* Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. **Geophysical Research Letters**. 30(5):1248, 2003.

HABOUDANE, D. *et al.* Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modelling and validation in the context of precision

agriculture. **Remote Sensing of Environment**, 90(3), p. 337- 352, 2004.

HATFIELD, J. L. *et al.* Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. **Agronomy Journal**, v. 100, n. Supplement3, p. S-117, 2008.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normal Climatológica do Brasil**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 06 jan. 2020.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2 ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

KRUSKAL, W. H., WALLIS, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. **American Statistical Association**, v.47, n.260, p.583-621, 1952.

LI, G. *et al.* Leaf chlorophyll fluorescence, hyperspectral reflectance, pigments content, malondialdehyde and proline accumulation responses of castor bean (*Ricinus communis* L.) seedlings to salt stress levels. **Industrial crops and products**, 31:13-19, 2010.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Dados sobre a agricultura do café**. (2018). Disponível em <[www.agricultura.gov.br](http://www.agricultura.gov.br)>. Acesso em: 01 nov. 2018.

MESQUITA, C. M. *et al.* **Manual do café: implantação de cafezais Coffea arábica L.** Belo Horizonte: EMATER-MG, 2016.

MICASENSE – **PARROT SA**. Disponível em <<https://www.parrot.com/global/>>. Acesso em: 22 nov. 2018.

MICHELON, D. *et al.* Uso Do Sensoriamento Remoto Com Vants: Possibilidade De Aquisição De Dados Para Agricultura. **Ciência & Tecnologia**, v. 3, n. 1, p. 23-35, 2019.

MIRIK, M. *et al.* Remote monitoring of wheat streak mosaic progression using sub-pixel classification of Landsat 5 TM imagery for site specific disease management in winter wheat. **Advances In Remote Sensing**, v. 02, p.16-28,2013.

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

NASA – ADMINISTRAÇÃO NACIONAL DA AERONÁUTICA E ESPAÇO. **Remote Sensing: Spectral Signatures**. 2016. Disponível em: <[http://earthobservatory.nasa.gov/Features/RemoteSensing/remote\\_05.php](http://earthobservatory.nasa.gov/Features/RemoteSensing/remote_05.php)>. Acesso em: 22 nov. 2018.

OLIVEIRA, J. A. *et al.* Segmenting and Detecting Nematode in Coffee Crops Using Aerial Images. **Computer Vision Systems**. Lecture Notes in Computer Science,2019.

PADILLA, F. M. *et al.* Different Responses of Various Chlorophyll Meters to Increasing Nitrogen Supply in Sweet Pepper. **Frontiers in Plant Science**. v. 9, n. 1752, 2018.

PELOSO, A. de F. *et al.* Limitações fotossintéticas em folhas de cafeeiro arábica promovidas pelo déficit hídrico. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 389 - 399, 2017

PEREIRA, A. R.; CAMARGO, M. B. P. de; VILLA NOVA, N. A.; Coffee crop coefficient for precision irrigation based on leaf area index. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p. 946-951, 2011.

PIX4D – **PIX4D Mapper**. (2019). Disponível em <<https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>>. Acesso em: 22 dez. 2018.

PRECISION HAWK. **Precision Flight**. (2010). Disponível em <<https://www.precisionhawk.com/>>. Acesso em: 22 dez. 2018.

QGIS Development Team (2019). **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project.

R Development Core Team (2009). **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.

RODRIGUEZ, D. *et al.* Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop eco-physiological concepts. **Australian Journal of Agricultural Research**, 2006.

ROUSE, J. W. *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Symposium, **Annals...Third ERTS**, 309–317, 1973.

SANTOS, L. M. *et al.* Biophysical parameters of coffee crop estimated by UAV RGB images. **Precision Agriculture**, p. 1-15, 2020.

TSOUROS, D. C.; BIBI, S.; SARIGIANNIDIS, P. G. A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture. **Information**, v. 10, n. 11, p. 349, 2019.

VOLPATO, M. M. L. *et al.* Imagens do sensor MODIS para monitoramento agrometeorológico de áreas cafeeiras. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 2, p. 176-182, 2013.