

RENATO AURÉLIO SEVERINO DE MENEZES FREITAS

CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE CULTIVARES DE CAFEEIROS E  
MONITORAMENTO DE PARÂMETROS FITOTÉCNICOS APÓS PODA A PARTIR DE  
IMAGENS MULTIESPECTRAIS

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

Orientador

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Gleice Aparecida de Assis

Coorientador

Prof. Dr. George Deroco Martins

MONTE CARMELO  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2020

RENATO AURÉLIO SEVERINO DE MENEZES FREITAS

CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE CULTIVARES DE CAFEEIROS E  
MONITORAMENTO DE PARÂMETROS FITOTÉCNICOS APÓS PODA A PARTIR DE  
IMAGENS MULTIESPECTRAIS

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

APROVADA em 16 de dezembro de 2020

Banca examinadora

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Gleice Aparecida Assis – Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. George Deroco Martins – Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Anderson William Dominghetti – Instituto Federal do Espírito Santo

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Gleice Aparecida Assis  
Instituto de Ciências Agrárias – ICIAG

MONTE CARMELO  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2020

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

F866 2020	<p>Freitas, Renato Aurélio Severino de Menezes, 1994- CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE CULTIVARES DE CAFEEIROS E MONITORAMENTO DE PARÂMETROS FITOTÉCNICOS APÓS PODA A PARTIR DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS [recurso eletrônico] / Renato Aurélio Severino de Menezes Freitas. - 2020.</p> <p>Orientadora: Gleice Aparecida de Assis. Coorientador: George Deroco Martins. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Agricultura e Informações Geoespaciais. Modo de acesso: Internet. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.846">http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.846</a> Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Agronomia. I. Assis, Gleice Aparecida de, 1986-, (Orient.). II. Martins, George Deroco, 1987-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Agricultura e Informações Geoespaciais. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 631</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

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



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agricultura e Informações Geoespaciais				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado				
Data:	16/12/2020	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	11:00
Matrícula do Discente:	31922AIG010				
Nome do Discente:	Renato Aurélio Severino de Menezes Freitas				
Título do Trabalho:	Caracterização espectral de cultivares de cafeeiros e monitoramento de parâmetros fitotécnicos após a poda a partir de imagens multiespectrais				
Área de concentração:	Informações geoespaciais e tecnologias aplicadas à produção agrícola				
Linha de pesquisa:	Sistemas integrados de produção vegetal				

Reuniu-se na sala virtual da plataforma Google Meet (meet.google.com/mqd-acxi-pug) a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais, assim composta: Dr. Anderson William Dominghetti (IFES/Campus Centro Serrano); Dr. George Deroco Martins (FECIV/UFU); Dra. Gleice Aparecida de Assis (ICIAG/UFU – orientadora do candidato).

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

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

Aprovado com louvor.

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

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

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



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

---



Documento assinado eletronicamente por **George Deroco Martins, Professor(a) do Magistério Superior**, em 17/12/2020, às 17:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Anderson William DomingheU, Usuário Externo**, em 18/12/2020, às 08:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2460642** e o código CRC **E0509AA5**.

---

---

## **DEDICATÓRIA**

A Deus, meu alicerce.

Aos meus queridos pais João Severino de Freitas e Viridiane Martins Moraes Severino, meus irmãos Pedro Severino de Menezes Neto e João Severino de Freitas Filho por todo carinho, apoio e compreensão nos momentos de ausência.

## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho contou com a colaboração direta e indireta de diversas pessoas, a quem manifesto meus sinceros agradecimentos:

Em primeiro lugar a Deus, pela minha vida e por me conceder a graça de conviver com pessoas extraordinárias que me ensinaram muito nesse período.

A minha orientadora Prof<sup>ra</sup>. Dra. Gleice Aparecida Assis, pelos conhecimentos acadêmicos transmitidos, pela paciência e pelos momentos de incentivo, dedicação, sugestões e críticas sempre construtivas que me ajudaram a crescer durante esta jornada.

Ao meu coorientador Prof. Dr. George Deroco Martins pelo incentivo e recomendações que foram essenciais para que pudesse desenvolver e finalizar este trabalho, bem como a dedicação e disponibilização de seu tempo, sugestões e críticas construtivas.

A Professora Dra. Ana Carolina Silva Siquieroli que auxiliou na metodologia e desenvolvimento de uma parte crucial do trabalho que culminou em resultados excepcionais, bem como a dedicação, sugestão e críticas construtivas que somaram no trabalho.

A Professora Dra. Adriana Tiemi Nakamura que auxiliou na metodologia e desenvolvimento de uma parte crucial do trabalho e culminou em resultados excepcionais, bem como a disponibilização do espaço físico do laboratório, equipamentos e conhecimento que somaram no trabalho.

Ao meu amigo Renan Zampiroli pela dedicação e disponibilização do equipamento necessário para monitoramento e registro de imagens necessárias para o desenvolvimento do trabalho, reflexões e discussões sobre o tema da dissertação.

Ao Núcleo de Estudos em Cafeicultura do Cerrado (NECACER) e todos os discentes colaboradores: Marco Iony, Winicius Dutra, Bruno Pinheiro, Maria Olívia, Letícia, Deyvid, Nathalia, Werik Dias e João Henrique que me auxiliaram nas atividades de campo, coleta, preparo de amostras e avaliações.

Aos meus amigos Gustavo Mundim, Juliano Marques, Glecia do Carmo e Bruno Póvoa pelos momentos de auxílio, reflexões e discussões sobre o tema da dissertação, trazendo sempre uma palavra amiga nos momentos difíceis.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais e a Universidade Federal de Uberlândia pelo auxílio financeiro, disponibilização do espaço físico, colaboradores, área experimental, equipamentos e materiais para o desenvolvimento da pesquisa.

## BIOGRAFIA

Renato Aurélio Severino de Menezes Freitas nasceu em Ituiutaba – MG, em 29 de janeiro de 1994. Filho de caminhoneiro mudou-se para Uberlândia ainda criança, onde estudou até os oito anos de idade até se mudar para a cidade de Comodoro – MT, onde residiu por um ano devido à profissão de seu pai. Por ser uma cidade muito pequena e o ensino precário, seu pai João Severino de Freitas decidiu retornar à Uberlândia, a fim de, prover uma boa educação para seus filhos e maior comodidade para sua família.

Novamente em Uberlândia, estudou em duas escolas públicas sendo a Escola Municipal Domingos Pimentel de Ulhôa até a 9ª série, transferindo para a Escola Estadual Segismundo Pereira para concluir o Ensino Médio. Ante a exigência familiar para que obtivesse um diploma, ingressou na Universidade Federal de Uberlândia em 2012 concluindo o curso de Agronomia em 2017, ano em que ingressou no serviço público na mesma Universidade em que havia se formado.

Desde 11 de setembro de 2017 trabalha na Universidade Federal de Uberlândia – *Campus* Monte Carmelo, como Técnico de Laboratório em Fitotecnia, onde tem a oportunidade de aprender e trabalhar lado a lado com profissionais de extrema competência. Dentre suas funções as principais são, auxiliar na preparação de aulas teóricas e práticas, reunindo equipamentos e materiais necessários, de acordo com o solicitado pelo docente em atividades de ensino pesquisa e extensão, realizar coleta de amostras (vegetais, solo, substratos, fertilizantes), montagem de campo experimental, coleta de dados nas culturas da soja, milho, café, canola, trigo e braquiária.

No dia 06 de agosto de 2019 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais da Universidade Federal de Uberlândia – *Campus* Monte Carmelo, onde foi orientado pela Prof. Dra. Gleice Aparecida Assis, especialista na cultura do cafeeiro. Desenvolveu uma pesquisa voltada para o acompanhamento fitotécnico de cultivares de cafeeiros da espécie *Coffea arabica* L., manejo de podas e a inserção de novas tecnologias no monitoramento e aquisição de dados por meio de imagens multiespectrais adquiridas com Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), sensoriamento remoto e fotogrametria da vegetação, recebendo o título de “Mestre” no dia 16 de dezembro de 2020.



## SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT .....	ii
INTRODUÇÃO GERAL .....	1
<b>CAPÍTULO I. Caracterização hiperespectral e modelos de estimativa de parâmetros agronômicos de cultivares de cafeeiros após poda .....</b>	<b>3</b>
ABSTRACT .....	4
INTRODUÇÃO .....	5
MATERIAL E MÉTODOS .....	6
Aquisição dos parâmetros agronômicos .....	7
Determinação dos parâmetros bioquímicos e estruturais das folhas para caracterização hiperespectral das cultivares de cafeeiros.....	12
Determinação dos índices de vegetação .....	15
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	17
Curvas espectrais das cultivares de cafeeiros.....	17
Modelos de predição .....	27
CONCLUSÕES.....	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	33
<b>CAPÍTULO II. Imagens multiespectrais no monitoramento de parâmetros fitotécnicos de <i>Coffea arabica</i> L. após a poda.....</b>	<b>39</b>
ABSTRACT .....	40
INTRODUÇÃO .....	41
MATERIAL E MÉTODOS .....	42
Aquisição de dados.....	43
Confecção dos mosaicos, calibração radiométrica e georreferenciamento .....	47
Normalização e registro de imagens.....	48
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	50
Modelos de predição .....	50
Representação gráfica gerada a partir dos modelos de regressão .....	56
CONCLUSÕES.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63

## RESUMO

FREITAS, RENATO AURÉLIO SEVERINO DE MENEZES. **Caracterização espectral de cultivares de cafeeiros e monitoramento de parâmetros fitotécnicos após poda a partir de imagens multiespectrais.** 2020, página 9-76. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Informações Geoespaciais) – Universidade Federal de Uberlândia, *Campus Monte Carmelo*, Minas Gerais, Brasil<sup>1</sup>.

As cultivares de *Coffea arabica* L. no Brasil apresentam características diferenciadas quanto ao desenvolvimento vegetativo e adaptações às condições edafoclimáticas. Porém, em função da interação genótipo ambiente, se torna fundamental verificar o comportamento vegetativo e produtivo dos materiais genéticos em cada região de cultivo. O objetivo com a realização deste trabalho foi caracterizar espectralmente cultivares de cafeeiros e monitorar os parâmetros fitotécnicos de cafeeiros arábica após a poda. Para a caracterização espectral das cultivares de cafeeiros foram estabelecidos parâmetros bioquímicos e estruturais a nível foliar a fim de simular a curva de reflectância da vegetação. Para o monitoramento dos parâmetros fitotécnicos realizou-se a coleta de imagens multiespectrais por meio da câmera *Mapir Survey 3* embarcada a uma aeronave remotamente pilotada (ARP). Os dados foram submetidos a análises estatísticas, onde a partir dos intervalos espectrais de maior discrepância entre as cultivares, foram criados modelos de estimativa dos parâmetros agrônômicos. Pela análise dos dados da caracterização espectral foi possível discriminar os genótipos de cafeeiros, sendo que cada cultivar apresentou um comportamento distinto entre si, onde as maiores discrepâncias foram observadas na região espectral do visível. Pela análise de dados realizado a partir das imagens multiespectrais foi possível estimar os parâmetros agrônômicos de cafeeiros após o manejo de poda do tipo decote, sendo altura por meio do voo de abril e a banda do infravermelho próximo (Precisão = 91,87%), diâmetro de copa e comprimento de ramos plagiotrópicos por meio do voo de abril e a banda do vermelho (Precisão = 89,36% e 82,22%, respectivamente), número de nós por meio do voo de fevereiro e a banda do infravermelho próximo (Precisão = 79,48%) e número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda por meio do voo de junho e a banda do infravermelho próximo (Precisão do modelo = 69,57%).

**Palavras-chave:** cafeeiro, decote, dados espectrais, índice de vegetação, ARP, sensoriamento remoto.

---

<sup>1</sup>Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Gleice Aparecida de Assis

## ABSTRACT

FREITAS, RENATO AURÉLIO SEVERINO DE MENEZES. **Spectral characterization of coffee cultivars and monitoring of phytotechnical parameters after pruning from multispectral images.** 2020, page 9-76. Dissertation (Master in Agriculture and Geospatial Information), Federal University of Uberlândia, *Campus* Monte Carmelo, Minas Gerais, Brazil.

The cultivars of *Coffea arabica* L. in Brazil have different characteristics regarding vegetative development and adaptations to edaphoclimatic conditions. However, due to the interaction between genotype and environment, it is essential to verify the vegetative and productive behavior of genetic materials in each region of cultivation. The objective with this work was to spectrally characterize coffee cultivars and monitor the phytotechnical parameters of arabica coffee plants after pruning. For the spectral characterization of coffee cultivars, biochemical and structural parameters were established at leaf level in order to simulate the vegetation reflectance curve. For the monitoring of phytotechnical parameters, multispectral images were collected using the Mapir Survey 3 camera on board a remotely piloted aircraft (ARP). The data were subjected to statistical analysis, where from the spectral intervals of greatest discrepancy between cultivars, models for estimating agronomic parameters were created. By analyzing the spectral characterization data, it was possible to discriminate the coffee genotypes, and each cultivar presented a different behavior between them, where the largest discrepancies were observed in the visible spectral region. By analyzing data from multispectral images, it was possible to estimate the agronomic parameters of coffee trees after decote-type pruning, being height through the april flight and the near infrared band (Accuracy = 91.87%), crown diameter and length of plagiotropic branches through the april flight and the red band (Accuracy = 89.36% and 82.22%, respectively), number of nodes through the february flight and the near infrared band (Accuracy = 79.48%) and number of plagiotropic branches from the pruning point through the june flight and the near infrared band (Accuracy of the model = 69.57%).

**Keywords:** coffee tree, decote-type pruning, spectral data, vegetation index, RPA, remote sensing.

## INTRODUÇÃO GERAL

O cafeeiro é uma cultura de grande importância socioeconômica para o Brasil. A área plantada com *Coffea arabica* L. no país totaliza 1,75 milhão de hectares, correspondendo a 81,3% do total cultivado com essa cultura no território nacional. Minas Gerais possui 1,22 milhão de hectares plantados desta espécie, sendo assim o estado concentra 72,1% da área ocupada com café arábica no território nacional (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2020).

O cultivo de cafeeiros da espécie *C. arabica* é caracterizado por ser uma atividade conduzida em áreas extensas, havendo a necessidade de plantio de diversas cultivares em uma mesma propriedade com ciclos de maturação distintos para facilitar o escalonamento da colheita. Por se tratar de uma cultura perene, onde o produtor conviverá com a cultura por muitos anos em sua propriedade, se fazem necessárias táticas de manejo alternativas que sejam econômicas e sustentáveis. A poda é um manejo de recuperação das plantas de cafeeiros muito utilizada em lavouras mais velhas, depauperadas e que necessitam de renovação (CARVALHO et al., 2010).

Assim como o manejo de podas, o sensoriamento remoto tem se destacado como uma ferramenta promissora para a cafeicultura. Por meio do monitoramento, aquisição e interpretação de dados espectrais, há a possibilidade de criação de modelos capazes de distinguir os comportamentos específicos de genótipos de cafeeiros (SANTOS, 2019). Além disso, essa tecnologia confere maior velocidade na aquisição de dados e identificação de adversidades, garantindo ao produtor maior eficiência na tomada de decisão em diversos manejos adotados na lavoura, tais como aplicação de produtos fitossanitários e tratamentos culturais como adubação ou irrigação (MARIN et al., 2019).

Segundo Jensen (2009) quando a radiação eletromagnética (REM) oriunda do sol atinge a vegetação, ocorre uma interação entre eles onde essa energia é fracionada em três partes: absorvida, refletida e transmitida, onde a intensidade de cada um dependerá do comprimento de onda, bem como as características físico-químicas do alvo. As plantas respondem aos estresses bióticos e abióticos de diversas formas como senescência de folhas, alterações das estruturas internas e quantidade de água no interior da célula. Logo, todas essas características podem ser detectadas por meio das diferenças entre a energia refletida na faixa do visível e do infravermelho próximo (BARTON, 2012; MAHAJAN et al., 2014).

Neste sentido, as informações de reflectância podem gerar um produto para monitoramento das lavouras, principalmente após algumas táticas de manejo como a poda. Os dados espectrais são adquiridos por meio de sensores imageadores ou não imageadores, apresentando dados com maior resolução espectral em relação ao produto gerado pelas imagens multiespectrais, uma vez que a resposta espectral dos alvos terrestres registra esta resposta em centenas de bandas estreitas ao longo do espectro refletivo (400 a 2.500 nm) (FORMAGGIO; SANCHES, 2017).

Assim como os dados espectrais, o uso de imagens multiespectrais na cafeicultura possibilita o monitoramento da variabilidade dos cafeeiros, estudo de dosséis, identificação de diferenças de potencial produtivo de cada talhão do cafezal, assim como o desenvolvimento vegetativo de diferentes cultivares presentes na lavoura, conferindo maior qualidade e agilidade na tomada de decisões no processo produtivo (SILVA; ALVES, 2013). Os sensores são capazes de detectar esta energia uma vez que ocorre uma alteração de temperatura e essas mudanças variam conforme a veemência de energia que é conduzida pela REM (NOVO, 2010).

Devido à escassez de estudos relacionados à caracterização espectral de cultivares de cafeeiros após o manejo de podas e o monitoramento de parâmetros agronômicos de cafeeiros arábica por meio de imagens multiespectrais o presente trabalho foi desenvolvido. Neste sentido, a dissertação está dividida em dois capítulos, sendo o capítulo I referente à caracterização espectral de cultivares de cafeeiros após o manejo de poda, a fim de determinar os intervalos espectrais mais discrepantes entre as cultivares e posteriormente a geração de modelos de estimativa dos parâmetros agronômicos; e no capítulo II o objetivo foi monitorar as plantas de cafeeiros da espécie *C. arabica* L. após a poda a partir de imagens multiespectrais obtidas por meio de aeronaves remotamente pilotadas e estimar os parâmetros agronômicos a partir de modelos paramétricos de regressão simples.

Esses modelos de estimativas auxiliarão o cafeicultor nas táticas de manejo posteriores à poda, uma vez que o desenvolvimento fitotécnico das plantas pode ser inferido por meio dos padrões apresentados nas curvas espectrais.

## **CAPÍTULO I. Caracterização hiperespectral e modelos de estimativa de parâmetros agronômicos de cultivares de cafeeiros após poda**

### **RESUMO**

O cultivo do cafeeiro pertencente à espécie *Coffea arabica* L., é de fundamental importância para o Brasil e a região do Cerrado Mineiro, normalmente observa-se o plantio de diversas cultivares em uma mesma propriedade com a finalidade de escalonar a colheita. Devido à escassez de informações em função da resposta espectral das cultivares de cafeeiros, a cafeicultura necessita de tecnologias capazes de identificar a variabilidade espacial da lavoura, principalmente em função das diferenças entre o desenvolvimento fitotécnico dessas cultivares. O objetivo deste trabalho foi diferenciar os genótipos de cafeeiros após a poda por meio da reflectância foliar e desenvolvimento de modelos capazes de estimar os parâmetros agronômicos de desenvolvimento vegetativo. Os tratamentos foram constituídos de oito cultivares de cafeeiros. Foram realizadas a quantificação de conteúdos bioquímicos e parâmetros de estrutura foliar para a caracterização espectral de cada genótipo, que serviram de base para a aplicação de índices de vegetação, bem como a geração de modelos capazes de estimar os parâmetros agronômicos após decote. Pela análise dos dados foi possível discriminar os genótipos de cafeeiros, sendo que a cultivar Topázio MG-1190 demonstrou ser mais eficiente na absorção da radiação eletromagnética (REM) em relação as demais cultivares após a poda nos intervalos espectrais do azul (420 a 510 nm), verde (520 a 590 nm) e vermelho limítrofe (690 a 730 nm). Os modelos de regressão foram capazes de estimar os parâmetros de desenvolvimento vegetativo das cultivares de cafeeiros como altura por meio do índice NDWI (RMSE = 5,78%), diâmetro de copa e comprimento de ramos plagiotrópicos por meio do índice EVI (RMSE = 10,21 E 12,69%), número de nós por meio do índice Cb (RMSE = 14,47%), clorofila a por meio do índice PRI (RMSE = 2,39%) e potencial de água na folha por meio do índice LWVI-1 (40,72%).

**Palavras-chave:** *Coffea arabica* L., decote, dados espectrais, índice de vegetação, reflectância foliar, sensoriamento remoto.

## **CHAPTER I. Hyperspectral characterization and models for estimating agronomic parameters of coffee cultivars after pruning**

### **ABSTRACT**

The cultivation of coffee trees belonging to the species *Coffea arabica* L., is of fundamental importance for Brazil and the Cerrado Mineiro region, with the planting of several cultivars on the same property usually being observed with the purpose of staggering the harvest. Due to the scarcity of information depending on the spectral response of coffee cultivars, coffee cultivation needs technologies capable of identifying the spatial variability of the crop, mainly due to the differences among the development of these cultivars. The objective of this study was to differentiate the coffee genotypes after pruning, through leaf reflectance and the development of models capable of estimating agronomic parameters of vegetative growth. The treatments consisted of eight coffee cultivars. The quantification of biochemical contents and parameters of leaf structure were carried out for the spectral characterization of each genotype, which served as a basis for the application of vegetation indexes, as well as the generation of models capable of estimating agronomic parameters after the decote-type pruning. By analyzing the data, it was possible to discriminate the coffee genotypes. The Topázio MG-1190 cultivar proved to be more efficient in absorbing electromagnetic radiation (EMR) than the other cultivars after pruning, in the spectral intervals of the blue (420 to 510 nm), green (520 to 590 nm) and red edge (690 to 730 nm). The regression models were able to estimate the parameters of vegetative development of coffee cultivars such as height using the NDWI index (RMSE = 5.78%), canopy diameter and length of plagiotropic branches using the EVI index (RMSE = 10.21 AND 12.69%), the number of nodes using the Cb index (RMSE = 14.47%), chlorophyll-a using the PRI index (RMSE = 2.39%) and water potential in the leaf through the LWVI-1 index (40.72%).

**Keywords:** *Coffea arabica* L., decote-type pruning, spectral data, vegetation index, leaf reflectance, remote sensing.

## INTRODUÇÃO

Um dos fatores primordiais para o sucesso de uma lavoura cafeeira se refere à escolha da cultivar. Apesar de no parque cafeeiro nacional ainda predominar cultivares dos grupos Mundo Novo e Catuaí da espécie *Coffea arabica* L., existem atualmente 133 cultivares no Registro Nacional de Cultivares (RNC, 2020) com ampla diversidade em relação ao porte, ciclo de maturação, resistência a pragas, doenças e adaptação a diversas condições edafoclimáticas em várias regiões do Brasil.

A cafeicultura é caracterizada por ser uma atividade de elevado investimento inicial. Os cafeeiros são cultivados em áreas extensas, havendo a necessidade de plantio de diversos genótipos em uma mesma propriedade com ciclos de maturação distintos para facilitar o escalonamento da colheita. Além de ser uma cultura perene, os cafeeiros da espécie *C. arabica* apresentam bienalidade, ou seja, uma safra de alta produção seguida de uma safra de baixa produção. Essas características são de fundamental importância e influenciam diretamente no manejo conduzido na propriedade.

Portanto, são necessárias táticas de manejo alternativas que sejam econômicas e sustentáveis. A poda é um manejo de recuperação das plantas cafeeiros muito utilizada em lavouras mais velhas, depauperadas, que necessitam de renovação. É necessário se atentar que tanto a necessidade quanto o tipo de poda dependem da idade do cafezal, condições físicas das plantas e adversidades climáticas que podem ocorrer, como chuvas de granizo e/ou geada. Neste sentido, a poda é uma alternativa eficiente e mais rentável do que a renovação do cafezal. Além de promover a renovação do dossel da planta, também contribui para aumentar a uniformidade e maturação dos frutos, reduzir a mão de obra no caso de colheita manual e conferir maior estabilidade produtiva do cafezal (VERDIN-FILHO et al., 2018).

Assim como o manejo de podas, o sensoriamento remoto tem se destacado como uma ferramenta promissora para a cafeicultura. Na busca pelas altas produtividades das lavouras cafeeiras, essa técnica pode substituir as táticas de manejo “tradicionais” de monitoramento, elevando a competitividade da atividade e a eficiência produtiva. No trabalho de Almeida, Sediya e Alencar (2017) foi possível estimar a produtividade de uma fazenda cafeeira a partir de modelagem agrometeorológica e dados espectrais do sensor MODIS, gerando dados com elevada acurácia com valor de  $r^2$  variando entre 0,79 e 0,95, o que enfatiza o potencial dessa ferramenta na agricultura.



Por meio do monitoramento das culturas agrícolas, utilizando o sensoriamento remoto, foi possível a criação dos índices de vegetação. Estes foram desenvolvidos a partir de modelações matemáticas baseadas nos intervalos espectrais de reflexão dos tecidos fotossintéticos da vegetação após receberem a radiação eletromagnética (REM) oriunda do sol. Normalmente, os índices de vegetação são utilizados para estimar a cobertura vegetal do solo, fitomassa e atividade fotossintética (FORMAGGIO; SANCHES, 2017).

Existem diversos índices de vegetação citados na literatura que são capazes de estimar os parâmetros agronômicos de uma determinada cultura de acordo com o intervalo espectral em que apresenta ser mais responsiva. As mudanças na fisiologia e conteúdos químicos das plantas se mostram confiáveis para diagnosticar estresses. No trabalho de Abreu-Júnior et al. (2020) foi utilizada a classificação pelo método de máxima verossimilhança para discriminação de áreas da cultura cafeeira infestada por nematoides. Estes autores concluíram que é possível identificar com exatidão aspectos físicos ligados aos cafeeiros, por meio da aplicação combinada entre as bandas do visível com NDVI e obter o GSD (*Ground Sample Distance*) que melhor atenda as análises de cada cultura. Portanto, o método de máxima verossimilhança utilizado no trabalho mostrou-se eficiente na detecção de nematoides.

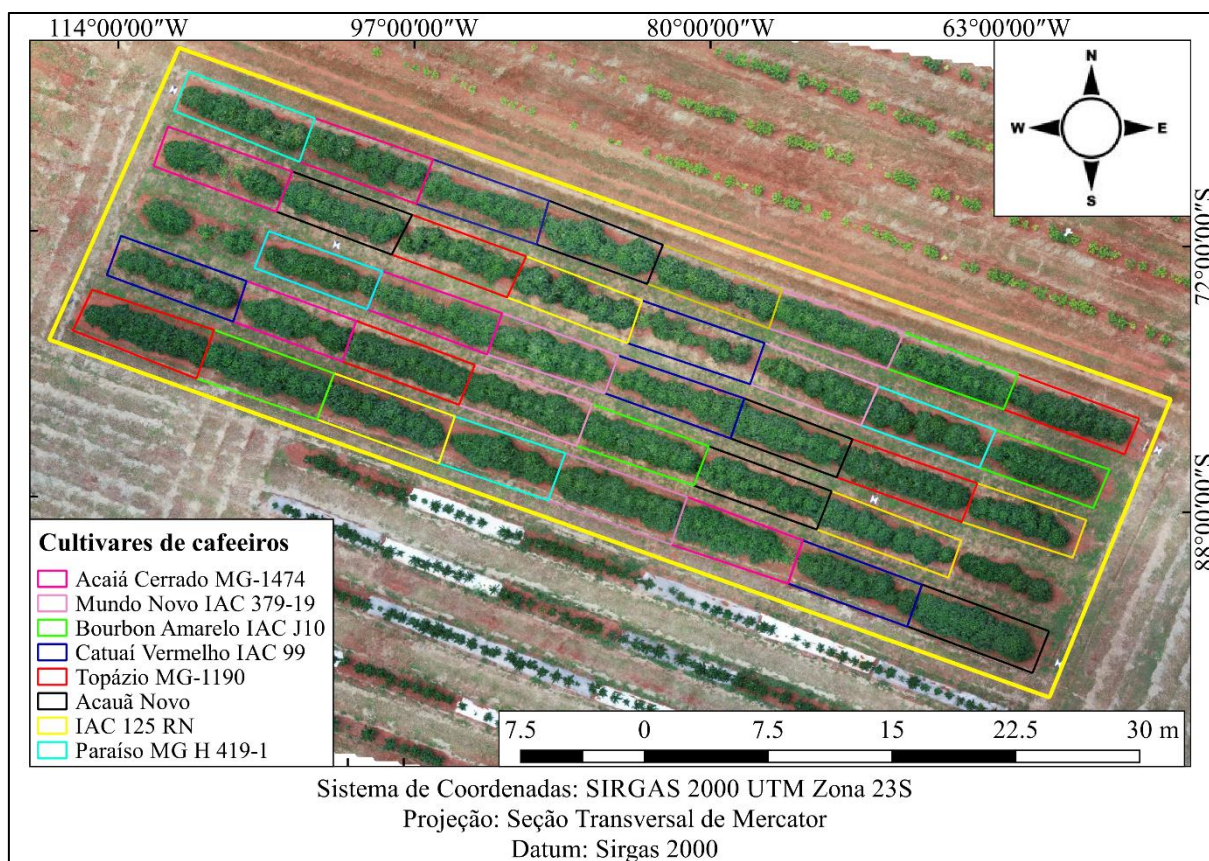
Diante do exposto, o presente trabalho é de fundamental importância devido à escassez de estudos relacionados a caracterização espectral de cultivares de cafeeiros após o manejo de podas. Portanto, a caracterização hiperespectral dessas cultivares auxiliará o cafeicultor nas táticas de manejo posteriores à poda, uma vez que o desenvolvimento fitotécnico das plantas pode ser inferido por meio dos padrões apresentados nas curvas espectrais. Ao especificar estes padrões, o produtor terá uma ferramenta para predição dos variados comportamentos fitotécnicos de uma lavoura cafeeira.

O objetivo deste trabalho foi caracterizar espectralmente genótipos de cafeeiros da espécie *C. arabica* L. após poda e estimar os parâmetros agronômicos a partir de modelos paramétricos de regressão simples.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido na Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Monte Carmelo, situado no estado de Minas Gerais, na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. As coordenadas geográficas da área experimental são 18° 43' 41'' S e 47° 31' 26'' e altitude de 903 m. O plantio foi realizado em dezembro de 2015 no espaçamento de 3,5 m

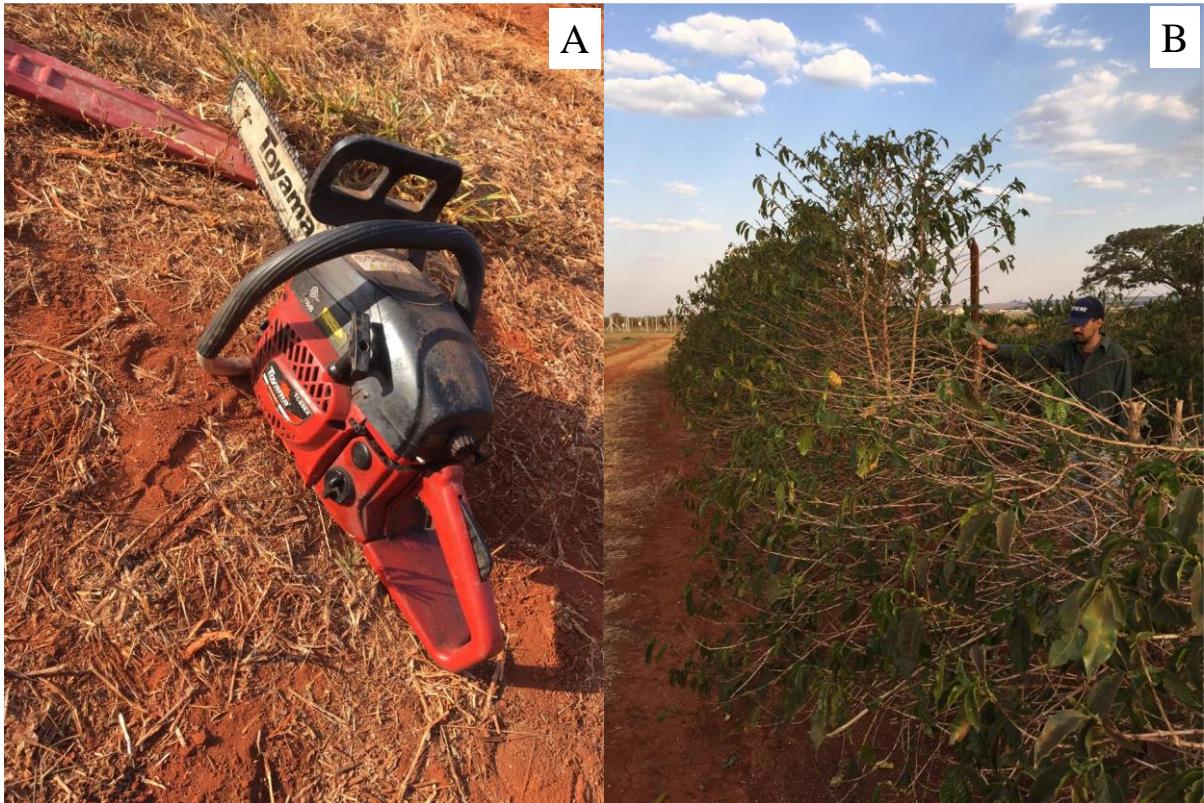
entre linhas e 0,6 m entre plantas. Os tratamentos foram constituídos de oito cultivares de cafeeiros apresentadas na Figura 1, dispostos no delineamento em blocos casualizados (DBC) com 38 parcelas. Cada unidade experimental foi constituída por uma linha com 10 plantas, consideradas úteis às seis plantas centrais.



**FIGURA 1.** Croqui da área experimental e as respectivas delimitações das parcelas que compõem o experimento e as cultivares de cafeeiros analisadas.

### Aquisição dos parâmetros agrônômicos

A poda do tipo decote baixo foi realizada no dia 13 de setembro de 2019 utilizando-se um motosserra, padronizando-se a altura das plantas a 1,5 m (Figura 2).



**FIGURA 2.** Imagem da motosserra utilizada na poda dos cafeeiros (A); Demonstração das plantas de cafeeiros podadas (B).

A avaliação de crescimento foi realizada no mês de dezembro do mesmo ano, juntamente com a leitura do teor relativo de clorofila e o potencial de água nas folhas, sendo mensuradas as seguintes características:

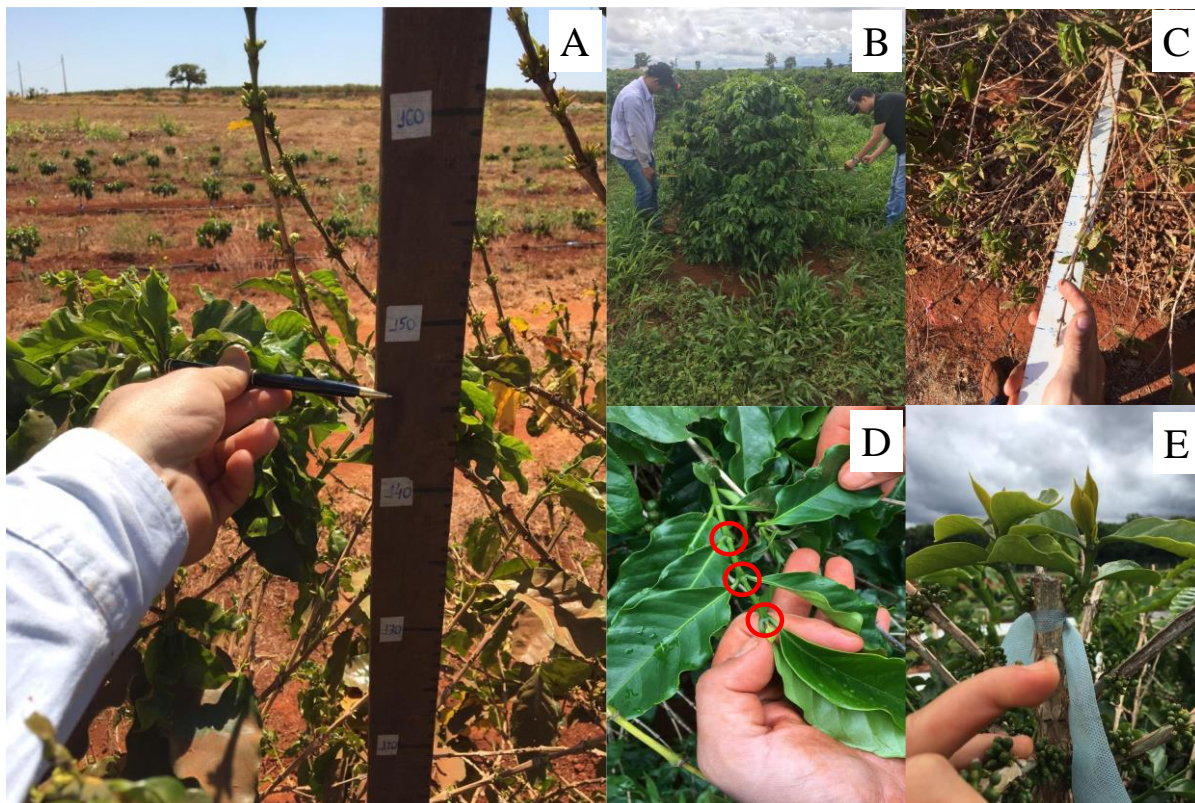
a) Altura de planta: obtida por meio da medida do colo até o ponto de inserção da gema terminal com auxílio de uma régua em centímetros (Figura 3A).

b) Diâmetro de copa: mensurado com uma régua, tomando-se como padrão de medida os dois ramos no sentido das entrelinhas que apresentavam o maior comprimento em centímetros (Figura 3B).

c) Número de nós por ramo plagiotrópico: obtido mediante a contagem de nós em um ramo plagiotrópico localizado no terço mediano da planta, nos dois lados da projeção da copa (Figura 3C).

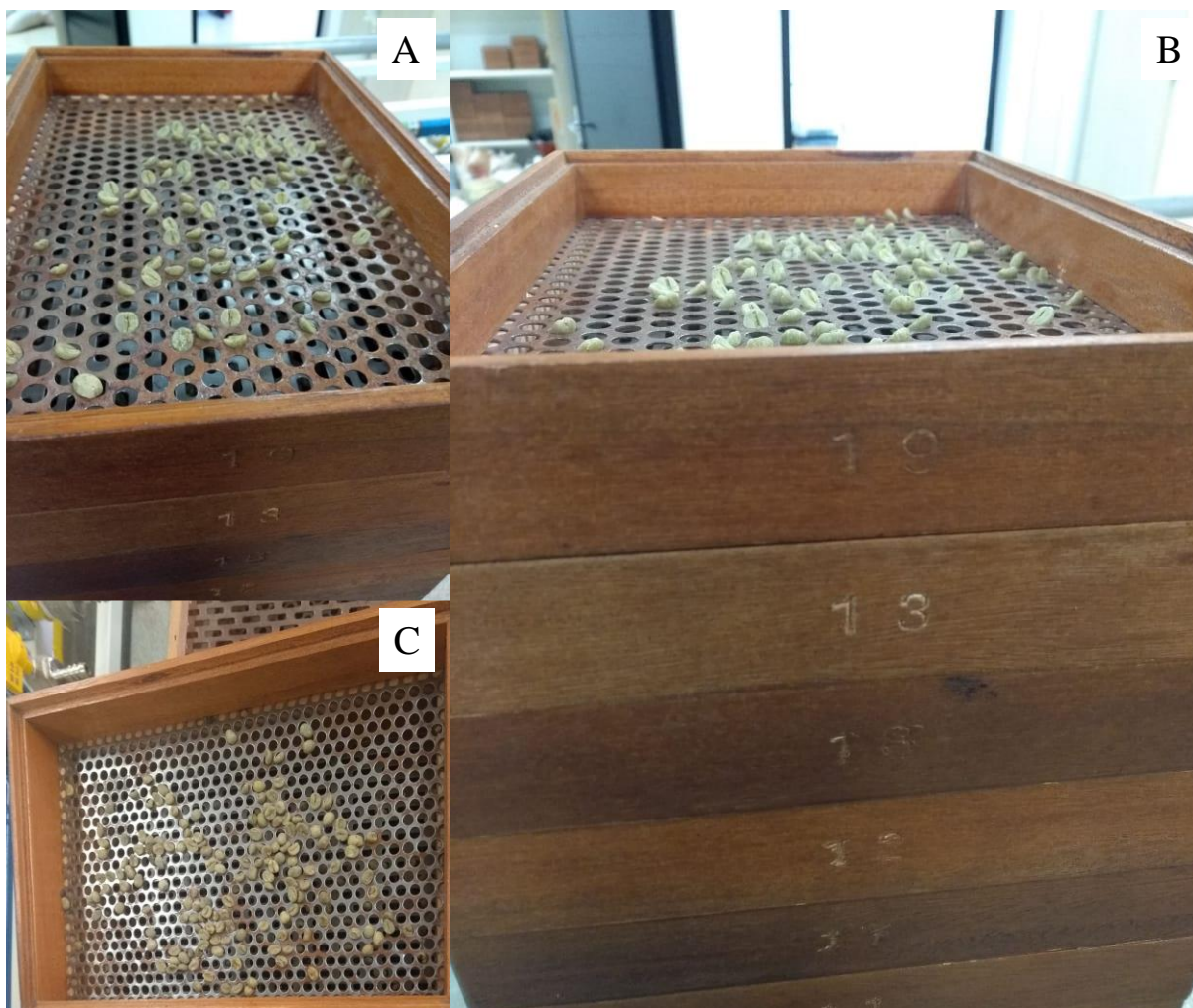
d) Comprimento de ramos plagiotrópicos: determinado por meio da medição de um ramo plagiotrópico localizado no terço médio da planta, desde a inserção do mesmo no ramo ortotrópico até a extremidade do ramo plagiotrópico, com o auxílio de uma régua em centímetros (Figura 3D).

e) Número de ramos plagiotrópicos: obtido mediante a contagem de ramos produtivos a partir do ponto de poda (Figura 3E).



**FIGURA 3.** Imagens demonstrativas das coletas das variáveis de crescimento altura de plantas (A); diâmetro de copa (B); comprimento de ramos plagiotrópicos (C); número de nós (D) e número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda (E).

f) Peneira 17/64 e acima: uma amostra de 100 g de cada parcela experimental foi distribuída em um conjunto de peneiras de crivos circulares (19, 18 e 17, 16, 15, 14 e 13/64 avos de polegada) e de crivo oblongo (13, 12, 11, 10, 9 e 8/64 avos de polegada). Os grãos de café retidos nas peneiras 17/64, 18/64 e 19/64 foram pesados, sendo determinado o percentual de grãos retidos nas peneiras de maior valor comercial (Figura 4).



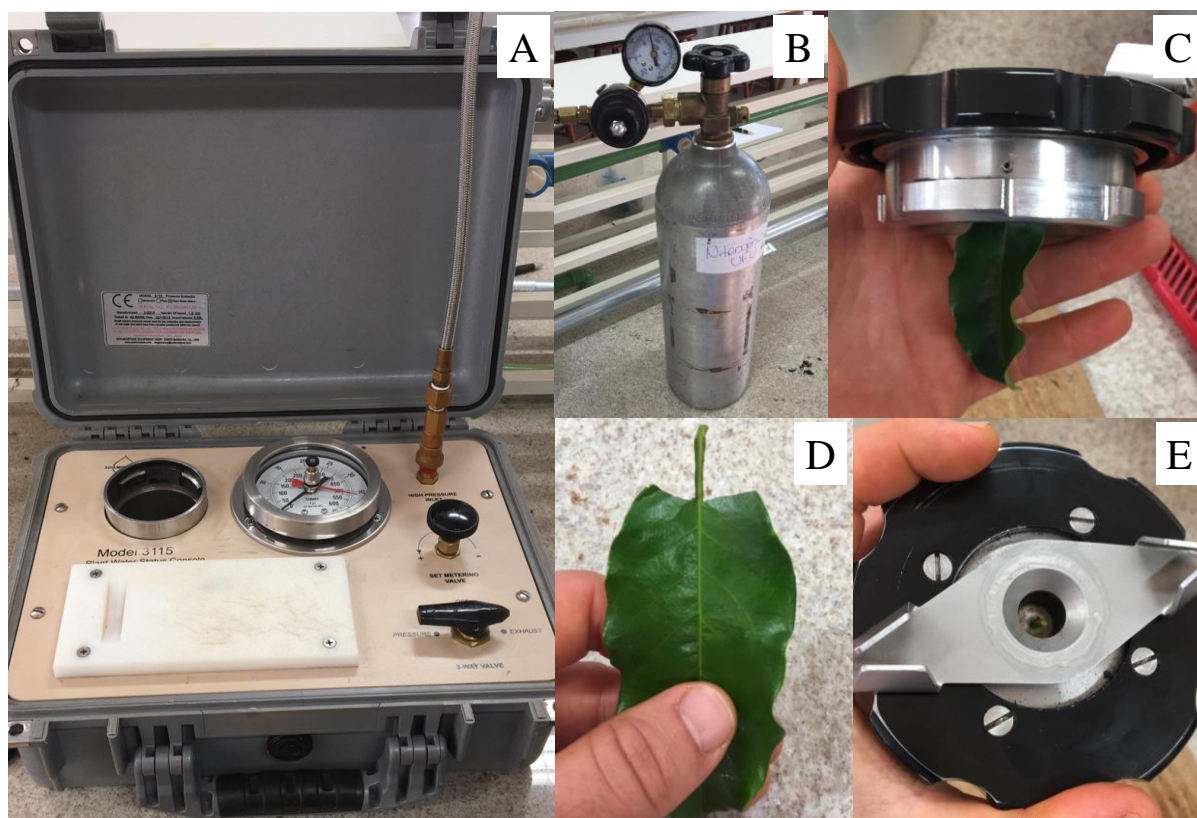
**FIGURA 4.** Imagens ilustrativas da classificação por peneiras (A); posicionamento das peneiras por tamanho e tipo de crivo (B); demonstração dos grãos retido na peneira de crivo 17/64 (C).

Para quantificação dos valores relativos de clorofila a, b e total utilizou-se o aparelho ClorofiLOG® modelo CFL 1030, (FALKER, Porto Alegre, Brasil). Este aparelho utiliza emissores em três comprimentos de onda dentro da banda do vermelho próximos aos picos de cada tipo de clorofila ( $\lambda=635$  e  $660\text{nm}$ ) e outro no infravermelho próximo ( $\lambda=880\text{nm}$ ). O sensor inferior posicionado na parte abaxial da folha recebe a radiação transmitida por meio da estrutura foliar. A partir desse dado, o aparelho fornece valores de leitura proporcionais à absorvância das clorofilas a, b e total (a+b), sendo esses valores adimensionais ou chamado de ICF (Índice de Clorofila Falker) (Figura 5).



**FIGURA 5.** Imagem ilustrativa do aparelho ClorofiLOG® modelo CFL 1030.

Para a determinação do potencial de água, as folhas foram coletadas antes de o dia amanhecer a fim de garantir o estado hídrico real dos cafeeiros, uma vez que a planta no período noturno apresenta consumo de água reduzido. Foi coletado um par de folhas de cada uma das seis plantas úteis da parcela, no terceiro nó a partir da extremidade do ramo plagiotrópico no terço médio do cafeeiro. O potencial aproximado de água dos tecidos vegetais foi analisado em Câmara de Scholander da marca SAPS II modelo 3115 (Figura 6).



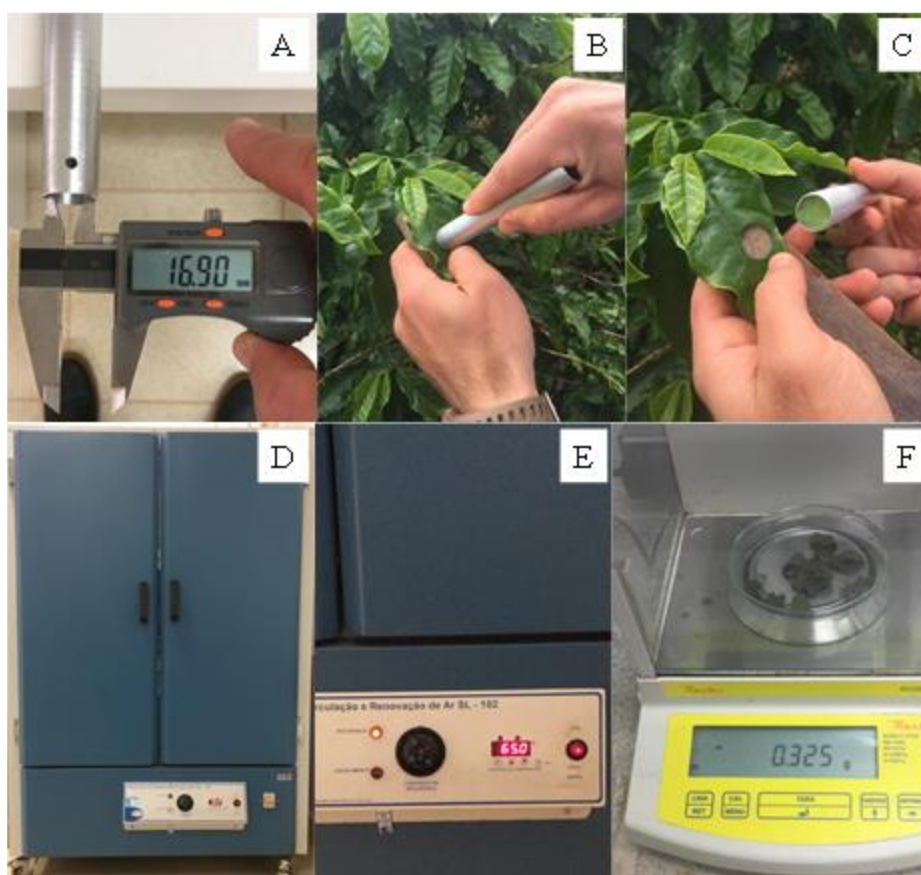
**FIGURA 6.** Imagem ilustrativa da Câmara de Scholander (A); cilindro de nitrogênio utilizado no fornecimento de pressão dentro da câmara (B); suporte onde a folha é posicionada juntamente com a folha de cafeeiro (C); corte realizado na folha de cafeeiro para ser colocada no suporte (D); vista superior da folha dentro do suporte (E).

### **Determinação dos parâmetros bioquímicos e estruturais das folhas para caracterização hiperespectral das cultivares de cafeeiros**

Para a caracterização hiperespectral das cultivares de cafeeiros utilizou-se o modelo de transferência radiativa PROSPECT, encontrado no endereço eletrônico, <http://opticleaf.ipgp.fr/index.php?page=prospect> que simula a reflectância e transmitância direcional-hemisférica na faixa espectral de 400 a 2.500 nm no nível foliar individual (SCHAEPMAN-STRUB et al., 2006). Os parâmetros bioquímicos e estruturais necessários para gerar as curvas espectrais de reflectância a nível foliar das cultivares de cafeeiro estão apresentados a seguir.

O parâmetro de estrutura foliar, que se refere ao arranjo estrutural das células que compõem a folha (unidade adimensional), foi baseada no estudo de Jacquemoud (1993) o qual estabeleceu o valor N variando entre 1,5 e 2,5, e leva em consideração a estrutura interna e arranjo do mesófilo das folhas. Portanto, para a determinação do parâmetro de estrutura foliar neste trabalho fixou-se o valor de  $N = 1,5$  para todas as 38 curvas espectrais geradas.

Para determinação do teor de massa seca por unidade de área ( $\text{g cm}^{-2}$ ) utilizou-se um cilindro de área conhecida para coletar um disco de cada folha, sendo duas folhas de cada uma das seis plantas úteis da parcela, uma do terço superior e outra do terço médio (terceiro ou quarto nó a partir da extremidade do ramo plagiotrópico), totalizando 12 discos e determinando assim, uma amostra representativa para cada uma das 38 parcelas. As amostras foram colocadas em estufa de circulação e renovação de ar a uma temperatura de  $65^\circ\text{C}$  até que atingissem peso constante, mensurado em balança de precisão (Figura 7).

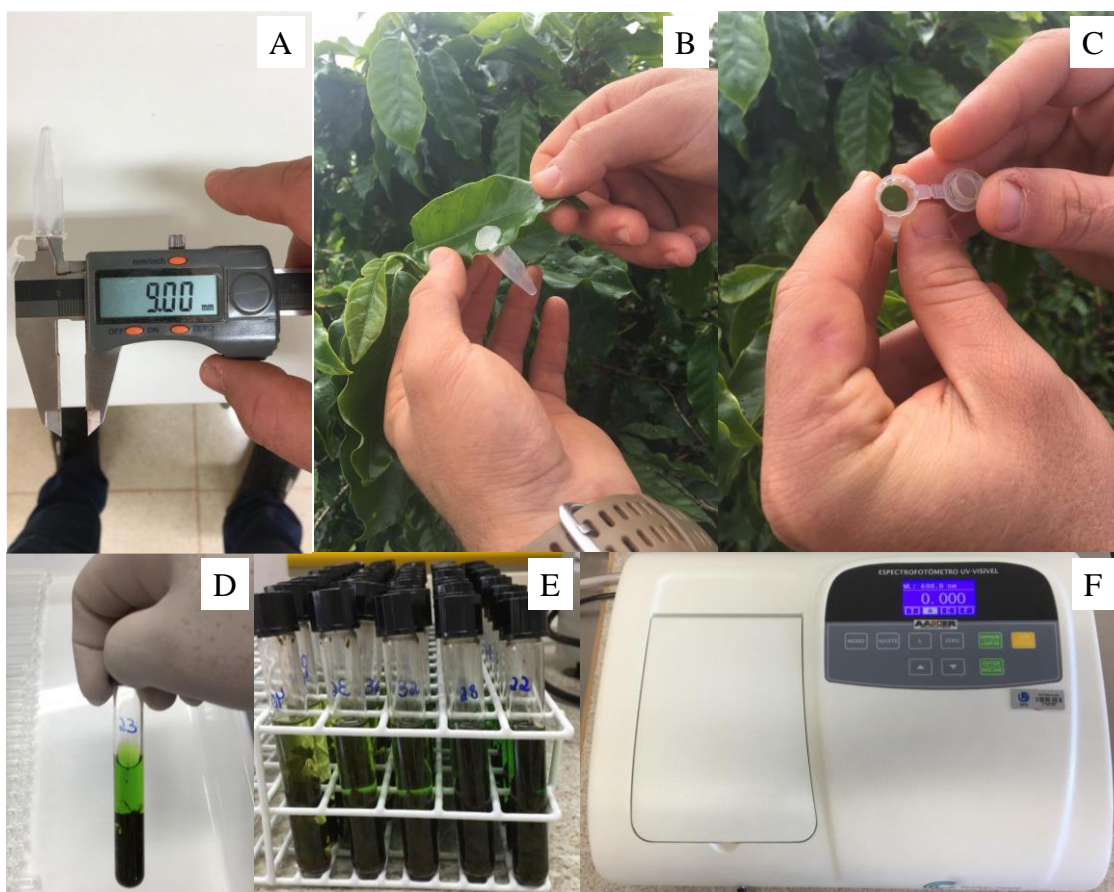


**FIGURA 7.** Imagens ilustrativas da aferição do diâmetro do cilindro (A); corte da folha por meio do cilindro (B); disco da folha do cafeeiro (C); estufa de circulação e renovação de ar (D); temperatura em que as amostras permaneceram na estufa ( $65^\circ\text{C}$ ) (E); pesagem das amostras secas (F).

Para determinação dos teores de clorofila e carotenoide por unidade de área ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ ) utilizou-se um *ependorf* de área conhecida, onde foi coletado um disco de cada folha, sendo duas folhas de cada uma das seis plantas úteis da parcela, uma do terço superior e uma do terço médio (terceiro ou quarto nó a partir da extremidade do ramo plagiotrópico), totalizando 12 discos por parcela, representando uma amostra composta. Para extração dos pigmentos seguiu-se a metodologia descrita por Lichtenthaler e Wellburn (1983) com adaptações. As



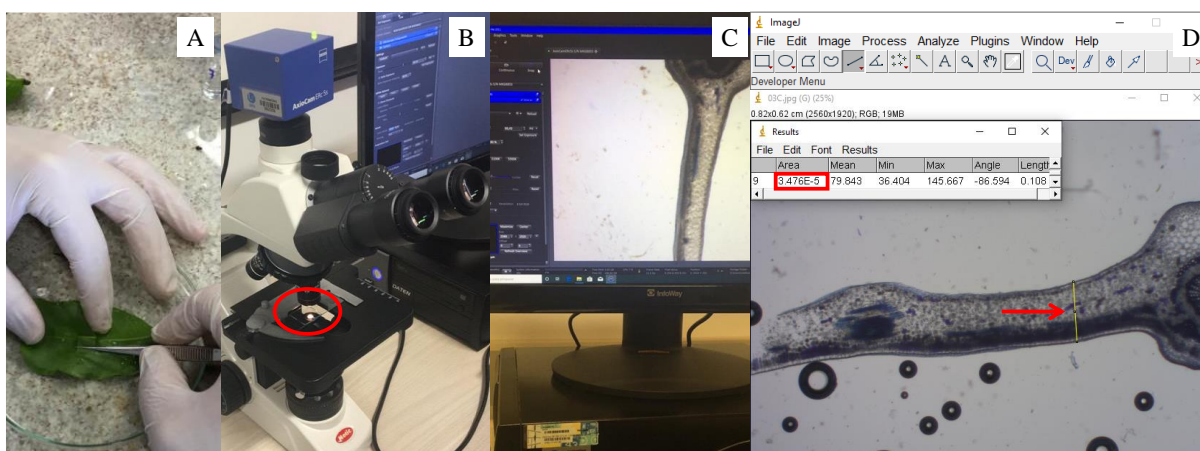
leituras de absorvância das amostras foram obtidas em espectrofotômetro UV-190 nos comprimentos de onda de 645, 652 e 663 nm, para clorofila a, b e total, respectivamente, e 470 nm para carotenoides. A partir das absorvâncias foram calculados os teores de pigmentos foliares ( $\text{mg } 100\text{g}^{-1}$  de tecido fresco), conforme Witham, Blaydes e Devlin (1971) e Lichtenthaler e Wellburn (1983) (Figura 8).



**FIGURA 8.** Imagens ilustrativas da aferição do diâmetro do *ependorf* (A); posicionamento do *ependorf* para coleta do disco (B); disco de matéria fresca da folha (C); matéria fresca da folha do cafeeiro triturada em contato com os reagentes (D); diferença entre os tratamentos (E); espectrofotômetro UV-190 (F).

Para determinação de pigmentos marrons, que leva em consideração o aspecto visual das folhas de cafeeiros em função da sua cor (unidade arbitrária), foi utilizada a metodologia proposta por Jiang et al. (2018) que considerou  $C_{\text{brown}}$  como o “escurecimento” médio das folhas entre 0 (folhas totalmente verdes) e 1 (folhas totalmente marrons) como estimativa. As notas foram atribuídas às folhas coletadas seguindo o mesmo padrão adotado para a avaliação de clorofila e carotenoides, obtendo-se 38 notas, uma para cada parcela após determinação da média das 12 folhas coletadas.

Para determinação do parâmetro espessura de água equivalente da folha, que tem por objetivo estimar a quantidade relativa de água presente na folha por meio da medida da espessura da nervura central (cm), foram coletadas duas folhas da segunda planta da parcela, sendo uma folha do terço superior e outra do terço médio (terceiro ou quarto nó a partir da extremidade do ramo plagiotrópico), totalizando duas folhas por parcela. Pelo fato do experimento ser irrigado via gotejamento, há uma disponibilidade homogênea de água em todas as plantas da parcela, sendo suficiente esta amostra para estimar este parâmetro. A coleta foi realizada às 04 h e 30 minutos a fim de garantir o estado hídrico real das folhas. Em laboratório realizaram-se cortes transversais no sentido da nervura central da folha e posteriormente cortes milimétricos, montando-se três lâminas para posterior cálculo da média da parcela. Com a câmera AxioCamERs – 5s acoplada ao microscópio registrou-se fotos dos cortes observados e com o auxílio do software ImageJ foi possível estimar a espessura equivalente de água das folhas ao realizar a conversão de pixel para comprimento em centímetros, após o fornecimento de uma escala para o software, gerando 38 valores representando as parcelas experimentais (Figura 9).



**FIGURA 9.** Imagens ilustrativas do corte transversal da folha de café (A); lâmina contendo os cortes transversais para observação no microscópio (B); registro das imagens por meio da câmera AxioCamERs – 5s (C); registro e espessura de água equivalente por meio do software ImageJ (D).

### Determinação dos índices de vegetação

Os índices de vegetação foram escolhidos a partir da literatura de acordo com a identificação dos intervalos espectrais que apresentaram diferenças entre os tratamentos, ou seja, os intervalos espectrais mais discrepantes entre as cultivares (Tabela 1).

**TABELA 1.** Índices de vegetação utilizados e suas respectivas equações.

Variáveis	Equação/Método	Referência
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$(R_{864nm} - R_{671nm}) / (R_{864nm} + R_{671nm})$	Rouse et al. (1973)
Normalized difference Water Index (NDWI)	$(R_{864nm} - R_{1245nm}) / (R_{864nm} + R_{1245nm})$	Gao (1996)
Leaf Water Vegetation Index (LWVI-1)	$(R_{1094nm} - R_{893nm}) / (R_{1094nm} + R_{893nm})$	Galvão; Formaggio; Tisot (2005)
Leaf Water Vegetation Index (LWVI-2)	$(R_{1094nm} - R_{1205nm}) / (R_{1094nm} + R_{1205nm})$	Galvão; Formaggio; Tisot (2005)
Photochemical Reflectance Index (PRI)	$(R_{529nm} - R_{569nm}) / (R_{529nm} + R_{569nm})$	Gamon; Peñuelas; Field (1992)
Enhanced Vegetation Index (EVI)	$2,5[(R_{711nm} - R_{671nm}) / (R_{711nm} + 6(R_{671nm}) - 7,5(R_{467nm}) + 1)]$	Jiang et. al. (2008)
Chlorophyll a Index (Ca)	$(R_{800nm} / R_{650nm})$	Blackburn (1998)
Chlorophyll b Index (Cb)	$(R_{800nm} / R_{635nm})$	Blackburn (1998)
Carotenoide Index (Carot)	$(R_{800nm} / R_{470nm})$	Blackburn (1998)
Modified Chlorophyll Absorption Ration Index (MCARI)	$[(R_{700nm} + R_{670nm}) - 0,2(R_{700nm} - R_{550nm})] / (R_{700nm} / R_{670nm})$	Daughtry et al. (2000)
Transformed Chlorophyll Absorption Ratio Index (TCARI)	$3[(R_{700nm} + R_{670nm} - 0,2(R_{700nm} - R_{550nm})) / (R_{700nm} / R_{670nm})]$	Haboudane et al. (2002)

Foi realizada uma análise de correlação, por meio do coeficiente de Pearson, entre todos os índices de vegetação e os parâmetros agronômicos apresentados anteriormente. A partir dos índices que melhor se correlacionaram com os parâmetros, ou seja, P valor < 0,05, foram escolhidos aqueles que iriam compor os modelos de predição, por meio de regressões simples, considerada uma técnica paramétrica de estimativa de variáveis contínuas.

Os modelos foram gerados a partir da regressão entre 31 amostras, sendo que sete delas foram excluídas aleatoriamente para posterior validação dos modelos de regressão, totalizando as 38 parcelas experimentais. Dentre as equações geradas optou-se por aquelas que melhor se ajustavam aos dados. Neste sentido, a fim de determinar a acurácia dos modelos de estimativa foi realizado o cálculo da Raiz do Erro Médio Quadrático – RMSE (equações 1 e 2). Para tal, sete amostras dentre as 38 foram excluídas aleatoriamente, que serviram como pontos de validação (*checkpoints*) das regressões geradas, a fim de determinar a acurácia dos modelos para predição dos parâmetros agronômicos.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_o - X_e)^2}{n}} \quad (1)$$

$$RMSE (\%) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_o - X_e)^2}{n}} \times \frac{100 \times n}{\sum_{i=1}^n X_e} \quad (2)$$

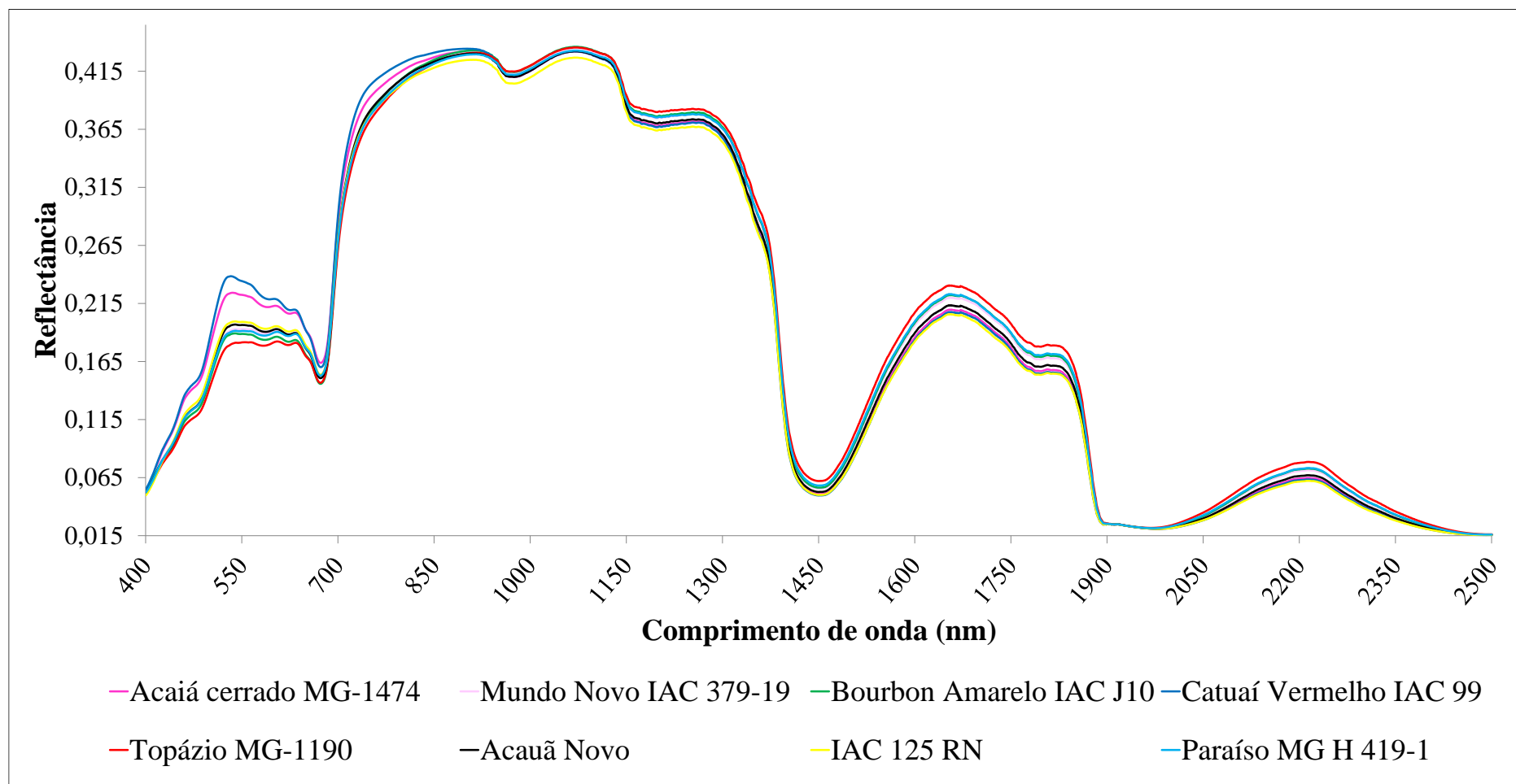
Onde: RMSE é a raiz do erro médio quadrático; RMSE (%) é a raiz do erro médio quadrático em porcentagem;  $X_o$  representa os valores dos parâmetros agronômicos observados *in situ*;  $X_e$  representa os valores dos parâmetros agronômicos estimados;  $n$  é o número de amostras.

Para os parâmetros agronômicos foi realizada a análise de variância a 5% de probabilidade pelo software Speed Stat (CARVALHO et al., 2020), sendo posteriormente as médias comparadas pelo Teste de Scott-Knott.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

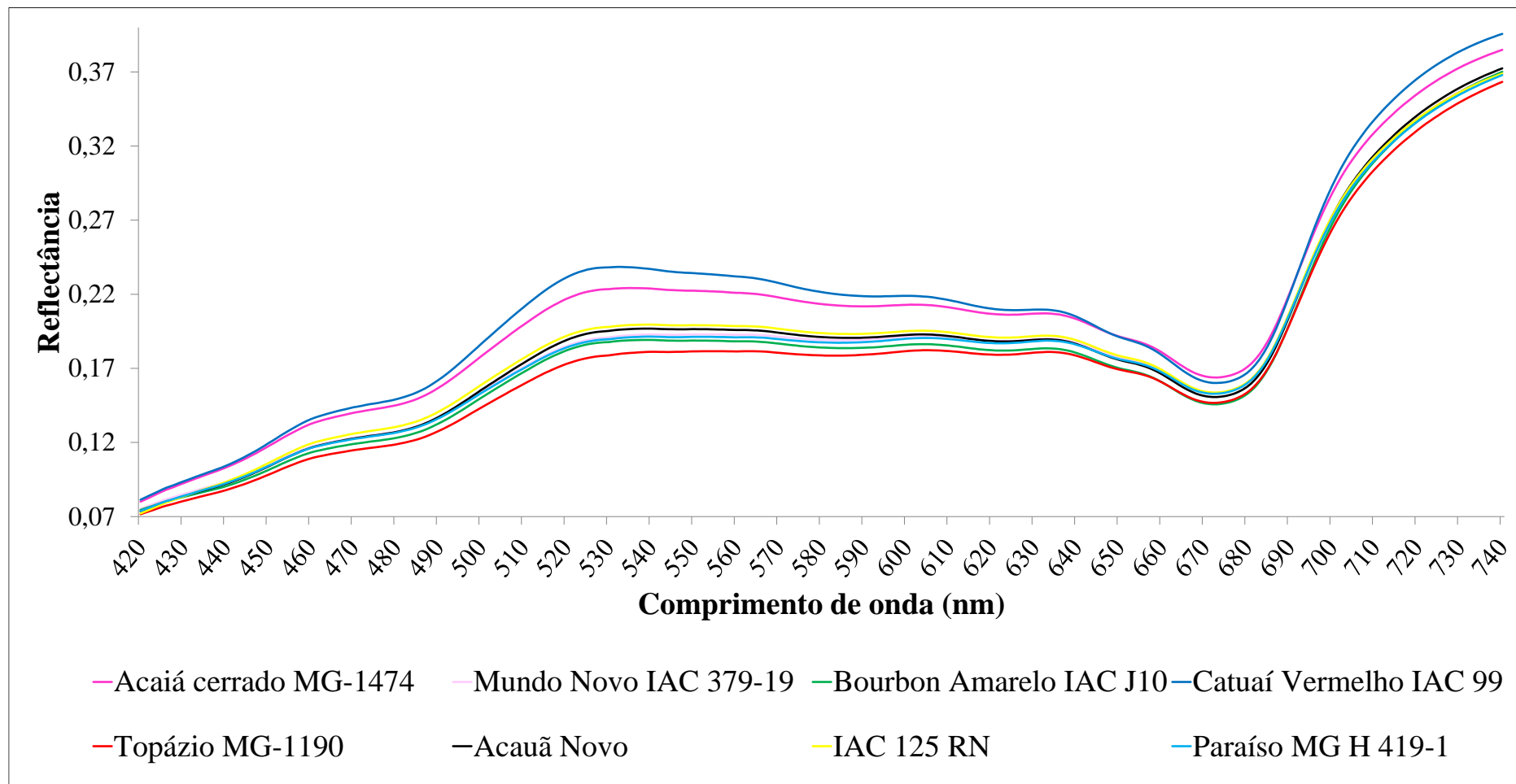
### Curvas espectrais das cultivares de cafeeiros

A partir dos dados obtidos em cada tratamento foram geradas as curvas de reflectância para cada cultivar de cafeeiro ao longo da faixa espectral de 400 a 2.500 nm (Figura 10).



**FIGURA 10.** Valores médios de reflectância de cultivares de cafeeiros ao longo do espectro (400 a 2.500 nm).

A cultivar Topázio MG-1190 foi a mais eficaz na absorção da radiação eletromagnética nas faixas espectrais do azul (440 a 510 nm), verde (520 a 590 nm) e vermelho limítrofe (690 a 730 nm) em relação aos demais genótipos. Já na região espectral do vermelho (630 a 685 nm) a cultivar Bourbon Amarelo IAC J10 apresentou a mesma resposta espectral que o Topázio (Figura 11).



**FIGURA 11.** Valores médios de reflectância das cultivares de cafeeiros referentes ao intervalo espectral do visível (400 a 740 nm).

A cultivar Topázio MG-1190 é resultante do cruzamento de Catuaí Amarelo com Mundo Novo, apresentando como características excelente produtividade e elevado vigor vegetativo (SILVA et al., 2016) sem proporcionar depauperamento precoce ou seca de ramos produtivos. Na Tabela 2 são apresentadas as médias dos caracteres vegetativos das cultivares de cafeeiros pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

**TABELA 2.** Caracteres vegetativos avaliados nas cultivares de cafeeiro. A = Altura (m), DC = Diâmetro de copa (m), CR = Comprimento de ramos plagiotrópicos (m), NN = Número de nós, NRP = Número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda, EAE = Espessura de água equivalente da folha (cm), MS = Matéria Seca (g), P >17 = Percentual de grãos retidos na peneira 17/64 e acima.

Cultivares	A (m)	DC (m)	CR (m)	Nº N	Nº RP	EAE (cm)	MS (g)	P >17 (%)
Acaiaí Cerrado	1,53 c	1,62 b	0,10 c	6,80 b	20,40 b	0,0358 a	0,00932 b	37,49b
Mundo Novo	1,67 b	1,93 a	0,13 b	7,02 b	30,20 a	0,0329 b	0,00875 b	40,83b
Bourbon Amarelo	1,74 a	2,05 a	0,13 b	7,03 b	22,60 b	0,0327 b	0,00914 b	38,14b
Catuaí Vermelho	1,52 c	1,47 c	0,10 c	6,43 b	22,60 b	0,0365 a	0,00929 b	36,66b
Topázio	1,54 c	1,79 b	0,10 c	7,40 a	25,20 a	0,0297 b	0,00876 b	18,20c
Acauã Novo	1,53 c	1,69 b	0,11 c	6,93 b	20,40 b	0,0345 a	0,00931 b	29,28c
IAC 125 RN	1,57 c	1,68 b	0,15 a	8,12 a	25,60 a	0,0358 a	0,01066 a	59,93a
Paraíso	1,55 c	1,67 b	0,14 a	7,73 a	18,40 b	0,0313 b	0,00932 b	15,68c
CV (%)	2,54	5,72	13,16	6,00	16,74	20,44	19,57	21,92

Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

Observou-se que a cultivar Topázio MG-1190 foi relativamente superior no diâmetro de copa em relação a cultivar Catuaí vermelho IAC 99, havendo uma superioridade média de 21,8%. Em relação ao número de nós foi relativamente superior as cultivares Acaiaí Cerrado – MG 1474 (8,8%), Mundo Novo IAC 379-19 (5,4%), Bourbon Amarelo IAC J10 (5,3%), Catuaí vermelho IAC 99 (15,1%) e Acauã Novo (6,8%). Já em relação ao número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda foi relativamente superior as cultivares Acaiaí Cerrado – MG 1474 (23,5%), Bourbon Amarelo IAC J10 (11,5%), Catuaí vermelho IAC 99 (11,5%), Acauã Novo (23,5%) e Paraíso MG H 419-1 (36,9%).

Em relação aos outros parâmetros de crescimento, altura e comprimento de ramos plagiotrópicos essa cultivar apresentou os menores valores, sendo caracterizada por apresentar porte baixo e internódios curtos, o que favorece o desenvolvimento de folhas e gemas reprodutivas, evidenciando o seu vigor vegetativo.



O vigor vegetativo das plantas influencia diretamente no espectro refletivo da região do visível, uma vez que plantas de cafeeiros com vigor vegetativo superior, principalmente após uma situação de estresse, como foi o caso da poda conduzida no experimento, vegetam mais, emitindo mais ramos produtivos e folhas. Assis et al. (2018), a fim de avaliar a recuperação de plantas de cafeeiro por meio de seu crescimento vegetativo submetidas a diferentes tipos de poda, concluíram que podas menos drásticas que eliminaram pequenas partes dos ramos plagiotrópicos e ortotrópicos do cafeeiro apresentaram recuperação mais rápida quando comparada com as mais drásticas.

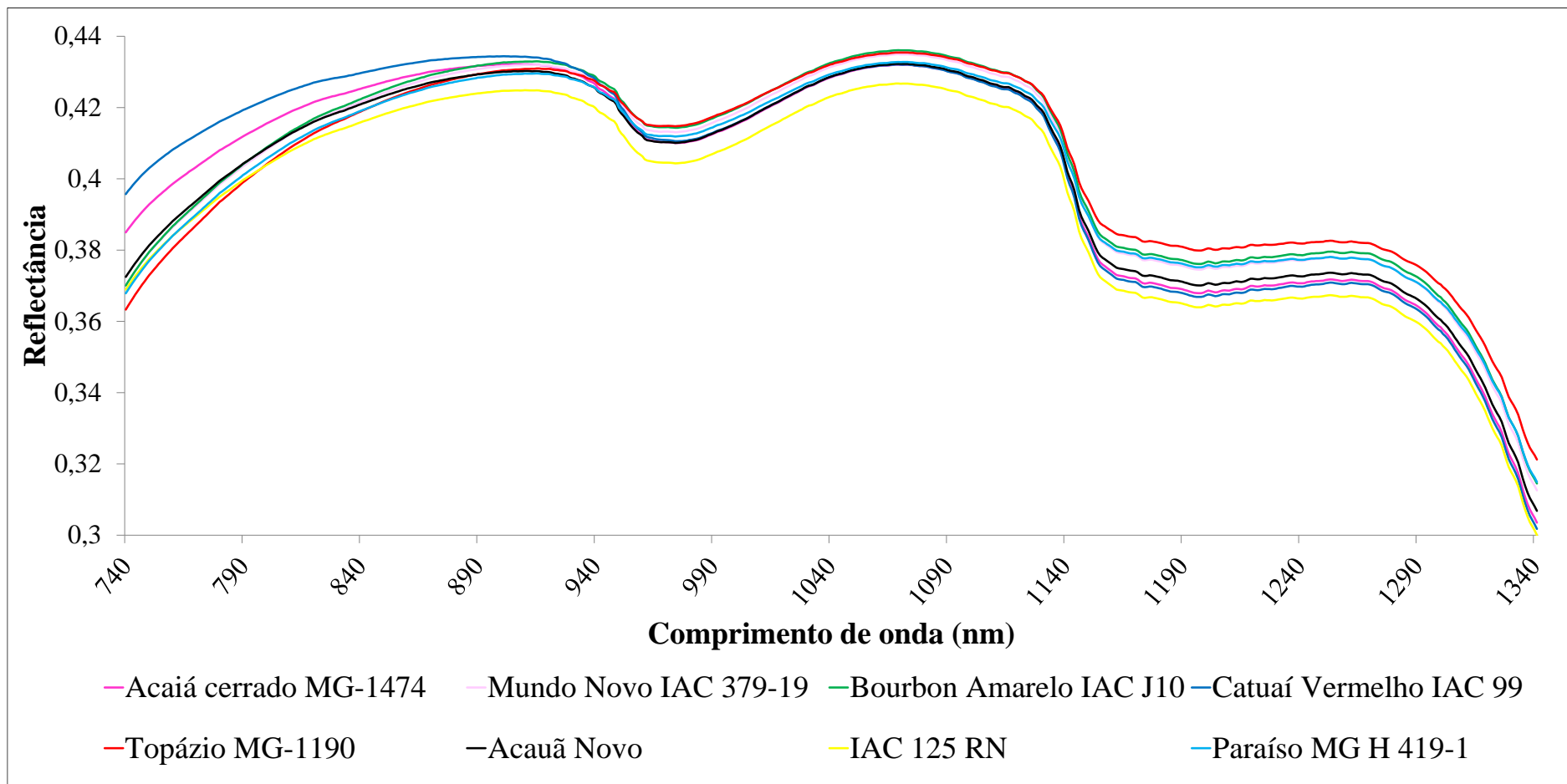
A capacidade de recuperação das plantas após a poda é uma importante característica que deve ser analisada na escolha da cultivar a ser implantada na área de cultivo. Neste contexto, Silva et al. (2016) verificaram que nas condições experimentais de Campos Altos, Minas Gerais, as cultivares Topázio MG-1190, Catiguá MG 3 e Sabiá 398 apresentaram altas produtividades, aliada a um elevado vigor vegetativo, baixo percentual de frutos chochos e alto percentual de peneira alta dos grãos no primeiro biênio após a poda, corroborando os resultados obtidos no presente trabalho.

Os genótipos Paraíso MG H 419-1 Mundo Novo IAC 374-19, Acauã Novo e IAC 125 RN apresentaram valores de reflectância semelhantes entre si nas regiões espectrais do azul (440 a 510 nm) e vermelho (630 a 685 nm) (Figura 11). Já as cultivares Catuaí Vermelho IAC 99 e Acaiá Cerrado MG 1474 apresentaram os maiores valores de reflectância no intervalo espectral da faixa do visível (400 a 740 nm), mas principalmente nos intervalos espectrais do azul (440 a 510 nm) onde os pigmentos foliares carotenos e xantofilas são responsáveis pela absorção desse espectro e, verde (520 a 590 nm) onde a clorofila, que é o pigmento foliar mais abundante, realiza a absorção desse espectro (Figura 11). Tal fato demonstra a deficiência de pigmentos fotossintetizantes dessas cultivares, fazendo com que a REM fosse refletida com maior intensidade quando comparado aos outros genótipos.

Por meio do teste de médias apresentado na Tabela 2 foi possível verificar que as cultivares Catuaí Vermelho IAC 99 e Acaiá Cerrado MG 1474 apresentaram os piores resultados em relação ao desenvolvimento vegetativo altura, diâmetro de copa, comprimento de ramos plagiotrópicos e número de nós, evidenciando o baixo vigor dessas cultivares após a poda, fato também observado por Japiassú et al. (2010), o que caracteriza estes genótipos como pouco responsivos a podas.

Observou-se que a cultivar Topázio MG-1190 apresentou a menor reflectância no início do intervalo espectral (760 a 799 nm). Este comportamento em função da menor reflectância no início do intervalo espectral é justificado devido ao ponto de crescimento acentuado da curva, também conhecido como *red edge* ou borda vermelha, sendo um ponto de transição no processo de absorção da clorofila na região espectral do vermelho, iniciando o processo de espalhamento do infravermelho próximo devido à estrutura celular interna das folhas (FORMAGGIO; SANCHES, 2017).

A partir deste ponto, a cultivar IAC 125 RN apresentou um valor de reflectância menor que os demais genótipos na faixa do infravermelho próximo e adiante (800 a 1.390 nm) (Figura 12).

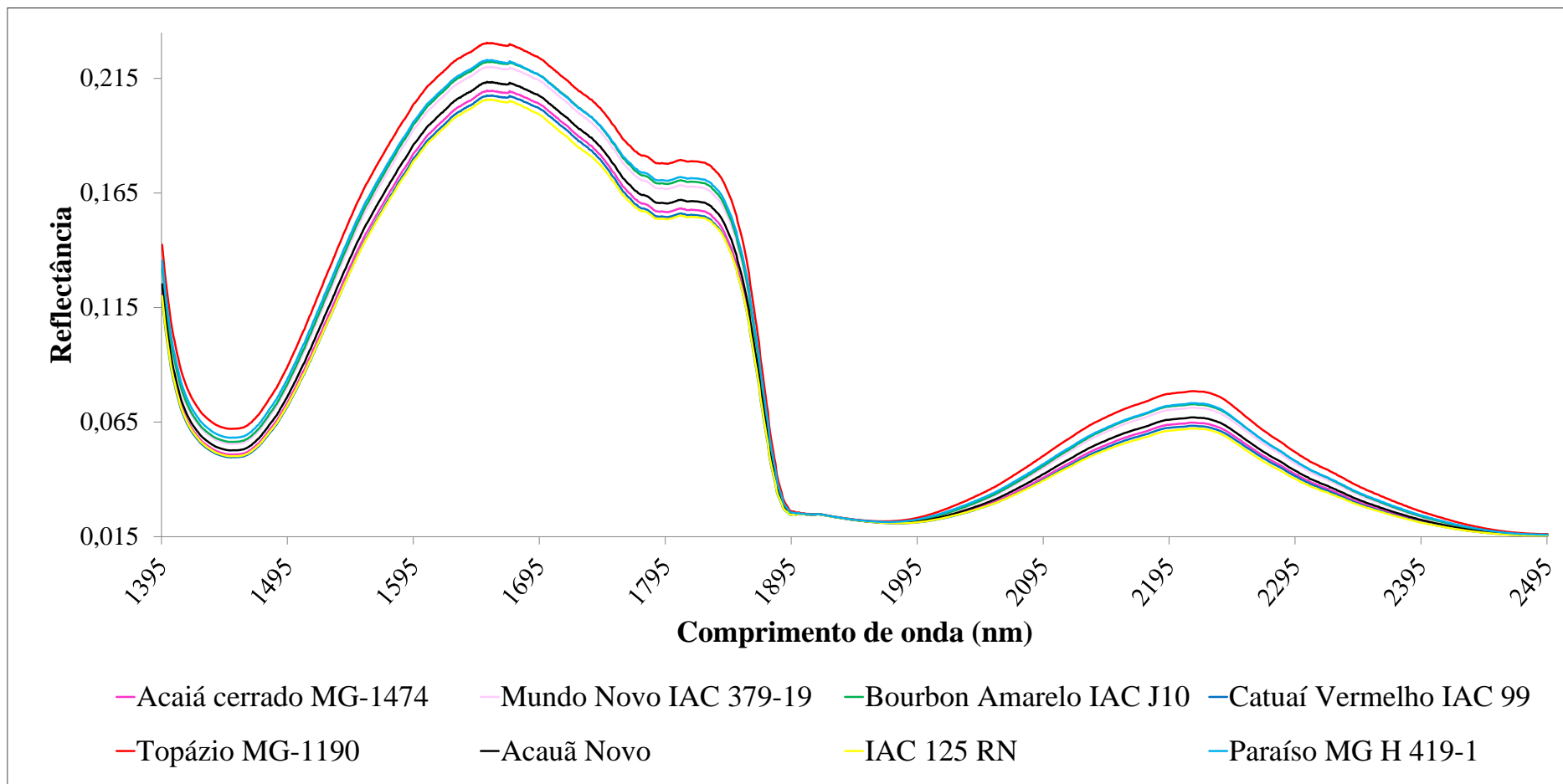


**FIGURA 12.** Valores médios de reflectância das cultivares de cafeeiros referentes ao intervalo espectral do infravermelho próximo (741 a 1.340 nm).

Isso se deve ao fato desta cultivar produzir frutos graúdos com alta porcentagem de retenção em peneira 17 acima (Tabela 2), apresentando superioridade relativa média de 120,5% em relação as demais cultivares, e ser altamente exigente em água e nutrientes (FAZUOLI et al., 2018). Nesse sentido, demanda alta quantidade de fotoassimilados para enchimento de grãos, desenvolvendo assim folhas maiores e, portanto, sua estrutura celular é mais abundante e densa em relação às demais cultivares. Por meio do Teste de Scott-Knott apresentado na Tabela 2 observou-se que a cultivar IAC 125 RN em relação ao teor de matéria seca apresentou superioridade relativa média de 17,3% quando comparado com as demais cultivares, o que ocasionou os menores valores de reflectância neste intervalo, devido ao espalhamento da REM por meio das estruturas internas das folhas.

Os valores semelhantes de reflectância entre as demais cultivares e a proximidade de valores com a cultivar IAC 125 RN pode estar relacionado com a semelhança genética entre as cultivares que, apesar de apresentarem diferenças expressivas de arquitetura e conteúdos bioquímicos entre si, pertencem à mesma espécie *C. arabica*, o que demonstra uma proximidade em relação à estrutura foliar interna entre os tratamentos.

Observou-se que a cultivar IAC 125 RN apresentou valores de reflectância menores que as demais cultivares na faixa do infravermelho de ondas curtas (Figura 13).



**FIGURA 13.** Valores médios de reflectância das cultivares de cafeeiros referente ao intervalo espectral do infravermelho de ondas curtas (1.395 a 2.495 nm).

Os genótipos Acaiá Cerrado MG-1474, Catuaí vermelho IAC 99 e Acauã Novo apresentaram valores de reflectância muito próximos a ela entre os picos de absorção de água (1.500 a 1.895 nm e 1.995 a 2.445 nm), comportamento confirmado por meio do Teste de Scott-Knott apresentado na Tabela 2, demonstrando que as cultivares são significativamente iguais em relação ao conteúdo de água nas folhas, sendo que a cultivar IAC 125 RN apresentou superioridade relativa média de 7,9% em relação as demais cultivares. Em contrapartida, as cultivares Topázio MG-1190 e Paraíso MG H 419-1 apresentaram os maiores valores de reflectância para este intervalo do espectro e os menores valores em relação ao conteúdo de água celular, segundo o teste de médias da Tabela 2. O conteúdo de água celular é responsável pela absorção espectral na faixa do infravermelho de ondas curtas (1.395 a 2.495 nm) (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

A cultivar IAC 125 RN, por apresentar folhas maiores, possivelmente armazena maior quantidade de água nos espaços intracelulares, principalmente quando possui água disponível em quantidades adequadas, como é o caso do presente experimento que foi irrigado via gotejamento. Este comportamento pode ser observado na reflectância da vegetação nos intervalos espectrais de 1.500 a 1.895 nm e 1.995 a 2.445 nm (infravermelho de ondas curtas), destacando que a cultivar IAC 125 RN apresentou os menores valores de reflectância (Figura 13).

Estudos conduzidos por Fazuoli et al. (2018) demonstraram a alta resposta da cultivar IAC 125 RN à irrigação, produzindo entre 20 a 26 sacas  $ha^{-1} ano^{-1}$  a mais em áreas irrigadas quando comparado às áreas de sequeiro. Em condições adequadas de disponibilidade de água, esta cultivar armazena uma quantidade de água maior nos espaços intracelulares, o que ocasionou um menor valor de reflectância na região do infravermelho de ondas curtas (Figura 13).

### **Modelos de predição**

Os resultados de correlação entre os índices de vegetação e os parâmetros agronômicos avaliados por meio do coeficiente de correlação de Pearson estão apresentados na Tabela 3.

**TABELA 3.** Correlação entre os índices de vegetação e os parâmetros agrônômicos: A = Altura; DC = Diâmetro de copa; CP = Comprimento de ramos plagiotrópicos; NN = Número de nós; Clo.a = clorofila a; Clo.b = clorofila b; Clo.T = clorofila total; NP = Número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda; PA = Potencial de água na folha.

Índices de vegetação	Coeficiente/P valor	A	DC	CP	Nº N	Clo a	Clo b	Clor T	Nº P	PA
Ca	Correlação de Pearson	0,356	0,424	0,419	0,427	0,173	0,098	0,136	0,132	-0,323
	P valor	<b>0,050</b>	<b>0,017</b>	<b>0,019</b>	<b>0,016</b>	0,352	0,600	0,467	0,480	0,076
Cb	Correlação de Pearson	0,422	0,549	0,625	0,628	0,209	0,088	0,145	0,086	-0,216
	P valor	<b>0,018</b>	<b>0,001</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,260	0,638	0,436	0,646	0,244
Carot.	Correlação de Pearson	0,374	0,535	0,556	0,551	0,331	0,199	0,267	0,177	-0,293
	P valor	<b>0,038</b>	<b>0,002</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	0,069	0,282	0,147	0,340	0,110
MCARI	Correlação de Pearson	-0,260	-0,377	-0,380	-0,414	-0,257	-0,209	-0,240	-0,094	0,263
	P valor	0,157	<b>0,037</b>	<b>0,035</b>	<b>0,021</b>	0,163	0,260	0,194	0,614	0,154
TCARI	Correlação de Pearson	0,102	-0,128	-0,085	-0,245	-0,248	0,021	-0,096	-0,213	0,342
	P valor	0,586	0,494	0,650	0,183	0,178	0,911	0,608	0,251	0,060
NDVI	Correlação de Pearson	0,251	0,373	0,366	0,419	0,218	0,161	0,194	0,101	-0,248
	P valor	0,174	<b>0,039</b>	<b>0,043</b>	<b>0,019</b>	0,239	0,387	0,296	0,587	0,179
NDWI	Correlação de Pearson	-0,398	-0,610	-0,607	-0,650	-0,217	-0,142	-0,182	-0,118	0,047
	P valor	<b>0,027</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,242	0,445	0,328	0,528	0,802
LWVI_1	Correlação de Pearson	0,248	0,244	0,301	0,112	0,356	0,162	0,255	0,218	-0,459
	P valor	0,179	0,186	0,100	0,547	<b>0,049</b>	0,385	0,167	0,239	<b>0,009</b>
LWVI_2	Correlação de Pearson	-0,187	-0,361	-0,335	-0,476	0,038	-0,028	-0,000	0,039	-0,263
	P valor	0,315	<b>0,046</b>	0,066	<b>0,007</b>	0,837	0,880	0,998	0,834	0,152
PRI	Correlação de Pearson	-0,407	-0,553	-0,599	-0,503	-0,396	-0,215	-0,305	-0,240	0,274
	P valor	<b>0,023</b>	<b>0,001</b>	<b>0,000</b>	<b>0,004</b>	<b>0,027</b>	0,244	0,095	0,193	0,136
EVI	Correlação de Pearson	-0,390	-0,552	-0,578	-0,478	-0,346	-0,207	-0,278	-0,202	0,255
	P valor	<b>0,030</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,007</b>	0,057	0,265	0,131	0,276	0,166

Em negrito estão as correlações significativas pelo coeficiente de Pearson e P valor ( $\leq 0,05$ ) de significância.

Por meio dos dados de correlação obtidos pelo coeficiente de Pearson apresentados na Tabela 3 foi possível observar que os índices de vegetação não apresentaram correlação significativa com os parâmetros clorofila b, clorofila total e número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda. Além disso, o índice TCARI não apresentou correlação significativa com nenhum parâmetro agrônômico avaliado. Na tabela 4 são apresentadas as equações de regressão que melhor abrangem os dados coletados em campo.

**TABELA 4.** Regressões lineares e RMSE das correlações significativas.

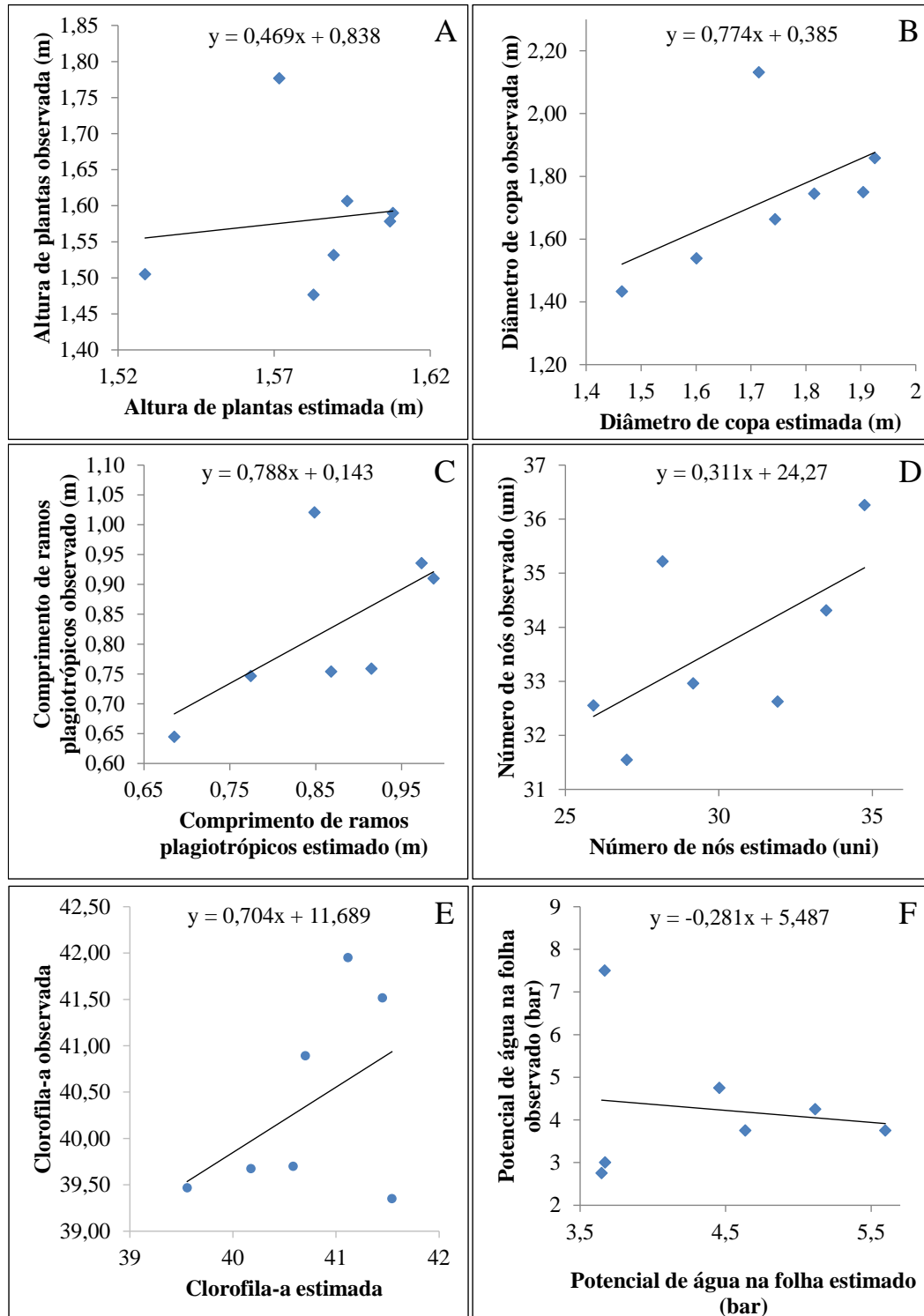
Parâmetro agrônômico	Equação de regressão	Coefficiente de Pearson	RMSE	RMSE (%)
Altura	=1,235+(0,1487*Ca)	0,356	0,099	6,29
	=1,206+(0,1748*Cb)	0,422	0,097	6,13
	=1,323+(0,0769*Carot.)	0,374	0,099	6,29
	<b>=1,7832-(3,15*NDWI)</b>	<b>-0,398</b>	<b>0,092</b>	<b>5,78</b>
	=1,5824-(2,35*PRI)	-0,407	0,096	6,05
	=1,842-(0,824*EVI)	-0,390	0,094	5,96
Diâmetro de copa	=0,715+(0,443*Ca)	0,424	0,225	12,99
	=0,525+(0,568*Cb)	0,549	0,203	11,74
	=0,827+(0,2746*Carot.)	0,535	0,211	12,19
	=2,354-(2,67*MCARI)	-0,377	0,234	13,50
	=0,749+(2,089*NDVI)	0,373	0,233	13,48
	=2,521-(12,04*NDWI)	-0,610	0,198	11,44
	=2,688-(13,02*LWVI-2)	-0,361	0,228	13,17
	<b>=1,7506-(7,98*PRI)</b> <b>=2,666-(2,905*EVI)</b>	<b>-0,553</b> <b>-0,552</b>	<b>0,179</b> <b>0,177</b>	<b>10,35</b> <b>10,21</b>
Comprimento de ramos plagiotrópicos	=0,232+(0,273*Ca)	0,419	0,134	16,28
	=0,0002+(0,4042*Cb)	0,625	0,118	14,29
	=0,272+(0,1786*Carot.)	0,556	0,124	15,00
	=1,253-(1,687*MCARI)	-0,380	0,142	17,26
	=0,255+(1,286*NDVI)	0,366	0,142	17,27
	=1,352-(7,51*NDWI)	-0,607	0,117	14,13
	=0,8731-(5,41*PRI)	-0,599	0,107	12,98
	<b>=1,473-(1,906*EVI)</b>	<b>-0,578</b>	<b>0,105</b>	<b>12,69</b>
Número de nós	=12,38+(9,22*Ca)	0,427	4,71	15,65
	<b>=5,08+(13,41*Cb)</b>	<b>0,628</b>	<b>4,35</b>	<b>14,47</b>
	=14,32+(5,84*Carot.)	0,551	4,39	14,60
	=47,72-(60,8*MCARI)	-0,414	4,86	16,16
	=10,72+(48,6*NDVI)	0,419	4,95	16,47
	=50,97-(265,4*NDWI)	-0,650	4,83	16,07
	=59,59-(354*LWVI-2)	-0,476	5,57	18,52
	=33,927-(149,9*PRI)	-0,503	4,42	14,70
<b>=50,32-(52,1*EVI)</b>	<b>-0,478</b>	<b>4,39</b>	<b>14,60</b>	
Clorofila a	=357,8+(2265*LWVI-1)	0,356	9,63	2,39
	<b>=407,77-(365*PRI)</b>	<b>-0,396</b>	<b>9,68</b>	<b>2,39</b>
Potencial de Água	<b>=10,49-(286*LWVI-1)</b>	<b>-0,459</b>	<b>1,73</b>	<b>40,72</b>

Em negrito estão as regressões que apresentaram valor de p (<0,05) e menor RMSE (%).

Foi possível inferir que vários índices apresentaram correlações significativas segundo o coeficiente de Pearson. Apesar de alguns índices apresentarem menor valor de p, foram



escolhidos aqueles com o menor valor de quadrado médio do resíduo (RMSE), ou seja, aquele modelo que apresenta o menor erro, sendo posteriormente gerados os gráficos (Figura 14).



**FIGURA 14.** Equação de regressão entre altura (metros) e índice NDWI (A); equação de regressão entre diâmetro de copa (metros) e índice EVI (B); equação de regressão entre comprimento de ramos plagiotrópicos (metros) e EVI (C); equação de regressão entre número de nós e índice Cb (D); equação de regressão entre clorofila a e índice PRI (E); equação de regressão entre potencial de água na folha e índice LWVI-1 (F).

O índice de água por diferença normalizada (NDWI), desenvolvido por Gao (1996) e que tem por objetivo diferenciar vegetação de corpos d'água foi o que melhor abrangeu os dados para o parâmetro agrônômico altura de plantas (valor de  $p = 0,027$ ; RMSE (%) = 5,78). Apesar de não apresentar o menor valor de  $p$  (Tabela 4), demonstrou um menor valor de RMSE, indicando ser o índice de vegetação mais acurado para estimar o parâmetro altura de plantas como indicado no gráfico de regressão da Figura 14A.

Galvínio (2017) verificou adequada relação entre os índices de vegetação e o conteúdo de água na folha, sendo  $r = 0,76$  para o SAVI e  $0,64$  para o NDVI. Para a evapotranspiração a correlação também foi significativa ( $r = 0,386$ ), o que demonstra que a quantidade de água na folha está altamente correlacionada com o acúmulo de biomassa.

O índice NDWI foi capaz de estimar o comportamento de desenvolvimento fitotécnico dos genótipos de cafeeiro (altura de plantas) que está diretamente relacionado com o incremento da biomassa da vegetação. Serrano et al. (2019) verificaram correlações significativas entre os índices NDWI e NDVI e os parâmetros de qualidade da pastagem como proteína bruta, fibra em detergente neutro, umidade e índice de degradação da qualidade da pastagem, bem como entre o NDWI e a umidade superficial do solo.

O índice de realce da vegetação (EVI) foi desenvolvido com o intuito de destacar o sinal da vegetação em regiões de biomassa superiores. Portanto, foi o índice de vegetação que melhor abrangeu os dados para os parâmetros agrônômicos diâmetro de copa e comprimento de ramos plagiotrópicos (valor de  $p = 0,001$ ; RMSE (%) = 10,21 e valor de  $p = 0,001$ ; RMSE (%) = 12,69, respectivamente), demonstrando assim que o EVI conseguiu descrever o desenvolvimento fitotécnico do cafeeiro em razão da biomassa aumentada por meio dos parâmetros agrônômicos citados anteriormente (Figuras 14B e 14C).

Trindade et al. (2019) demonstraram que o EVI nos estádios fenológicos iniciais do ciclo reprodutivo da cultura da soja R1, R2 e R3 gerou os melhores modelos de predição dos atributos do solo, enquanto o NDVI no estágio R2 gerou o melhor modelo de predição da produtividade de grãos.

Para o parâmetro agrônômico número de nós, o índice de vegetação que melhor abrangeu os dados foi o de clorofila b (valor de  $p = 0,000$ ; RMSE (%) = 14,47), indicando assim que este índice de vegetação, entre todos os avaliados, é o mais acurado para esta estimativa (Figura 14D). O parâmetro número de nós está diretamente relacionado com o

desenvolvimento e acúmulo de biomassa do cafeeiro em relação ao desenvolvimento de novas gemas que se diferenciarão em novas folhas, ramos secundários e/ou frutos.

Em área de cana-de-açúcar infectada por nematoides e pela larva do besouro *Migdolus fryanus*, a técnica espectral *Red Edge Position* e índices de vegetação, incluindo o índice clorofila b, permitiram a separação entre plantas saudáveis e infectadas, havendo diferenças em magnitude das curvas de reflectância, principalmente nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo (MARTINS; GALO, 2015).

Para o parâmetro clorofila-a, o índice de vegetação que melhor abrangeu os dados foi o índice de reflectância fotoquímica (PRI) (valor de  $p = 0,027$ ; RMSE (%) = 2,39), proposto por Gamon; Peñuelas; Field (1992), indicando que este índice foi o mais acurado na predição deste parâmetro agrônômico (Figura 14E). O índice PRI está diretamente relacionado com as taxas de fotossíntese da vegetação que envolvem sistemas complexos do aparato bioquímico, fisiológico e estrutural, desde pigmentos presentes nas folhas, até um conjunto de organelas que se arranjam de forma a criar um sistema como os fotossistemas I e II.

Portanto, já se esperava que ocorresse uma correlação significativa com algum pigmento fotossintetizante, uma vez que as avaliações do presente trabalho foram realizadas a nível foliar e o teor destes pigmentos nas folhas apresentarem alta correlação com as taxas de fotossíntese. Yudina et al. (2020) demonstraram que o aumento da intensidade da REM diminui a atividade do fotossistema II na cultura da ervilha, apresentando diminuição dos valores do índice PRI. Por outro lado, o aumento da intensidade da REM em trigo e abóbora demonstraram um aumento nos valores de PRI.

O índice de vegetação de água na folha (LWVI), proposto por Galvão; Formaggio; Tisot (2005) foi desenvolvido especificamente para identificação do conteúdo de água foliar. Portanto, foi o índice de vegetação que melhor abrangeu os dados para o parâmetro potencial de água na folha (valor de  $p = 0,009$ ; RMSE (%) = 40,72), indicando que, apesar de apresentar um valor de RMSE alto, o que demonstra um índice de acurácia inferior, foi o único que apresentou correlação significativa por meio do coeficiente de Pearson (Figura 14F).

## CONCLUSÕES

Foi possível realizar a caracterização hiperespectral das cultivares de cafeeiros, estabelecendo assim, o desenvolvimento fitotécnico dos genótipos após poda do tipo decote.

Em relação à resposta espectral após poda, a cultivar Topázio MG-1190 foi a mais eficiente na absorção da REM nos intervalos espectrais do azul (440 a 510 nm), verde (520 a 590 nm) e vermelho limítrofe (690 a 730 nm), após a poda do tipo decote. Na região espectral do vermelho (630 a 685 nm) as cultivares Topázio MG-1190 e Bourbon Amarelo IAC J10 apresentam a mesma resposta espectral. A cultivar IAC 125 RN demonstrou maior eficiência na absorção da REM nos intervalos espectrais 800 a 1.100 nm e 1.150 a 1.300 nm referente ao infravermelho próximo e nos intervalos espectrais de 1.500 a 1.895 nm e 1.995 a 2.445 nm referente ao infravermelho de ondas curtas, após a poda do tipo decote.

Por meio das correlações significativas obtidas por meio do coeficiente de Pearson entre os índices de vegetação e os parâmetros agrônômicos avaliados foi possível estimar os parâmetros após o manejo de poda do tipo decote com elevada acurácia, sendo altura por meio do índice NDWI (RMSE = 5,78%), diâmetro de copa e comprimento de ramos plagiotrópicos por meio do índice EVI (RMSE = 10,21 e 12,69 % respectivamente), número de nós por meio do índice Cb (RMSE = 14,47%), clorofila a por meio do índice PRI (RMSE = 2,39%) e potencial de água na folha por meio do índice LWVI-1 (RMSE = 40,72%).

## REFERÊNCIAS

- ABREU-JÚNIOR, C. A. M.; VINHAL, G. P.; XAVIER, L. C. M.; MARTINS, G. D.; VIEIRA, B. S. Mapeamento de nematoides na cultura cafeeira a partir de imagens multiespectrais obtidas por aeronaves remotamente pilotadas. **Revista Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 21, n. 76, p. 72-84, ago. 2020. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG217651255>. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/>. Acesso em: 7 set. 2020.
- ALMEIDA, T. S.; SEDIYAMA, G. C.; ALENCAR, L. P. Estimativa da produtividade de cafeeiros irrigados pelo método zona agroecológica espectral. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 1-11, mar. 2017. DOI: <https://doi.org/10.13083/reveng.v25i1.727>. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/654>. Acesso em: 28 ago. 2020.
- ASSIS, G. A.; SILVA, L. R. S.; MARTINS, W. E. R.; CARVALHO, F. J.; PIRES, P. S. Crescimento e produtividade de cafeeiros na região do Alto Paranaíba em função do tipo de poda de desbrota. **Revista Ciência Agrícola**, Rio Largo, v. 16, n. 2, p. 9-12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.28998/rca.v16i2.4467>. Disponível em: <https://www.seer.ufal.br/index.php/revistacienciaagricola/article/view/4467/4383>. Acesso em: 15 ago. 2020.
- BARTON, C. V. M. Advances in remote sensing of plant stress. **Plant and Soil**, v. 354, p. 41-44, nov. 2012. DOI: <https://10.0.3.239/s11104-011-1051-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-011-1051-0>. Acesso em: 14 set. 2020.

BLACKBURN, G. A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, n. 3, p. 273-285, dez. 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00059-5). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425798000595?via%3Dihub>. Acesso em: 5 set. 2020.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Registro Nacional de Cultivares - RNC**. Brasília, DF: MAPA, 2020. Disponível em: [http://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares\\_registradas.php](http://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php). Acesso em: 31 jul. 2020.

CARVALHO, G.R; FIGUEIREDO, T. F.; CARVALHO, A. M.; FERREIRA, A.D.; RESENDE, M. R.; BOTELHO C. E. **Tipos de podas e condução de lavoura cafeeira**, Belo Horizonte: EPAMIG, 2010. Disponível em: [http://www.epamig.br/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=1362](http://www.epamig.br/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=1362). Acesso em: 18 dez. 2020.

CARVALHO, A. M. X.; MENDES, F. Q.; TAVARES, L. F. SPEED Stat: a free, intuitive and minimalist spreadsheet program for statistical analyses of experiments. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 20, n. 3. p. 1-6. out. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n3s46>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1984-70332020000300401&script=sci\\_arttext&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1984-70332020000300401&script=sci_arttext&tlng=pt). Acesso em: 28 out. 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Acompanhamento da Safra Brasileira**. safra 2020, segundo levantamento. Brasília, DF: CONAB, 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>. Acesso em: 02 de fev. de 2020.

DAUGHTRY, C. S. T.; WALTHALL, C. L.; KIM, M. S.; BROWN DE COLSTOUN, E.; MCMURTREY, J. E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy Reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, n. 2, p. 229-239, nov. 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425700001139>. Acesso em: 8 ago. 2020.

FAZUOLI, L. C.; BRAGUINI, M. T.; SILVAROLLA, M. B.; GONÇALVES, W.; MISTRO, J. C.; GALLO, P. B.; GUERREIRO-FILHO O. IAC 125 RN – A dwarf coffee cultivar resistant to leaf rust and root-knot nematode. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 18, n. 2, p. 237-240, Jun 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1984-70332018v18n2c35>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1984-70332018000200237](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1984-70332018000200237). Acesso em: 8 ago. 2020.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

GAO, B. C. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257-266, Dez. 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3). Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425796000673>. Acesso em: 17 out. 2020.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 4, p. 523-534, Fev. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425704003669>. Acesso em: 12 set. 2020.

GALVÍNCIO, J. D. Relation of leaf water content with real evapotranspiration and biomass in Caatinga biome, using remote sensing data. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 10, n. 5, p. 1545-1551, Nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.5.p1545-1551>. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/234340>. Acesso em: 12 set. 2020.

GAMON, J. A.; PEÑUELAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, v. 41, n. 1, p. 35-44, Jul 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90059-S](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90059-S). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/003442579290059S?via%3Dihub>. Acesso em: 12 set. 2020.

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; TREMBLAY, N.; ZARCO-TEJADA, P. J.; DEXTRAZE, L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 2-3, p. 416-426, Ago 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425702000184?via%3Dihub>. Acesso em: 12 set. 2020.

JACQUEMOUD, S. Inversion of the PROSPECT + SAIL canopy reflectance model from AVIRIS equivalent spectra: Theoretical study. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, n. 2-3, p. 281-292, Jun 1993. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90022-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90022-P). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/003442579390022P?via%3Dihub>. Acesso em: 15 set. 2020.

JAPIASSU, L. B.; GARCIA, A. L. A.; GUIMARÃES, R. J.; PADILHA, L.; CARVALHO, C. H. S. Ciclos de poda e adubação nitrogenada em lavouras cafeeiras conduzidas no sistema “safra zero”. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 1, p. 28-37, abr. 2010. DOI: <https://doi.org/10.25186/cs.v5i1.269>. Disponível em: <http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/269>. Acesso em: 16 out. 2020.

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

JIANG, J.; COMAR, A.; BURGER, P.; BANCAL, P.; WEISS, M.; BARET, F. Estimation of leaf traits from reflectance measurements: Comparison between methods based on vegetation indices and several versions of the PROSPECT model. **Plant Methods**, v. 14, n. 23, p. 1-16, Mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-018-0291-x>. Disponível em: <https://plantmethods.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13007-018-0291-x>. Acesso em: 18 out. 2020.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3833–3845, Out 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425708001971>. Acesso em: 8 ago. 2020.

LICHTENTHALER, H. K., WELLBURN, A. R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Society Transactions**, v. 11, n. 5, p. 591–592, Out 1983. DOI: <https://doi.org/10.1042/bst0110591>. Disponível em: <https://portlandpress.com/biochemsoctrans/article-abstract/11/5/591/57549/Determinations-of-total-carotenoids-and?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 23 ago. 2020.

MAHAJAN, G. R.; SAHOO, R. N.; PANDEY, R. N.; GUPTA, V. K.; KUMAR, D. Using hyperspectral remote sensing techniques to monitor nitrogen, phosphorus, sulphur and potassium in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Precision Agriculture**, New York, v. 15, n. 5, p. 499-522, Out 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-014-9348-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-014-9348-7>. Acesso em: 27 out. 2020.

MARIN, B. D.; ALVES M. C.; POZZA, E. A.; GANDIA R. M.; CORTEZ M. L.; MATTIOLI M. C. Sensoriamento remoto multiespectral na identificação e mapeamento das variáveis bióticas e abióticas do cafeeiro. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 66, n. 2, p. 142-153, abr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737x201966020009>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-737X2019000200142](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-737X2019000200142). Acesso em: 11 ago. 2020.

MARTINS, G. D., GALO, M. L. B. T. Caracterização espectral da cana-de-açúcar infectada por nematoides e *Migdolus fryanus* por espectrorradiometria de campo. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 21, n. 4, p. 783-796, dez. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702015000400046>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1982-217020150004000783&lng=en&nrm=iso](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-217020150004000783&lng=en&nrm=iso). Acesso em: 27 ago. 2020.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2015.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2010.

PONZONI, F. J., SHIMABUKURO, Y. E., KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo. Oficina de Textos, 2012. v. 1.

ROUSE, J. W., HASS, R. H., SCHELL, J. A., DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *In*: THIRD Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington, DC, NASA SP-351, 1974. v. 1, p. 309-317.

SANTOS, L. M.; FERRAZ, G. A. S.; SANTANA, L. S.; BARBOSA, B. D. S.; XAVIER, L. A. G.; ANDRADE, M. T. Índice de vegetação (ExGR) aplicado a imagens RGB obtidas por UAV para detecção de doença em cafeeiros. *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS

DO BRASIL, 10., 2019, Vitória. **Anais [...]** Vitória: Embrapa Café, 2019. 5 p. Disponível em: <http://www.consorciopesquisacafe.com.br/ojs/index.php/SimposioCafe2019/article/view/512>. Acesso em: 13 set. 2020.

SCHAEPMAN-STRUB, G.; SCHAEPMAN, M. E.; PAINTER, T. H.; DANGEL, S., MARTONCHIK, J. V. Reflectance quantities in optical remote sensing – definitions and case studies. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, n. 1, p. 27-42, Jul 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.03.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425706001167>. Acesso em: 13 set. 2020.

SERRANO, J.; SHAHIDIAN, S.; PAIXAO, L.; TERRÓN J. M.; SILVA, J. M. Utilização de índices obtidos a partir de imagens de satélite na monitoração das pastagens e no apoio à gestão do ecossistema montado. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 42, n. 4, 865-873, dez. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.19084/rca.18638>. Disponível em: [http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0871-018X2019000400001](http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0871-018X2019000400001). Acesso em: 23 set. 2020.

SILVA, F. M.; ALVES M. C. **Cafecultura de precisão**. 1. ed. Lavras. Editora UFLA, 2013.

SILVA, V. A.; REZENDE, J. C.; CARVALHO, A. M.; CARVALHO, G. R.; REZENDE, T. T.; FERREIRA, A.D. Recuperação de cultivares de café submetidas ao esqueletamento aos quatro anos e meio de idade. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 55-64, mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.25186/cs.v11i1.968>. Disponível em: <http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/968>. Acesso em: 28 nov. 2020.

TISOT, D. A.; FORMAGGIO, A. R.; GALVÃO, L. S.; RENNÓ, C. D. Dados Hyperion e ETM+ na classificação de alvos agrícolas com diferentes níveis de distinção espectral. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. 2005, Goiânia. **Anais [...]** Goiânia: INPE, 2005. p. 439-446. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.22.09.58/doc/439.pdf>. Acesso em: 12 set. 2020.

TRINDADE, F. S.; ALVES, M. C.; NOETZOLD, R.; ANDRADE, I. C.; POZZA, A. A. A. Relação espectro-temporal de índices de vegetação com atributos do solo e produtividade da soja. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 62, p. 1-11, mar. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.22491/rca.2019.2928>. Disponível em: <https://ajaes.ufra.edu.br/index.php/ajaes/article/view/2928>. Acesso em: 3 out. 2020.

VERDIN-FILHO, A.C.; VOLPI, P. S.; FERRÃO, M. A. G.; FONSECA, A. F. A.; ALIXANDRE, F. T.; COMÉRCIO, M.; KAULZ, M. **Poda programada de ciclo em café arábica (PPCA)**: nova tecnologia de poda para café arábica. 3. ed. Vitória: Incaper, 2018.

WHITHAM, F. H.; BLAYDES, D. F.; DEVLIN, R.M. **Experiments in Plant Physiology**. New York: D. Van Nostrand Company, 1971.

YUDINA, L.; SUKHOVA, E.; GROMOVA, E.; NERUSH, V.; VODENEE, V.V.; SUKHOV, V. A light-induced decrease in the photochemical reflectance index (PRI) can be used to estimate the energy-dependent component of non-photochemical quenching under heat stress



and soil drought in pea, wheat, and pumpkin. **Photosynth Research**, v. 146, p. 175-187, Fev. 2020. DOI: <http://10.1007/s11120-020-00718-x>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11120-020-00718-x>. Acesso em: 23 out. 2020.

## **CAPÍTULO II. Imagens multiespectrais no monitoramento de parâmetros fitotécnicos de *Coffea arabica* L. após a poda**

### **RESUMO**

A cafeicultura no Cerrado Mineiro é uma atividade desenvolvida em áreas extensas, sendo comum o plantio de várias cultivares em uma única propriedade para facilitar o escalonamento da colheita. Tecnologias capazes de reduzir o custo operacional, aumentando a longevidade do cafezal são necessárias para elevar a lucratividade e a competitividade da atividade. O objetivo deste trabalho foi monitorar plantas de cafeeiros após a poda por meio de imagens multiespectrais adquiridas com aeronave remotamente pilotada (ARP) embarcada com a câmara *Mapir Survey 3* e estimar os parâmetros agronômicos a partir de modelos paramétricos de regressão simples. As avaliações de crescimento foram realizadas em 228 pontos amostrais referentes às plantas de cafeeiros, sendo analisados os parâmetros altura de plantas, diâmetro de copa, comprimento de ramos plagiotrópicos e número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda. A confecção dos mosaicos contemplando todas as plantas de cafeeiros do experimento foi realizada por meio do *software* Agisoft PhotoScan Professional 1.4.5, a calibração radiométrica por meio do *software* *Mapir Camera Control*, o georeferenciamento por meio do *software* QGIS e a normalização dos dados pelo *software* ENVI. Pela análise de dados foi possível, por meio dos modelos gerados, estimar os parâmetros agronômicos de cafeeiros após o manejo de podas do tipo decote com elevada acurácia, sendo altura por meio do voo de abril e a banda do infravermelho próximo (Precisão = 91,87%), diâmetro de copa e comprimento de ramos plagiotrópicos por meio do voo de abril e a banda do vermelho (Precisão = 89,36% e 82,22%, respectivamente), número de nós por meio do voo de fevereiro e a banda do infravermelho próximo (Precisão = 79,48%) e número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda por meio do voo de junho e a banda do infravermelho próximo (Precisão = 69,57%).

**Palavras-chave:** cafeeiro; NDVI; decote; ARP; estimativa; Cerrado Mineiro.

## **CHAPTER II. Multispectral images in the monitoring of phytotechnical parameters of *Coffea arabica* L. after pruning**

### **ABSTRACT**

Coffee cultivation in the Cerrado Mineiro is an activity developed in large areas, and it is common to plant several cultivars on a single property to facilitate the staggering of the harvest. Technologies capable of reducing the operational cost, increasing the longevity of the coffee plantation are necessary to increase the profitability and competitiveness of the activity. The objective of this work was to monitor coffee plants after pruning by means of multispectral images acquired with a remotely piloted aircraft (ARP) shipped with the Mapir Survey 3 camera and to estimate agronomic parameters using simple regression parametric models. The growth evaluations were carried out at 228 sample points referring to the coffee plants, and the parameters plant height, crown diameter, length of plagiotropic branches and number of plagiotropic branches from the pruning point were analyzed. The making of the mosaics that included all the coffee plants in the experiment was performed using the Agisoft PhotoScan Professional 1.4.5 *software*, radiometric calibration using the *Mapir Camera Control software*, georeferenced using the *QGIS software* and normalization using the *software* ENVI. Through the data analysis, it was possible, through the models generated, to estimate the agronomic parameters of coffee trees after handling high-accuracy decote-type pruning, being height through the April flight and the near infrared band (Precision = 91, 87%), crown diameter and length of plagiotropic branches through the April flight and the red band (Accuracy = 89.36% and 82.22%, respectively), number of nodes through the February flight and the near infrared band (Accuracy = 79.48%) and number of plagiotropic branches from the pruning point through the June flight and the near infrared band (Accuracy = 69.57%).

**Keywords:** coffee tree; NDVI; decote-type pruning; RPA; estimate; Cerrado Mineiro.

## INTRODUÇÃO

O cafeeiro é uma cultura de grande importância socioeconômica para o Brasil, e principalmente para região do Cerrado Mineiro, compreendendo as mesorregiões do Triângulo Mineiro, Alto Paranaíba e Noroeste. Minas gerais apresenta a maior área cultivada com a espécie *Coffea arabica* L., cerca de 1,031 milhão de ha, compondo 68% da área plantada no território nacional (COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO, 2020). Atualmente existem 133 genótipos de cafeeiros desta espécie no Registro Nacional de Cultivares (RCN, 2020), com ampla diversidade em relação ao desenvolvimento vegetativo e resistências a pragas e doenças nas mais variadas regiões do Brasil.

A escolha adequada da cultivar em função da adaptação para região de instalação do cafezal, influencia diretamente nas táticas de manejo a serem desenvolvidas. Em função da interação genótipo e ambiente, se torna fundamental verificar o comportamento vegetativo e produtivo dos materiais genéticos em cada região, auxiliando o cafeicultor na tomada de decisão em função da cultivar mais promissora em termos de vigor vegetativo possivelmente proporcionar maiores produtividades (MACHADO et al., 2017).

Além disso, se faz necessário a adoção de táticas de manejo a fim de aumentar a longevidade do cafezal, mantendo sua estabilidade produtiva e qualidade do produto final. A poda é uma alternativa viável em relação à instalação de um novo cafezal, proporcionando a recuperação de cafeeiros com idade avançada, que apresentam depauperamento de ramos ou acometidos por algum estresse abiótico, como geada ou chuva de granizo. Quando aplicada em lavouras que não apresentam necessidade dessa prática, ou quando o material genético não é responsivo a ela, podem apresentar a não recuperação dos ramos e conseqüentemente perdas na produtividade (ASSIS et al., 2018).

Assim como o manejo de podas, os avanços tecnológicos introduzidos aos sistemas agrícolas têm despertado o interesse dos produtores na adoção de ferramentas capazes de aprimorar o monitoramento e a gestão operacional. O uso do sensoriamento remoto da vegetação e a utilização de aeronaves remotamente pilotadas (ARP) para o monitoramento e aquisição de imagens multiespectrais tem por objetivo a identificação da variabilidade espacial da lavoura, redução de custos, alocando recursos de acordo com as demandas da propriedade, proporcionando organização de dados e informações, a fim de aprimorar algumas táticas de manejo tradicionais que são onerosas (MANTOVANI et al., 2020).

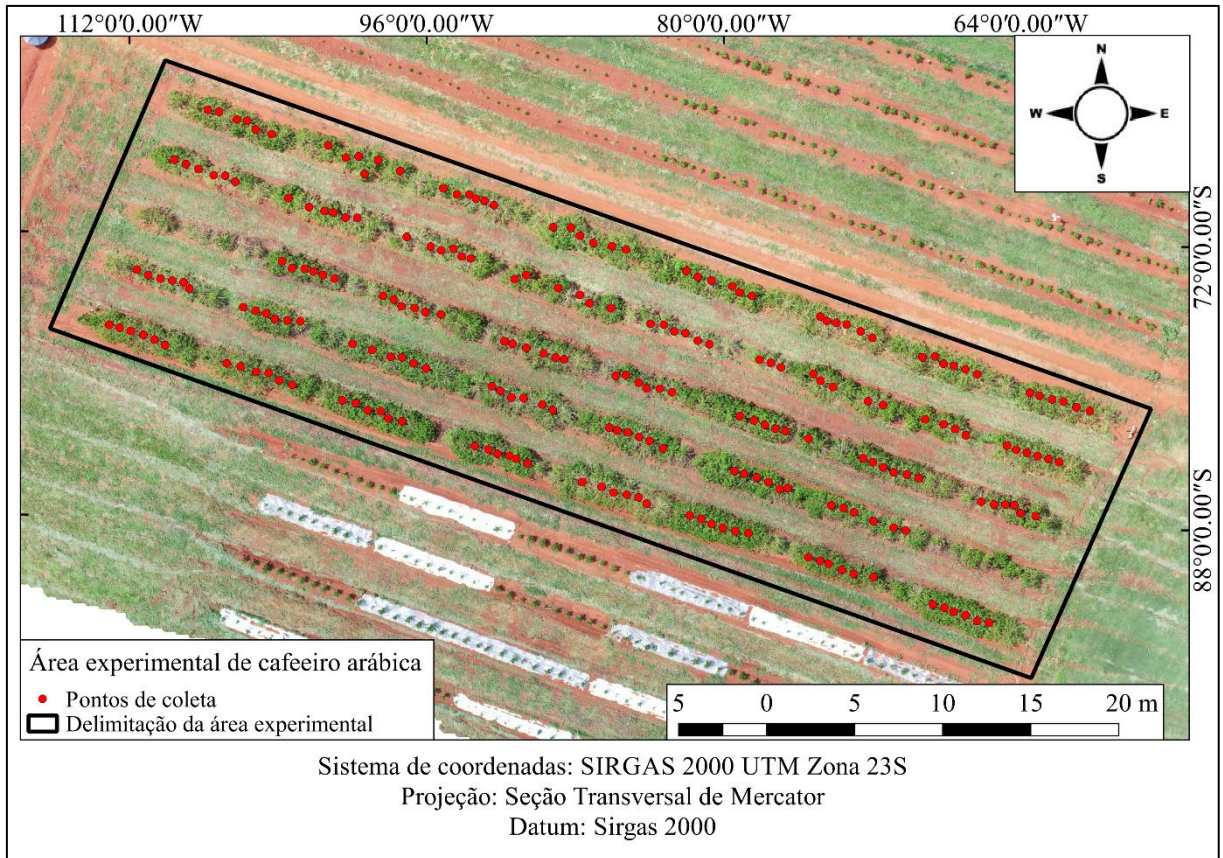
O sensoriamento remoto multiespectral é uma ferramenta de elevado potencial de monitoramento e identificação da variabilidade espacial em lavouras cafeeiras por meio de índices de vegetação (FORMAGGIO; SANCHES, 2017). Além de auxiliar o produtor na gestão operacional, também confere acurácia na aquisição de dados e proporciona confiabilidade na tomada de decisão, reduzindo o custo operacional. Furlanetto et al. (2017) demonstraram que o monitoramento da vegetação por meio de câmaras multiespectrais acopladas a ARPs reduzem o custo operacional, tornando a coleta de dados mais eficiente e com maior velocidade em função dos estádios evolutivos das culturas agrícolas, auxiliando na tomada de decisão das táticas de manejo.

Diante do exposto, o presente trabalho é de fundamental importância devido à escassez de estudos relacionados à discriminação do desenvolvimento fitotécnico de cafeeiros após a poda por meio de imagens multiespectrais. Neste sentido, o produtor terá uma ferramenta de estimativa do desenvolvimento vegetativo das plantas, sendo possível estimar os parâmetros de crescimento por meio das bandas espectrais mais responsivas e determinar qual a época do ano ou o estágio fenológico mais propício para realizar o aerolevanteamento e aquisição de dados. Portanto, o presente trabalho, poderá servir de base para futuros estudos relacionados ao desenvolvimento fitotécnico de cafeeiros após o manejo de podas.

O objetivo deste trabalho foi monitorar as plantas de cafeeiros da espécie *C. arabica* L. após poda a partir de imagens multiespectrais obtidas por meio de ARP e estimar os parâmetros agronômicos a partir de modelos paramétricos de regressão simples.

## MATERIAL E MÉTODOS

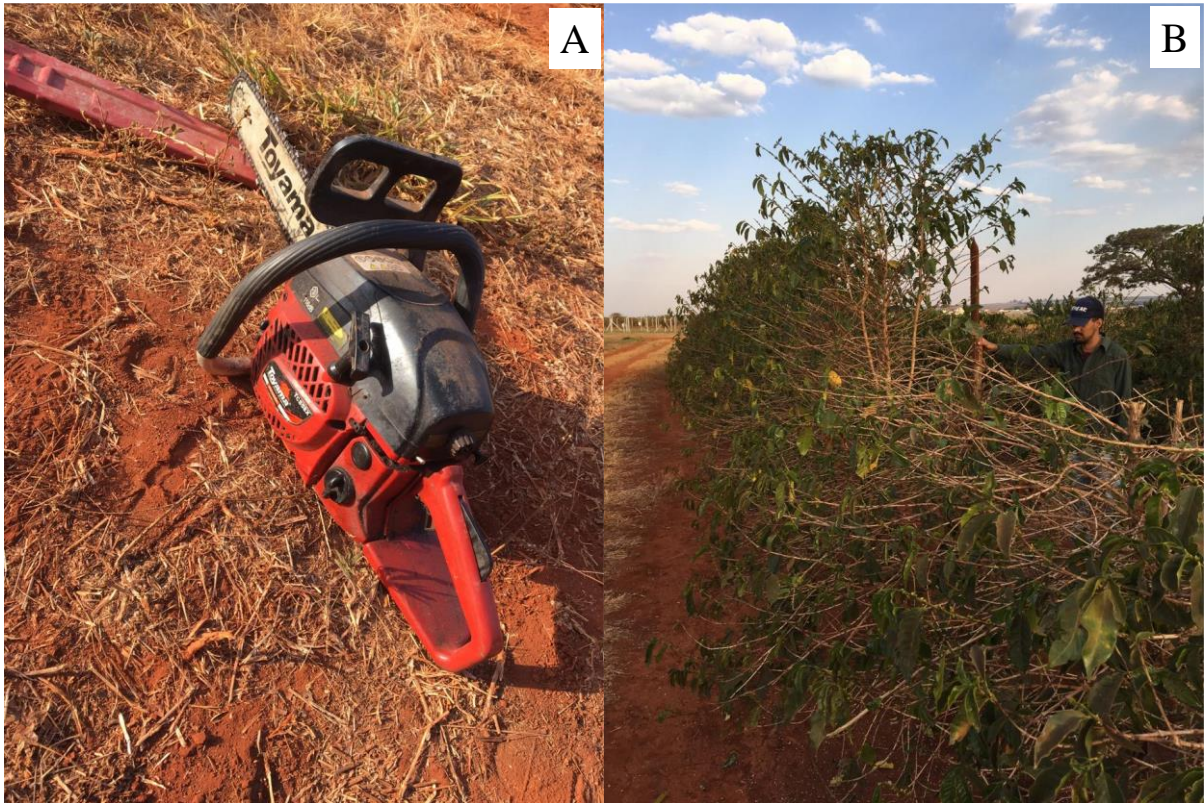
O experimento foi conduzido na Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Monte Carmelo, situado no estado de Minas Gerais, na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. As coordenadas geográficas da área experimental são 18° 43' 41'' S e 47° 31' 26'' e altitude de 903 m. O plantio foi realizado em dezembro de 2015 no espaçamento de 3,5 m entre linhas e 0,6 m entre plantas. A área foi constituída por 228 plantas de cafeeiros pertencentes à espécie *C. arabica* L., dispostas em 38 parcelas constituídas por seis plantas úteis em cada unidade experimental (Figura 1).



**FIGURA 1.** Croqui da área experimental e as respectivas delimitações das parcelas que compõem o experimento.

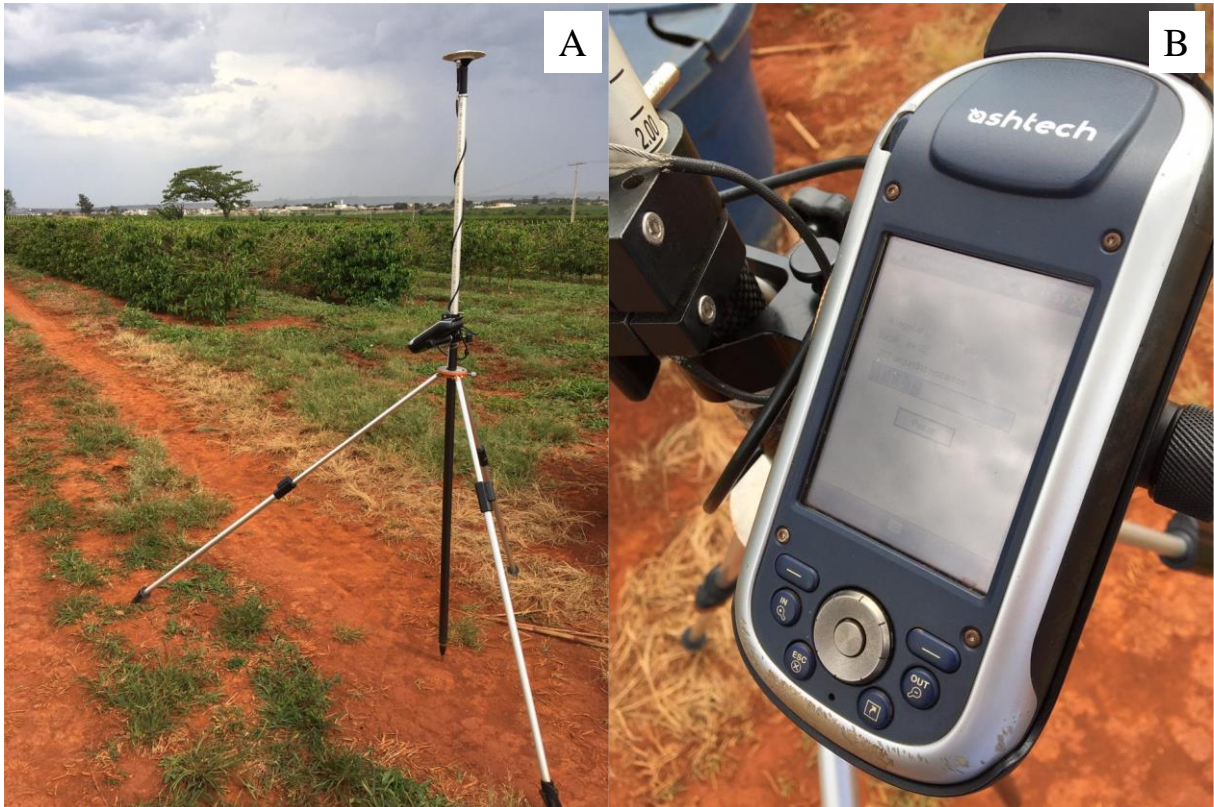
### Aquisição de dados

A poda do tipo decote baixo foi realizada no dia 13 de setembro de 2019 utilizando-se uma motosserra, padronizando-se a altura das plantas a 1,5 m (Figura 2).



**FIGURA 2.** Imagem da motosserra utilizada na poda dos cafeeiros (A); Demonstração das plantas de cafeeiros podadas (B).

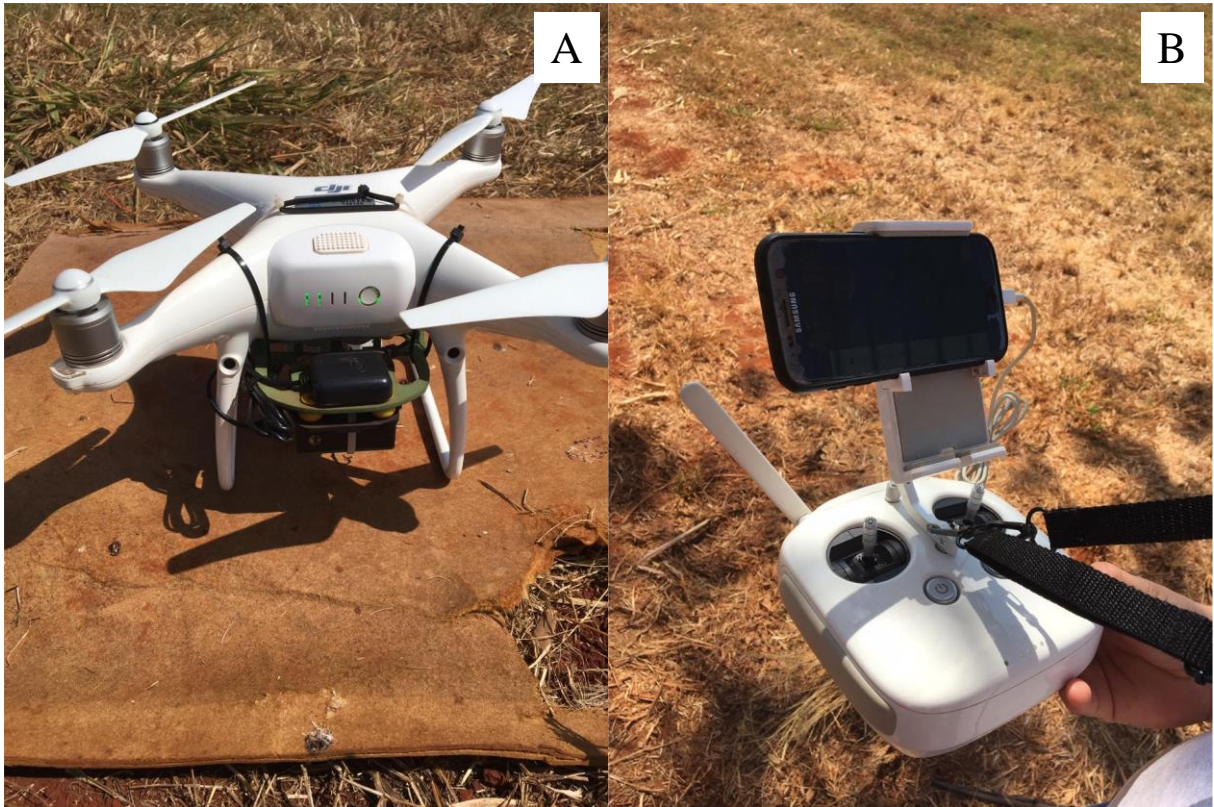
Os pontos de coleta foram adquiridos por meio de receptores GNSS Promark 200 utilizando o método por posicionamento relativo estático rápido (Figura 3). O objetivo foi adquirir as coordenadas geográficas dos pontos de coleta dos parâmetros agronômicos, a fim de servir como apoio para o processamento das imagens multiespectrais. Posteriormente foi realizado o pós-processamento por meio da rede brasileira de monitoramento contínuo dos sistemas GNSS (RBMC), a fim de se obter a maior precisão do ponto coletado, com erro na casa dos milímetros.



**FIGURA 3.** Imagens representativas da coleta de pontos pelo método relativo estático (A); aparelho GNSS Promark 200 (B).

Os aerolevantamentos foram planejados no *software* DroneDeploy com um GSD (Ground Sample Distance) de 3 cm, à uma distância de 100 m em relação ao nível do solo. A aeronave utilizada foi o Drone Phantom 4 Advanced com uma câmera *Mapir Survey 3* embarcada, operando nas regiões do vermelho ( $B_{650nm}$ ), verde ( $B_{560nm}$ ) e infravermelho próximo ( $B_{880nm}$ ) do espectro eletromagnético (Figura 4). Os voos foram realizados nos dias 20/09/2019, 01/11/2019, 13/02/2020, 20/04/2020, 24/06/2020 e 01/09/2020 entre 12h e 13h.





**FIGURA 4.** Imagens representativas da aeronave remotamente pilotada (ARP) Drone Phantom 4 Advanced com uma câmara *Mapir Survey 3* embarcada (A); controlador de voo pelo *software* DroneDeploy (B).

As avaliações de crescimento foram realizadas em 228 pontos amostrais referentes às plantas de cafeeiros, sendo seis plantas úteis de cada parcela das 38 unidades experimentais. As avaliações foram realizadas nas mesmas datas dos voos, sendo mensuradas as seguintes características:

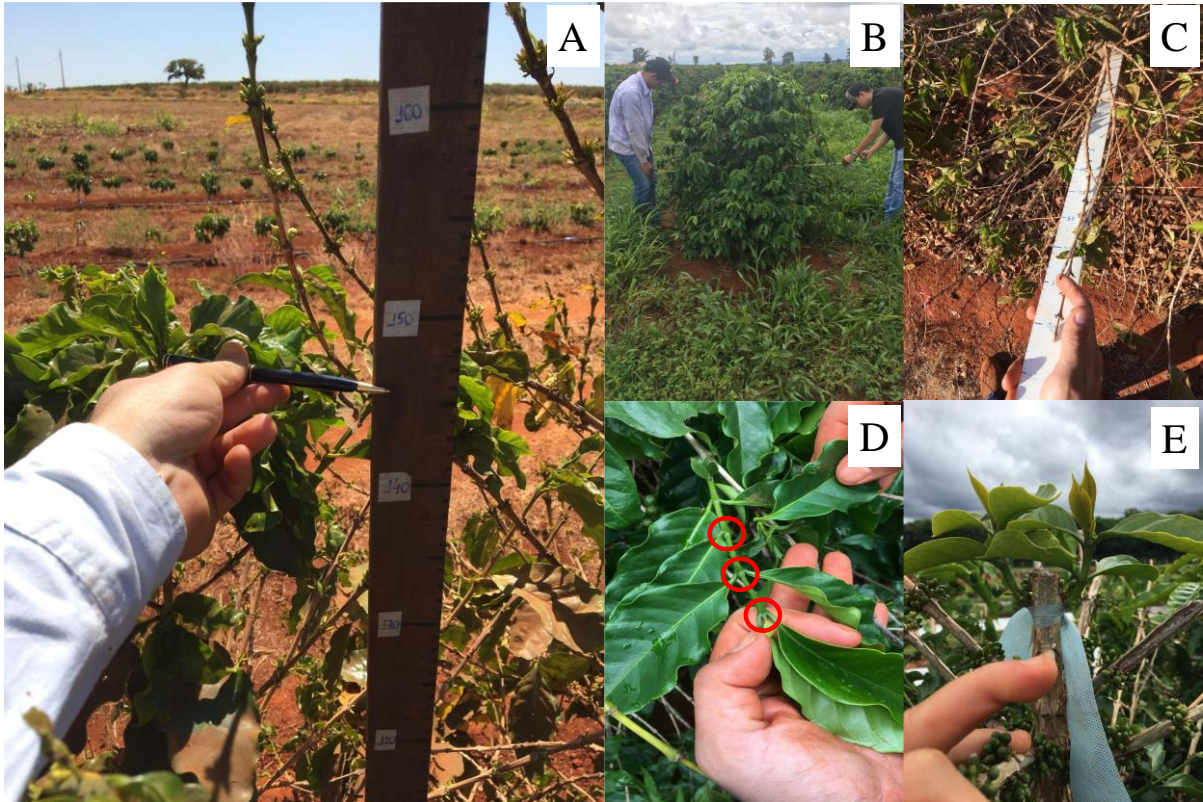
a) Altura de planta: obtida por meio da medida do colo até o ponto de inserção da gema terminal com auxílio de uma régua, em centímetros (Figura 5A).

b) Diâmetro de copa: mensurado com uma régua, tomando-se como padrão de medida os dois ramos no sentido das entrelinhas que apresentavam o maior comprimento, em centímetros (Figura 5B).

c) Número de nós por ramo plagiotrópico: obtido mediante a contagem de nós em um ramo plagiotrópico localizado no terço mediano da planta, nos dois lados da projeção da copa (Figura 5C).

d) Comprimento de ramos plagiotrópicos: determinado pela medição de um ramo plagiotrópico localizado no terço médio da planta, desde a inserção do mesmo no ramo ortotrópico até a extremidade do ramo plagiotrópico, com o auxílio de uma régua, em centímetros (Figura 5D).

e) Número de ramos plagiotrópicos: obtido mediante a contagem de ramos produtivos a partir do ponto de poda (Figura 5E).

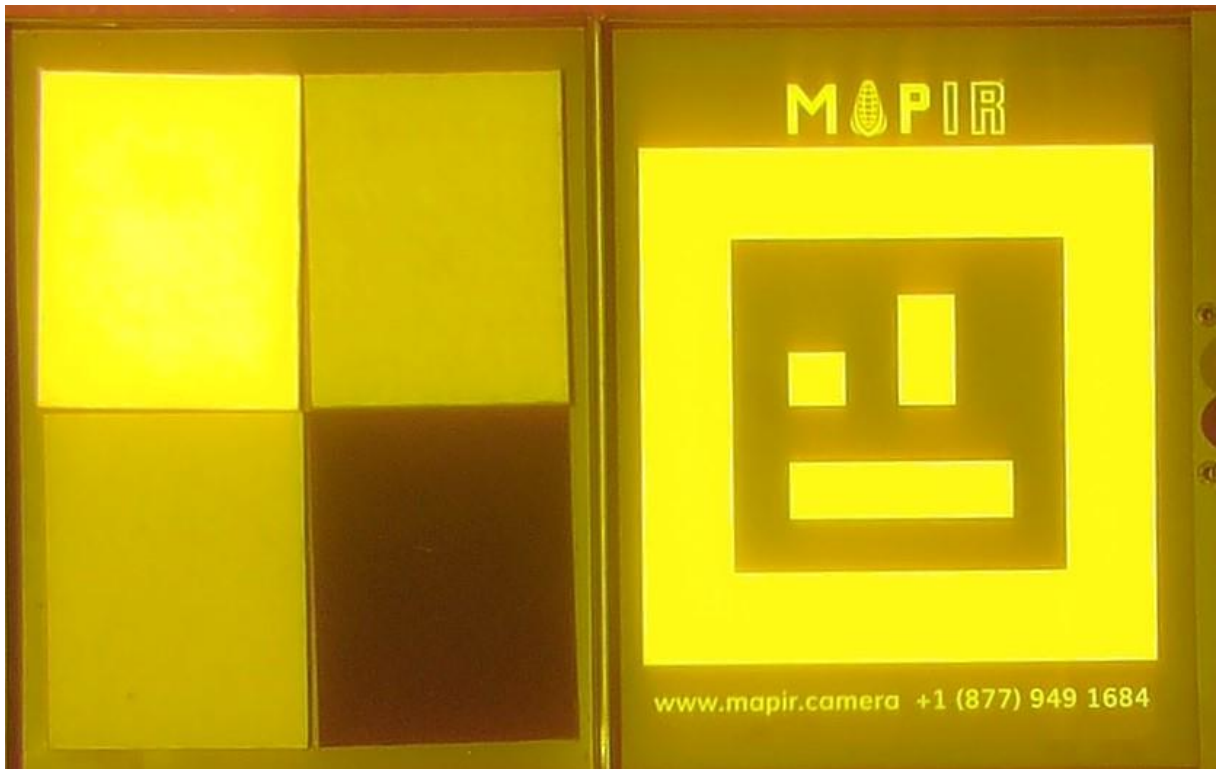


**FIGURA 5.** Imagens demonstrativas das coletas das variáveis de crescimento altura (A); diâmetro de copa (B); comprimento de ramos plagiotrópicos (C); número de nós (D) e número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda (E).

### **Confecção dos mosaicos, calibração radiométrica e georreferenciamento**

Após a aquisição das imagens utilizou-se o *software* Agisoft PhotoScan Professional 1.4.5 para a confecção da ortofoto, consistindo na união das cenas em comum de várias imagens em uma única feição.

A calibração radiométrica dos mosaicos foi realizada por meio do *software* Mapir Camera Control inserindo a imagem do alvo de calibração do sensor Mapir Survey 3 (Figura 6) identificando assim os diferentes padrões espectrais da imagem. Com isso, as imagens que antes eram representadas por pixels de número digital (ND), foram transformadas em imagens com pixels contendo a radiância aparente possibilitando a caracterização espectral de objetos.



**FIGURA 6.** Imagem ilustrativa do alvo de calibração do sensor *Mapir survey 3*.

O georreferenciamento dos mosaicos foi realizado com o auxílio do *software* QGIS 3.2, mediante os pontos coletados em campo após o pós-processamento pela RBMC, a fim de aumentar a precisão.

### **Normalização e registro de imagens**

Por se tratar de uma análise temporal, para normalização de imagens, os mosaicos foram exportados para o *software* ENVI e por meio da ferramenta *Region of interesting (ROI Tool)*, extraídos os valores médios referentes às bandas  $B_{650nm}$ ,  $B_{560nm}$  e  $B_{980nm}$  na escala de cinza. Para tanto, foi criada uma *shapefile* que continha polígonos vetorizados sobre as amostras georreferenciadas. Esses polígonos contém os valores radiométricos dos *pixels* que estão dentro da região de interesse, isto é, na área de recobrimento de cada polígono. Com isso, o *software* calcula e apresenta a média desses valores para cada polígono por meio da ferramenta *ROI Statistics*. O mosaico de referência utilizado foi o do dia 01/11/2019, normalizando todos os outros em função deste a partir das Equações 1.

$$T_i = \left( \frac{B_{ri} - D_{ri}}{B_{si} - D_{si}} \right) \times x_i + \left( \frac{D_{ri} \times B_{si} - D_{si} \times B_{ri}}{B_{si} - D_{si}} \right) \quad (1)$$

Onde:  $T_i$  é o número digital da imagem retificada;  $x_i$  é o número digital da imagem original;  $B_{ri}$  é a média do conjunto de referência clara;  $D_{ri}$  é a média do conjunto de referência escura;  $B_{si}$  é a média do conjunto claro a ser retificado;  $D_{si}$  é a média do conjunto escuro a ser retificado.

Posteriormente foi realizada uma análise de correlação, por meio do Coeficiente de Pearson, entre as bandas  $B_{650nm}$ ,  $B_{560nm}$  e  $B_{880nm}$  dos mosaicos normalizados e os parâmetros agrônômicos avaliados no experimento. A partir das bandas que melhor se correlacionaram com os parâmetros, ou seja,  $P$  valor  $< 0,05$ , foram escolhidos aqueles que iriam compor os modelos de predição, por meio de regressões simples, considerada uma técnica paramétrica de estimativa de variáveis contínuas.

Os modelos foram gerados a partir da regressão entre 183 amostras, sendo que 45 delas foram excluídas para posterior validação dos modelos de regressão, totalizando os 228 pontos de coleta. Os modelos de regressão paramétrica simples foram escolhidos para a criação dos modelos de estimativa dos parâmetros agrônômicos. Dentre as equações geradas, optou-se por aquelas que melhor se ajustavam aos dados. Neste sentido, a fim de determinar a acurácia dos modelos de estimativa foi realizado o cálculo da Raiz do Erro Médio Quadrático – RMSE (equações 2 e 3). Para tal, 45 amostras dentre as 228 foram excluídas aleatoriamente, que serviram como pontos de validação (*checkpoints*) das regressões geradas, a fim de determinar a acurácia dos modelos para predição dos parâmetros agrônômicos.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_o - X_e)^2}{n}} \quad (2)$$

$$RMSE (\%) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_o - X_e)^2}{n}} \times \frac{100 \times n}{\sum_{i=1}^n X_e} \quad (3)$$

Onde: RMSE é a raiz do erro médio quadrático; RMSE (%) é a raiz do erro médio quadrático em porcentagem;  $X_o$  representa os valores dos parâmetros agrônômicos observados *in situ*;  $X_e$  representa os valores dos parâmetros agrônômicos estimados;  $n$  é o número de amostras.

As ortofotos que apresentaram correlação significativa entre as bandas e os parâmetros agronômicos foram exportadas para o *software* ENVI onde realizou-se o registro de imagens em função de seis pontos em comum entre as imagens, considerando um RMSE < 0,05.

As equações de regressão geradas a partir das correlações significativas entre as bandas e os parâmetros agronômicos foram exportadas para o *software* ENVI. Por meio da ferramenta *BandMath* foram gerados os mapas temáticos em função das regressões que apresentaram o menor RMSE, ou seja, aquelas que melhor abrangeram os dados e estimaram a variável com maior precisão.

As taxas de crescimento foram desenvolvidas por meio da exportação das imagens para o *software* ENVI e na ferramenta *Band math* inseriu-se a Equações 4 e 5. A fim de se obter a taxa de crescimento pela quantidade de meses, subtraiu-se a equação de regressão da imagem de maior pela de menor valor de desenvolvimento, posteriormente dividindo este valor pela quantidade de meses entre as avaliações daquele parâmetro em questão.

$$Tx = \frac{(B1 - B2)}{n} \quad (4)$$

$$Tx = \left[ \frac{(B1 - B2)}{n} \right] \times 100 \quad (5)$$

Onde:  $Tx$  é a taxa de crescimento;  $B1$  é a equação de regressão da imagem de maior desenvolvimento;  $B2$  é a equação de regressão da imagem de menor desenvolvimento;  $n$  é o número de meses entre as avaliações;  $100$  é a taxa de conversão de  $m$  para  $cm$ .

Após a detecção dos índices que apresentaram correlações significativas segundo o Coeficiente de Pearson, foram escolhidos aqueles com o menor valor de quadrado médio do resíduo (RMSE), ou seja, aquele modelo que apresentou maior precisão para estimativa dos parâmetros agronômicos após a poda, sendo posteriormente gerados os gráficos e os mapas temáticos para cada parâmetro agronômico avaliado a partir dos 228 pontos amostrais referentes às plantas úteis da área experimental.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Modelos de predição

Os resultados de correlação entre as bandas e os parâmetros agrônômicos avaliados por meio do coeficiente de correlação de Pearson estão apresentados na Tabela 1.

**TABELA 1.** Correlação entre as bandas e os parâmetros agrônômicos: A = Altura; D C = Diâmetro de copa; C P = Comprimento de ramos plagiotrópicos; N° N = Número de nós; N° P = Número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda.

Data do voo	Bandas	Coeficiente/P valor	A	D C	C P	N° N	N° P
13/09/2019	B <sub>650nm</sub>	Correlação de Pearson	0,093	0,068	0,053	0,061	-
		P valor	0,163	0,304	0,429	0,357	-
	B <sub>560nm</sub>	Correlação de Pearson	0,023	-0,003	-0,027	-0,008	-
		P valor	0,729	0,967	0,686	0,905	-
	B <sub>880nm</sub>	Correlação de Pearson	0,062	0,062	0,053	-0,002	-
		P valor	0,355	0,350	0,422	0,979	-
01/11/2019	B <sub>650nm</sub>	Correlação de Pearson	0,118	0,118	0,031	-0,027	-
		P valor	0,075	0,074	0,639	0,688	-
	B <sub>560nm</sub>	Correlação de Pearson	0,013	0,076	-0,012	-0,070	-
		P valor	0,843	0,251	0,861	0,292	-
	B <sub>880nm</sub>	Correlação de Pearson	-0,025	0,009	0,024	0,067	-
		P valor	0,703	0,138	0,715	0,312	-
13/02/2020	B <sub>650nm</sub>	Correlação de Pearson	<b>0,293</b>	<b>0,371</b>	-0,045	<b>0,137</b>	0,123
		P valor	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,495	<b>0,039</b>	0,063
	B <sub>560nm</sub>	Correlação de Pearson	0,044	<b>0,150</b>	-0,069	-0,032	-0,008
		P valor	0,511	<b>0,023</b>	0,303	0,632	0,905
	B <sub>880nm</sub>	Correlação de Pearson	<b>0,407</b>	<b>0,389</b>	-0,025	<b>0,173</b>	0,118
		P valor	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,713	<b>0,009</b>	0,075
20/04/2020	B <sub>650nm</sub>	Correlação de Pearson	<b>0,433</b>	<b>0,470</b>	<b>0,213</b>	0,110	<b>0,275</b>
		P valor	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,001</b>	0,098	<b>0,000</b>
	B <sub>560nm</sub>	Correlação de Pearson	<b>0,249</b>	<b>0,376</b>	<b>0,143</b>	0,057	0,067
		P valor	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,031</b>	0,391	0,314
	B <sub>880nm</sub>	Correlação de Pearson	<b>-0,392</b>	<b>-0,395</b>	-0,119	-0,040	<b>-0,258</b>
		P valor	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,072	0,548	<b>0,000</b>
24/06/2020	B <sub>650nm</sub>	Correlação de Pearson	<b>0,254</b>	<b>0,295</b>	<b>0,134</b>	0,102	0,026
		P valor	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,043</b>	0,124	0,696
	B <sub>560nm</sub>	Correlação de Pearson	<b>0,141</b>	<b>0,248</b>	0,110	0,095	-0,064
		P valor	<b>0,033</b>	<b>0,000</b>	0,096	0,151	0,332
	B <sub>880nm</sub>	Correlação de Pearson	<b>0,375</b>	<b>0,338</b>	<b>0,218</b>	<b>0,169</b>	<b>0,188</b>
		P valor	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,001</b>	<b>0,011</b>	<b>0,004</b>
01/09/2020	B <sub>650nm</sub>	Correlação de Pearson	<b>0,137</b>	0,112	-0,010	-0,007	<b>0,139</b>
		P valor	<b>0,038</b>	0,092	0,881	0,919	<b>0,036</b>
	B <sub>560nm</sub>	Correlação de Pearson	<b>0,225</b>	<b>0,188</b>	0,048	-0,002	<b>0,173</b>
		P valor	<b>0,001</b>	<b>0,004</b>	0,472	0,976	<b>0,009</b>
	B <sub>880nm</sub>	Correlação de Pearson	<b>0,225</b>	<b>0,154</b>	0,073	0,021	<b>0,213</b>
		P valor	<b>0,001</b>	<b>0,020</b>	0,275	0,756	<b>0,001</b>

Em negrito estão as correlações significativas pelo coeficiente de Pearson e P valor ( $\leq 0,05$ ) de significância.

Por meio dos dados de correlação obtidos pelo coeficiente de Pearson apresentados na Tabela 1 foi possível observar que os voos referentes aos meses de setembro e novembro de 2019 não apresentaram correlação significativa entre as bandas e os parâmetros agrônômicos.

O voo do mês de fevereiro apresentou correlação significativa entre as bandas espectrais e os parâmetros agrônômicos. Para a região do vermelho, os coeficientes de Correlação de Pearson (CP) foram de 0,293 (P valor = 0,000); 0,371 (P valor = 0,000); 0,137 (P valor = 0,039) para altura, diâmetro de copa e número de nós, respectivamente. Já na região do verde, o coeficiente de correlação para a variável diâmetro de copa foi de 0,150 (P valor = 0,023). No infravermelho próximo, os coeficientes de correlação para altura, diâmetro de copa e número de nós, foram, respectivamente, 0,407 (P valor = 0,000), 0,389 (P valor = 0,000) e 0,173 (P valor = 0,009).

No voo do mês de abril, para a região do vermelho, os coeficientes de Correlação de Pearson (CP) foram de 0,433 (P valor = 0,000); 0,470 (P valor = 0,000), 0,213 (P valor = 0,001) e 0,275 (P valor = 0,000) para altura, diâmetro de copa, comprimento de ramos plagiotrópicos e número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda, respectivamente. Já na região do verde, os coeficientes de correlação para as variáveis altura, diâmetro de copa e comprimento de ramos plagiotrópicos foram, respectivamente, 0,249 (P valor = 0,000); 0,376 (P valor = 0,000) e 0,143 (P valor = 0,031). No infravermelho próximo, os coeficientes de correlação para altura, diâmetro de copa e número de ramos a partir do ponto de poda foram, respectivamente, -0,392 (P valor = 0,000); -0,395 (P valor = 0,000) e -0,258 (P valor = 0,000).

Para o voo do mês de junho, os coeficientes de Correlação de Pearson na região do vermelho foram de 0,254 (P valor = 0,000), 0,295 (P valor = 0,000) e 0,134 (P valor = 0,043) para altura, diâmetro de copa e comprimento de ramos plagiotrópicos, respectivamente. Já na região do verde, o coeficiente de correlação para a variável altura e diâmetro de copa foram, respectivamente, 0,141 (P valor = 0,033) e 0,248 (P valor = 0,000). No infravermelho próximo, os coeficientes de correlação para altura, diâmetro de copa, comprimento de ramos plagiotrópicos, número de nós e número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda foram, respectivamente, 0,375 (P valor = 0,000); 0,338 (P valor = 0,000); 0,218 (P valor = 0,001); 0,169 (P valor = 0,011) e 0,188 (P valor = 0,004).

No voo do mês de setembro, na região do vermelho, os coeficientes de Correlação de Pearson para as variáveis altura e número de ramos plagiotrópicos foram, respectivamente,

0,137 (P valor = 0,038) e 0,139 (P valor = 0,036). Já na região do verde, os coeficientes de correlação para altura, diâmetro de copa e número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda foram, respectivamente, 0,225 (P valor = 0,001); 0,188 (P valor = 0,004) e 0,173 (P valor = 0,009). No infravermelho próximo, os coeficientes de correlação para altura, diâmetro de copa e número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda foram, respectivamente, 0,225 (P valor = 0,001); 0,154 (P valor = 0,020) e 0,213 (P valor = 0,001).

Na Tabela 2 são apresentados os modelos de regressão paramétricos simples gerados a partir das correlações significativas.

**TABELA 2.** Regressões lineares e RMSE das correlações significativas.

Parâmetro agrônômico	Data de voo	Banda	Equação de regressão	Coefficiente de Pearson	RMSE	RMSE (%)
Altura	13/02/2020	B <sub>650 nm</sub>	=1,5421+(0,001586*B1)	0,293	0,154	8,45
		<b>B<sub>880 nm</sub></b>	<b>=0,898+(0,003713*B3)</b>	<b>0,407</b>	<b>0,149</b>	<b>8,15</b>
		B <sub>650 nm</sub>	=1,079+(0,00369*B1)	0,433	0,160	8,34
	20/04/2020	B <sub>560 nm</sub>	=1,587+(0,001769*B2)	0,249	0,167	8,73
		<b>B<sub>880 nm</sub></b>	<b>=2,4304-(0,002924*B3)</b>	<b>-0,392</b>	<b>0,156</b>	<b>8,13</b>
		B <sub>650 nm</sub>	=1,433+(0,002658*B1)	0,254	0,209	10,33
	24/06/2020	B <sub>560 nm</sub>	=1,776+(0,001041*B2)	0,141	0,207	10,21
		<b>B<sub>880 nm</sub></b>	<b>=0,868+(0,004713*B3)</b>	<b>0,375</b>	<b>0,203</b>	<b>10,02</b>
		B <sub>650 nm</sub>	=1,838+(0,001636*B1)	0,137	0,263	12,74
	01/09/2020	<b>B<sub>560 nm</sub></b>	<b>=1,693+(0,002186*B2)</b>	<b>0,225</b>	<b>0,256</b>	<b>12,43</b>
		B <sub>880 nm</sub>	=1,418+(0,002683*B3)	0,225	0,257	12,47
		<b>B<sub>650 nm</sub></b>	<b>=1,2538+(0,00325*B1)</b>	<b>0,371</b>	<b>0,215</b>	<b>11,69</b>
Diâmetro de copa	13/02/2020	B <sub>560 nm</sub>	=1,59+(0,001287*B2)	0,150	0,227	12,32
		B <sub>880 nm</sub>	=0,418+(0,005586*B3)	0,389	0,220	11,96
		<b>B<sub>650 nm</sub></b>	<b>=0,814+(0,004471*B1)</b>	<b>0,470</b>	<b>0,195</b>	<b>10,64</b>
	20/04/2020	B <sub>560 nm</sub>	=1,267+(0,002974*B2)	0,376	0,198	10,80
		B <sub>880 nm</sub>	=2,392-(0,003194*B3)	-0,395	0,196	10,69
		B <sub>650 nm</sub>	=1,086+(0,003974*B1)	0,295	0,262	13,61
	24/06/2020	<b>B<sub>560 nm</sub></b>	<b>=1,336+(0,002835*B2)</b>	<b>0,248</b>	<b>0,252</b>	<b>13,11</b>
		B <sub>880 nm</sub>	=0,646+(0,00534*B3)	0,338	0,257	13,39
		B <sub>560 nm</sub>	=1,529+(0,002509*B2)	0,188	0,277	14,54
	01/09/2020	<b>B<sub>880 nm</sub></b>	<b>=1,462+(0,002031*B3)</b>	<b>0,154</b>	<b>0,270</b>	<b>14,19</b>
		<b>B<sub>650 nm</sub></b>	<b>=1,257+(0,00339*B1)</b>	<b>0,213</b>	<b>0,357</b>	<b>17,78</b>
		B <sub>560 nm</sub>	=1,604+(0,00223*B2)	0,143	0,365	18,16
Comprimento de ramos plagiotrópicos	24/06/2020	B <sub>650 nm</sub>	=1,67+(0,00177*B1)	0,134	0,442	21,92
		<b>B<sub>880 nm</sub></b>	<b>=1,067+(0,00409*B3)</b>	<b>0,218</b>	<b>0,434</b>	<b>21,56</b>
		B <sub>650 nm</sub>	=64,15+(0,0502*B1)	0,137	14,99	20,77
Número de nós	13/02/2020	<b>B<sub>880 nm</sub></b>	<b>=43,9+(0,117*B3)</b>	<b>0,173</b>	<b>14,81</b>	<b>20,52</b>
		<b>B<sub>880 nm</sub></b>	<b>=47,9+(0,1466*B3)</b>	<b>0,169</b>	<b>17,67</b>	<b>22,93</b>
		B <sub>650 nm</sub>	=-3,58+(0,1393*B1)	0,275	9,422	33,68
Número de plagiotrópicos a partir do ponto de poda	20/04/2020	<b>B<sub>880 nm</sub></b>	<b>=49,05-(0,1198*B3)</b>	<b>-0,258</b>	<b>9,402</b>	<b>33,61</b>
		<b>B<sub>880 nm</sub></b>	<b>=9+(0,1294*B3)</b>	<b>0,188</b>	<b>12,32</b>	<b>30,43</b>
	24/06/2020	B <sub>650 nm</sub>	=35,18+(0,0602*B1)	0,139	14,83	38,11
		B <sub>560 nm</sub>	=30,22+(0,0783*B2)	0,173	14,72	37,82
	01/09/2020	<b>B<sub>880 nm</sub></b>	<b>=16,1+(0,1139*B3)</b>	<b>0,213</b>	<b>14,40</b>	<b>37,01</b>
		B <sub>650 nm</sub>	=1,5421+(0,001586*B1)	0,293	0,154	8,45

Em negrito estão as regressões que apresentaram valor de p (<0,05) e menor RMSE (%).



Os voos referentes aos meses de fevereiro, abril, junho e setembro apresentaram correlação com vários parâmetros agrônômicos. A partir disto foram gerados os modelos de regressão para a estimativa da característica vegetativa em questão. Para o parâmetro altura nos meses de fevereiro, abril e junho, a banda que apresentou o modelo mais preciso, ou seja, menor RMSE foi a B<sub>880nm</sub>, sendo 8,15; 8,13 e 10,02% respectivamente e no mês de setembro a B<sub>560nm</sub> apresentou o modelo mais preciso (RMSE = 12,43%). O modelo escolhido para geração do modelo de estimativa foi o que apresentou o menor RMSE (8,13%) dentro todos os gerados, sendo o mês de abril e a B<sub>880nm</sub>.

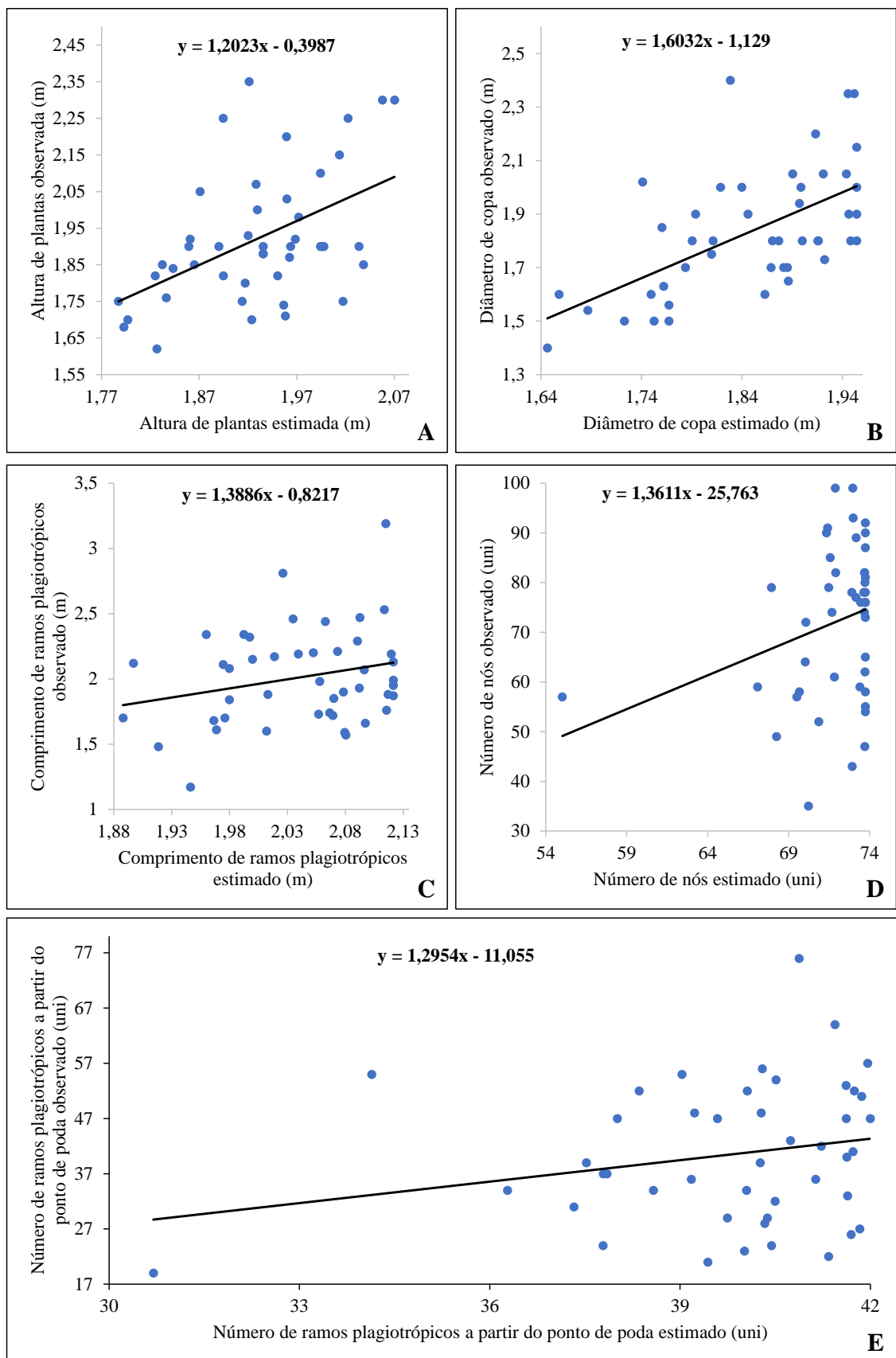
Os modelos mais precisos gerados para o parâmetro diâmetro de copa nos meses de fevereiro e abril foram em relação a B<sub>650nm</sub>, apresentando RMSE de 11,69 e 10,64% respectivamente (Tabela 1). No mês de junho o modelo mais preciso foi com a B<sub>560nm</sub> (RMSE = 13,11%) e no mês de setembro com a B<sub>880nm</sub> (RMSE = 14,19%). Assim, o modelo mais preciso para estimar a variável diâmetro de copa foi em relação ao voo do mês de abril e a B<sub>650nm</sub>, com uma acurácia de 89,36%.

Para comprimento de ramos plagiotrópicos o modelo mais preciso gerado para o mês de abril foi com a B<sub>650nm</sub> (RMSE = 17,78%) e no mês de junho o modelo gerado com a B<sub>880nm</sub> apresentou RMSE de 21,56%. Portanto o modelo escolhido para estimativa da variável em questão foi em relação ao mês de abril com uma acurácia de 82,22%.

Os modelos de regressão gerados para os meses de fevereiro e junho em relação ao número de nós foram mais precisos com a B<sub>880nm</sub>, apresentando RMSE = 20,52 e 22,93% respectivamente. Desta forma, o modelo escolhido para estimar a variável em questão foi em relação ao voo do mês de fevereiro, com uma acurácia de 79,48%.

O parâmetro número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda apresentou os modelos mais precisos com a B<sub>880nm</sub> nos meses de abril, junho e setembro (RMSE = 33,61, 30,43 e 37,01%, respectivamente), sendo o modelo escolhido relativo ao do voo de junho, apresentado acurácia de 69,57%.

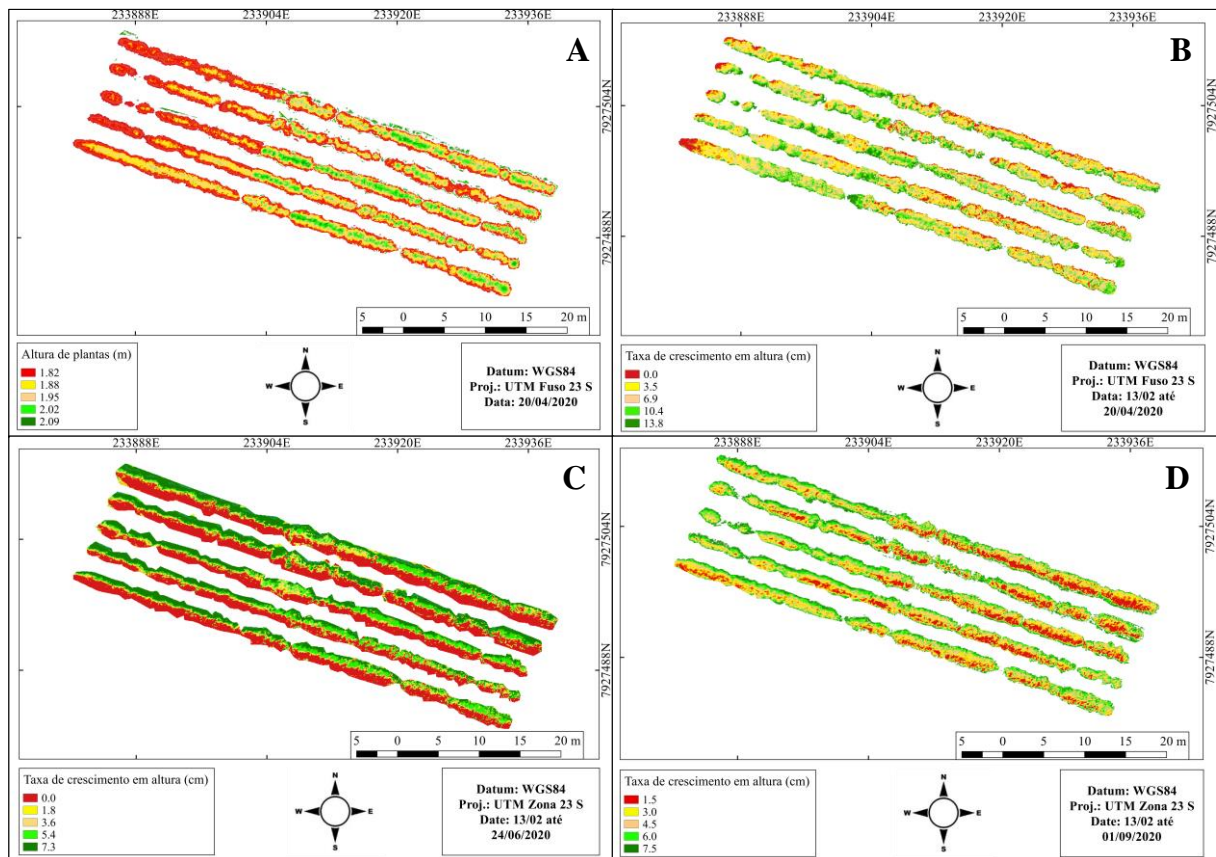
Na Figura 7 são apresentados os gráficos referentes às regressões que apresentaram o menor valor de RMSE em relação aos parâmetros agrônômicos altura, diâmetro de copa, comprimento de ramos plagiotrópicos, número de nós e número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda e os voos dos meses de fevereiro, abril, junho e setembro de 2020.



**FIGURA 7.** Equações de regressão entre altura (m) e a  $B_{880nm}$  do voo de Abril (A); diâmetro de copa (m) e a  $B_{650nm}$  do voo de Abril (B); comprimento de ramos plagiotrópicos (m) e a  $B_{650nm}$  do voo de Abril (C), número de nós (uni) e a  $B_{880nm}$  do voo de Fevereiro (D) e número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda (uni) e a  $B_{880nm}$  do voo de Junho (E).

## Representação gráfica gerada a partir dos modelos de regressão

Na Figura 8 são apresentados os mapas temáticos criados por meio do modelo de regressão para altura de plantas, desenvolvido no voo do mês de abril e a  $B_{880nm}$  (Figura 8A) e as taxas de crescimento entre os meses de fevereiro e abril (Figura 8B), junho (Figura 8C) e setembro (Figura 8D).



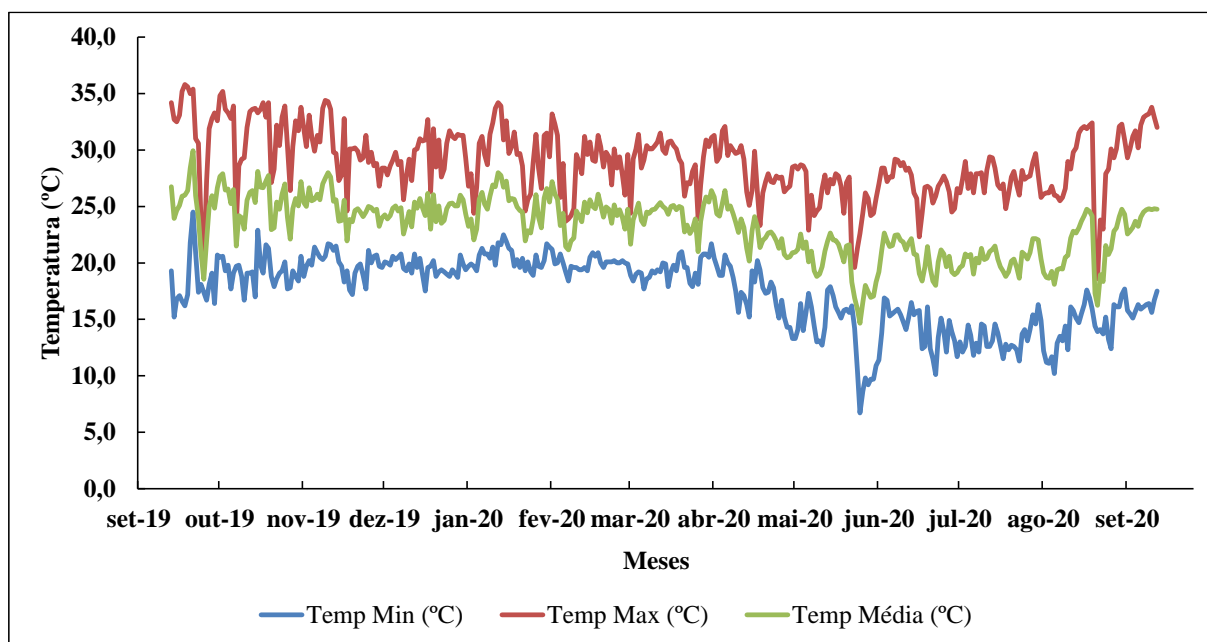
**FIGURA 8.** Mapa de crescimento de altura de plantas (m) e o voo de abril (A); taxa de crescimento (cm) do voo de fevereiro em relação aos voos de abril (B); junho (C) e setembro de 2020 (D).

A altura de plantas aumentou gradativamente no decorrer dos meses. O menor RMSE (8,13%) foi obtido no mês de abril e na  $B_{880nm}$  (Tabela 2), sendo o modelo mais preciso para estimar este parâmetro agrônômico (Figura 7A), apresentando 91,87% de precisão. Observou-se um crescimento médio de 6,9; 3,6 e 4,5 cm por mês, entre os meses de fevereiro em relação a abril (Figura 8B), junho (Figura 8C) e setembro (Figura 8D), respectivamente. Conforme ilustra a Figura 8C referente à taxa de crescimento entre os meses de fevereiro a junho, os valores de crescimento em altura na maioria do experimento foram nulos, comportamento que

está relacionado com as baixas temperaturas que ocorreram no período entre maio (19°C) e junho (15°C) (Figura 8).

Para o melhor desenvolvimento vegetativo das plantas de cafeeiros as temperaturas adequadas devem estar entre 24 a 28 °C, visto que temperaturas baixas promovem a redução do metabolismo das plantas, uma vez que a fotossíntese foliar é resultado de processos complexos envolvendo diversos órgãos como, a condução estomática e utilização da energia fotoquímica, portanto uma vez o metabolismo reduzido esses processos são afetados negativamente (PELOSO et al., 2011). Resultados semelhantes foram encontrados por Partelli et al. (2010), os quais verificaram redução na taxa de crescimento dos ramos plagiotrópicos do cafeeiro em temperaturas inferiores a 17°C. Amaral et al. (2006) também verificaram em lavoura cafeeira que as taxas de crescimento de ramos e da área foliar de todos os tratamentos diminuíram em meados de março, atingindo os menores valores em maio e junho em função das baixas temperaturas observadas nesse período.

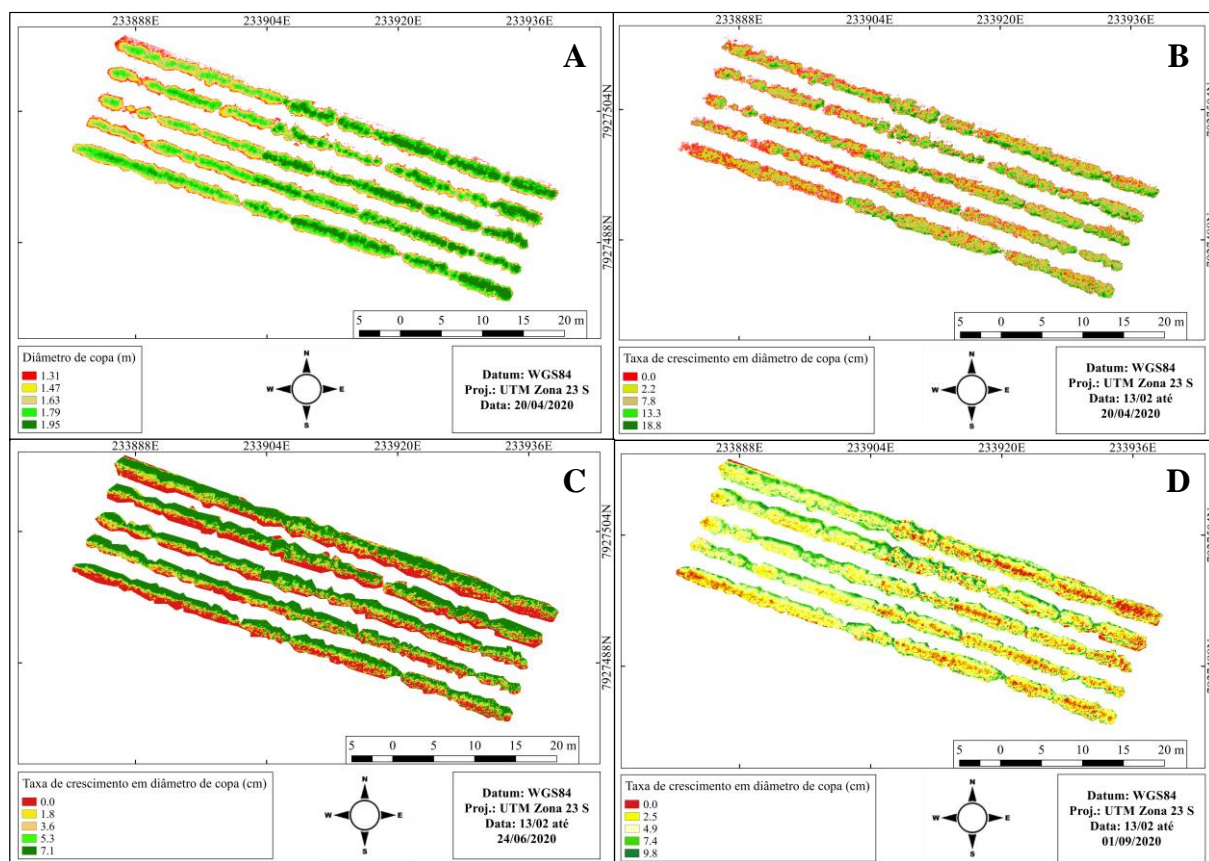
Na Figura 9 são apresentados os valores de temperatura mínima, média e máxima (°C), referente ao período de condução do experimento.



**FIGURA 9.** Dados de temperatura para região de Monte Carmelo (MG) no período de condução do trabalho. Fonte: Sismet Cooxupé.

Na Figura 10 são apresentados os mapas temáticos criados por meio do modelo de regressão para a variável diâmetro de copa, desenvolvido no voo do mês de abril e a B<sub>650nm</sub>

(Figura 7B) e as taxas de crescimento entre os meses de fevereiro em relação a abril (Figura 10B), junho (Figura 10C) e setembro (Figura 10D).



**FIGURA 10.** Mapa de crescimento de diâmetro de copa (m) e o voo de abril (A); taxa de crescimento (cm) do voo de fevereiro em relação aos voos de abril (B); junho (C) e setembro de 2020 (D).

O parâmetro agrônômico diâmetro de copa aumentou gradativamente no decorrer dos meses. O modelo que apresentou o menor RMSE (10,64%) foi no mês de abril e a B<sub>650nm</sub> (Tabela 2), sendo o mais preciso para estimar esta variável após a poda (Figura 7B). Posteriormente, construiu-se o mapa temático com uma precisão de 89,26% (Figura 10A). Em relação às taxas de crescimento entre os meses de fevereiro em relação a abril (Figura 10B), junho (Figura 10C) e setembro (Figura 10D) observa-se crescimento médio de 7,8; 3,6 e 4,9 cm por mês, respectivamente. Devido às baixas temperaturas no período entre maio (19°C) e junho (15°C) (Figura 9) observa-se que a taxa de crescimento entre os meses de fevereiro e junho (Figura 10C) foram nulas na maioria do experimento.

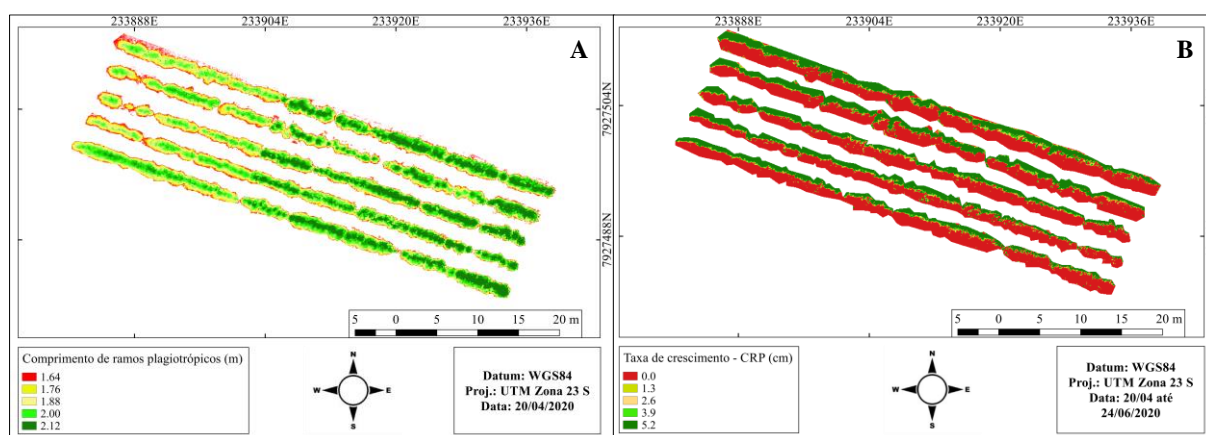
Dubberstein et al. (2017) afirmam que a periodicidade sazonal ao longo do ciclo dos cafeeiros afeta o desenvolvimento vegetativo, apresentando oscilações entre acréscimo e estagnação da taxa de crescimento. As principais intempéries que influenciam nesta

sazonalidade de desenvolvimento são as variações climáticas, sendo causadas por temperaturas baixas ou elevadas, bem como excesso de chuvas ou estiagem.

No mês de junho observa-se um maior desenvolvimento de comprimento de ramos plagiotrópicos na face norte das plantas de cafeeiros. Comportamento que possivelmente está associado à maior exposição desta face à radiação solar durante a maior parte do dia, favorecendo assim o maior desenvolvimento vegetativo dos ramos produtivos.

Diversos fatores influenciam o desenvolvimento vegetativo das plantas, como tratos culturais, aplicação de insumos como produtos fitossanitários e adubos minerais. Tratando-se de cafeeiros que é uma cultura perene, os cafeeiros se desenvolvem de acordo com as condições edafoclimáticas em que são submetidos. Custódio et al. (2010) afirmam que diversas interferências determinam o desenvolvimento das plantas de cafeeiros, como interceptação e balanço de radiação, temperatura, umidade e regime de molhamento na copa da planta. Neste sentido, o sistema de manejo utilizado, como a direção do plantio do cafeeiro, e a exposição da projeção da copa à radiação solar, podem influenciar de forma direta na intensidade de doenças da parte aérea, bem como no crescimento vegetativo em função do diâmetro de copa, comprimento ramos plagiotrópicos e número de nós.

Na Figura 11 são apresentados os mapas temáticos criados por meio do modelo de regressão para o comprimento de ramos plagiotrópicos, desenvolvido no voo do mês de abril e a B<sub>650nm</sub> (Figura 7C) e a taxa de crescimento entre os meses de abril e junho (Figura 11B).



**FIGURA 11.** Mapa de crescimento do comprimento de ramos plagiotrópicos (m) e o voo de abril (A); taxa de crescimento de comprimento de ramos plagiotrópicos (CRP) em (cm) do voo de abril em relação ao voo de junho (B).

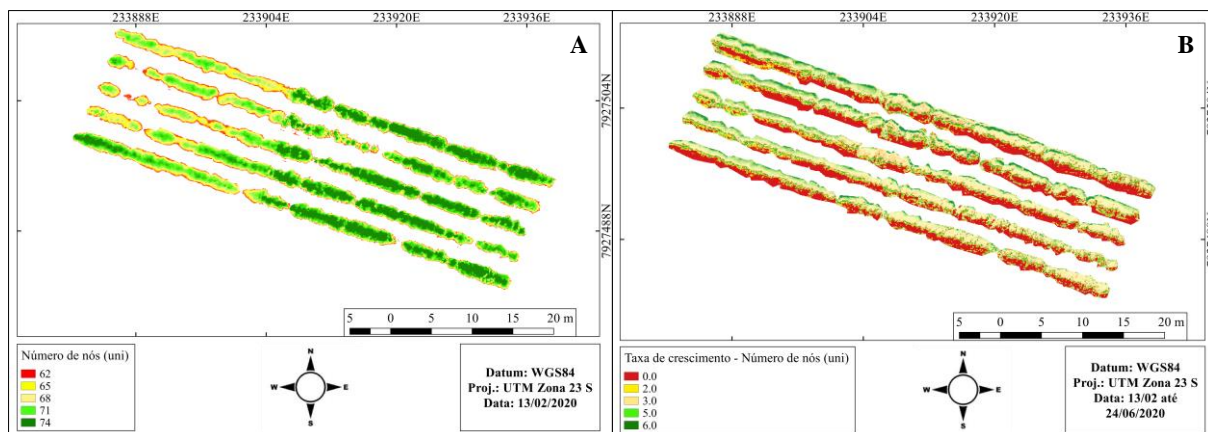
O comprimento de ramos plagiotrópicos, assim como os parâmetros agrônômicos apresentados anteriormente, aumentou gradativamente ao longo dos meses. O modelo mais preciso para estimar esse parâmetro após a poda foi novamente o voo referente ao mês de

abril (Figura 7C). A correlação significativa com a  $B_{650nm}$  gerou o modelo com menor RMSE (17,78%) (Tabela 2), capaz de estimar a variável com uma precisão de 82,22% (Figura 11A). A taxa de crescimento entre os meses de abril e junho (Figura 11B) apresentou em média 2,6 cm por mês, sendo nulo na maior parte do experimento devido às baixas temperaturas observadas nos meses de maio (19°C) e junho (15°C) (Figura 9), semelhante ao comportamento observado anteriormente em relação à taxa de crescimento do diâmetro de copa no mesmo período.

A produtividade das culturas está diretamente relacionada ao desenvolvimento fitotécnico, vigor vegetativo e acúmulo de biomassa das plantas. Neste sentido, muitos estudos são desenvolvidos com o objetivo de estimar a produtividade das culturas, onde infere-se que quanto mais vigorosa é a planta, maior será o seu acúmulo de biomassa e, portanto, maior será a produtividade. Normalmente, os índices de vegetação são utilizados para estimar a cobertura vegetal do solo, fitomassa e atividade fotossintética (FORMAGGIO; SANCHES, 2017).

O monitoramento de parâmetros como o índice de área foliar (IAF) nas culturas agrícolas tem sido uma estratégia para identificação de adversidades nas lavouras. A relação entre a resposta espectral da vegetação e as bandas adquiridas por meio dos sensores acoplados as ARPs, fornecem informações em relação ao estado fitossanitário das plantas. O trabalho de Resende et al. (2020) demonstra o potencial de modelos radiométricos para estimativa do IAF, obtidos a partir de modelos de regressão linear compostos pelas bandas que melhor correlacionaram com os parâmetros medidos. Os resultados obtidos demonstraram a eficiência e maior precisão na estimativa do IAF para o modelo radiométrico composto pela banda do infravermelho próximo na câmera MAPIR 3.

Na Figura 12 são apresentados os mapas temáticos criados por meio do modelo de regressão para a variável número de nós, desenvolvido no voo do mês de fevereiro e a  $B_{880nm}$  (Figura 7D) e a taxa de crescimento entre os meses de fevereiro e junho (Figura 12B).



**FIGURA 12.** Mapa de crescimento do número de nós (uni) e o voo de fevereiro (A); taxa de crescimento (uni) do voo de fevereiro em relação ao voo de junho (B).

O número de nós aumentou gradativamente ao longo dos meses. O modelo que apresentou o menor RMSE (20,52%) (Figura 7D), foi o mês de fevereiro e a B<sub>880nm</sub> (Tabela 2), capaz de estimar a variável com uma precisão de 79,48% (Figura 12A), após o manejo de poda. A taxa de crescimento de fevereiro em relação ao mês de junho demonstrou desenvolvimento médio de 3 nós por mês (Figura 12A), sendo nulo na maior parte do experimento devido as baixas temperaturas no período de maio a junho (Figura 9).

A taxa de crescimento do voo de junho demonstra um maior desenvolvimento de número de nós na face norte do experimento. Assim como demonstrado anteriormente esse comportamento provavelmente ocorre devido a maior exposição dessa face à radiação solar ao longo do dia.

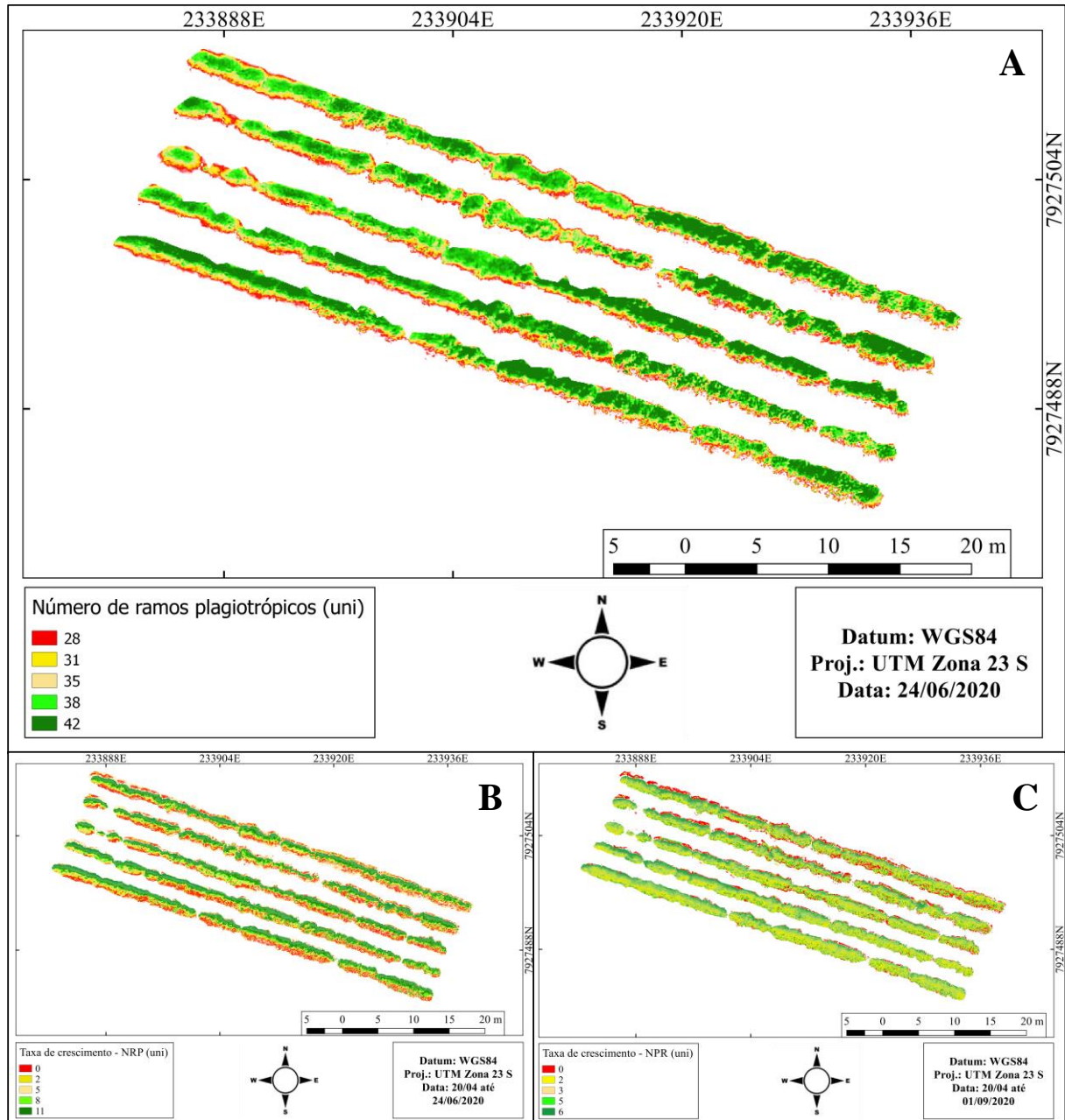
Os produtos obtidos por meio das imagens multiespectrais, sejam adquiridos por satélite ou ARPs, apresentam padrões característicos de cada vegetação. Os estádios de desenvolvimento vegetativo, tais como fases fenológicas da cultura em estudo, vigor vegetativo das plantas, espaçamento, estado nutricional e sanitário, estresses bióticos e abióticos alteram a resposta espectral gerando um produto (imagens multiespectrais) com padrões de resposta entre as bandas e a variável em estudo (HATFIELD; PRUEGER, 2010).

No trabalho de Almeida et al. (2017) foi possível estimar a produtividade de uma lavoura cafeeira a partir de modelagem agrometeorológica e dados espectrais em NDVI do sensor MODIS, gerando dados com elevada acurácia com valor de  $r^2$  variando entre 0,79 e 0,95, o que enfatiza o potencial dessa ferramenta na cafeicultura.

Na Figura 13 são apresentados os mapas temáticos criados por meio do modelo de regressão para a variável número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda,



desenvolvido no voo referente ao mês de junho e a  $B_{880nm}$  (Figura 7E) e a taxa de crescimento de abril em relação a junho (Figura 13B) e setembro (Figura 13C).



**FIGURA 13.** Mapa de crescimento do número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda (uni) e o voo de junho (A); taxa de crescimento (uni) do voo de abril em relação ao voo de junho (B) e setembro (C).

O número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda é uma resposta da planta a esse tipo de manejo. O decote é caracterizado pela remoção do terço superior das plantas, por meio desse estímulo a planta emite novas gemas apicais, que por sua vez, produzirão novos ramos produtivos ou plagiotrópicos (MATIELLO et al., 2010).

Neste sentido o número de ramos plagiotrópicos apresentou correlação significativa com as bandas (Tabela 1), a partir do voo de abril, sendo que o modelo que apresentou o menor RMSE (30,43%) (Tabela 2) foi referente ao mês de junho e a  $B_{880nm}$  (Figura 7E). Portanto, o modelo estima a variável com uma precisão de 69,57% (Figura 13A). A taxa de crescimento referente ao mês de junho (Figura 13B) e setembro (Figura 13C) apresentou em média 5 e 3 ramos plagiotrópicos por mês, sendo que devido as baixas temperaturas nos meses de maio (19°C) e junho (15°C) (Figura 9), o mês de junho apresentou desenvolvimento nulo na maioria do experimento.

Portanto, o presente trabalho demonstra o potencial do uso de imagens multiespectrais para estimativa do desenvolvimento fitotécnico de cafeeiros após o manejo de poda, assim como na definição do período mais propício para realizar o monitoramento da lavoura, servindo de base para futuros estudos relacionados a estes parâmetros.

## CONCLUSÕES

O uso de imagens multiespectrais possibilita o monitoramento de parâmetros fitotécnicos de cafeeiros após a poda do tipo decote, sendo possível determinar o mês mais propício para estimar determinada variável.

Por meio das correlações significativas por meio do coeficiente de Pearson entre os parâmetros agronômicos avaliados nos voos dos meses de fevereiro, abril, junho e setembro de 2020 e as bandas espectrais do vermelho, verde e infravermelho próximo, foi possível, por meio dos modelos gerados, estimar os parâmetros após o manejo de podas do tipo decote com elevada acurácia, sendo altura por meio do voo de abril e a banda do infravermelho próximo, com 91,87% de precisão, diâmetro de copa e comprimento de ramos plagiotrópicos por meio do voo de abril e a banda do vermelho, com precisão de 89,36% e 82,22% respectivamente, número de nós por meio do voo de fevereiro e a banda do infravermelho próximo, com 79,48% de precisão e número de ramos plagiotrópicos a partir do ponto de poda por meio do voo de junho e a banda do infravermelho próximo, com 69,57% de precisão.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, T. S.; SEDIYAMA G. C.; ALENCAR, L. P. Estimativa da produtividade de cafeeiros irrigados pelo método zona agroecológica espectral. **Revista Engenharia na Agricultura**. Viçosa, MG, v. 25, n. 1. p. 1-11, mar 2017. DOI:

<https://doi.org/10.13083/reveng.v25i1.727>. Disponível em:  
<https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/654>. Acesso em: 12 set. 2020.

AMARAL, J. A. T.; RENA, A. B.; AMARAL, J. F. T. 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, mar. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000300002>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-204X2006000300002&script=sci\\_abstract&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-204X2006000300002&script=sci_abstract&tlng=pt). Acesso em: 23 out. 2020.

ASSIS, G. A.; SILVA, L. R. S.; MARTINS, W. E. R.; CARVALHO, F. J.; PIRES, P. S. Crescimento e produtividade de cafeeiros na região do Alto Paranaíba em função do tipo de poda de desbrota. **Revista Ciência Agrícola**, Rio Largo, v. 16, n. 2, p. 9-12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.28998/rca.v16i2.4467>. Disponível em: <https://www.seer.ufal.br/index.php/revistacienciaagricola/article/view/4467/4383>. Acesso em: 15 ago. 2020.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Registro Nacional de Cultivares - RNC**. Brasília, DF: MAPA, 2020. Disponível em: [http://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares\\_registradas.php](http://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php). Acesso em: 31 jul. 2020.

CUSTÓDIO A. A. P.; POZZA E. A.; CUSTÓDIO A. A. P.; SOUZA P. E.; LIMA L. A.; LIMA L. M. Intensidade da ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro quanto à face de exposição das plantas. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 3, p. 214-228, dez. 2010. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/5415>. Acesso em: 26 dez 2020.

DUBBERSTEIN, D.; PARTELLI, F. L.; DIAS, J. R. M.; ESPINDULA, M. C. Influência da adubação no crescimento vegetativo de cafeeiros na Amazônia Sul Ocidental. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 197-206, jul. 2017. DOI: <https://doi.org/10.25186/cs.v12i2.1228>. Disponível em: <http://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1228>. Acesso em: 01 set. 2020.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

FURLANETTO, R. H.; NANNI, M. R.; CRUSIOL, L. G. T.; SILVA, G. F. C.; OLIVEIRA JUNIOR, A. Potencial de utilização de sensores multiespectral e hiperespectral no estudo de diferentes alvos agrícolas. *In: Jornada Acadêmica da Embrapa Soja*, 7. 2017, Londrina, **Anais [...]** Londrina: Embrapa Soja, 2017. p. 146- 154. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1072792/potencial-de-utilizacao-de-sensores-multiespectral-e-hiperespectral-no-estudo-de-diferentes-alvos-agricolas>. Acesso em: 21 nov. 2020.

HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Value of using different vegetative indices to quantify agricultural crop characteristics at different growth stages under varying management practices. **Remote Sensing**, v. 2, n. 2, p. 562–578, Fev. 2010. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs2020562>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/2/2/562>. Acesso em: 3 out. 2020.

MACHADO, C. M. S.; PIMENTEL, N. S.; GOLYNSK, A.; FERREIRA, A.; VIEIRA, H. D.; PARTELLI, F. L. Genetic diversity among 16 genotypes of *Coffea arabica* in the Brazilian cerrado. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 3, p. 1-13, Set. 2017. DOI:

<http://dx.doi.org/10.4238/gmr16039794>. Disponível em:

<http://www.funpecrp.com.br/gmr/year2017/vol16-3/pdf/gmr-16-03-gmr.16039794.pdf>.

Acesso em: 25 set. 2020.

MANTOVANI, E. C.; MIRANDA, R. A.; LANDAU, R. A.; PASSOS, A. M. A. A agricultura de precisão no contexto do sistema de produção: lucratividade e sustentabilidade. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1124732/agricultura-de-precisao-no-contexto-do-sistema-de-producao-lucratividade-e-sustentabilidade>. Acesso em: 25 nov. 2020.

MARIN, B. D.; ALVES, M. C.; POZZA, E. A.; GANDIA, R. M.; CORTEZ, M. L.; MATTIOLI, M. C. Sensoriamento remoto multiespectral na identificação e mapeamento das variáveis bióticas e abióticas do cafeeiro. **Revista Ceres**, Viçosa. v. 66. n. 2. p. 142-153, abr 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737x201966020009>. Disponível em:

[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-737X2019000200142](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-737X2019000200142).

Acesso em: 11 ago. 2020.

MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A.W. R.; ALMEIDA, S.R.; FERNANDES, D. R. **Cultura de café no Brasil: manual de recomendações**. 1. ed. Varginha: Fundação Procafé, 2010. cap. 5. p 351-379.

PELOSO, A. F.; TATAGIBA, S. D.; REIS, E. F.; PEZZOPANE, J. E. M.; AMARAL, F. F. T. Limitações fotossintéticas em folhas de cafeeiro promovidas pelo déficit hídrico. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 389 – 399, set 2017. DOI:

<https://doi.org/10.25186/cs.v12i3.1314>. Disponível em:

<http://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1314>. Acesso em: 13 nov. 2020.

PARTELLI, F. L.; VIEIRA, H. D.; SILVA, M. G.; RAMALHO, J. C. Crescimento vegetativo sazonal em ramos de diferentes idades do cafeeiro conilon. **Semina: Ciências Agrárias**.

Londrina. v. 31. n. 3. p. 619-626, set. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2010v31n3p619>. Disponível em:

<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/2016>. Acesso em: 25 nov 2020.

RESENDE, D. B.; ABREU-JÚNIOR, C. A. M.; MARTINS, G. D.; MARQUES, O. J.; XAVIER, L. C. M. Uso de imagens tomadas por aeronaves remotamente pilotadas para detecção da cultura do milho infestada por *Spodoptera frugiperda*. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 01, p. 156-166, mar. 2020. DOI:

<https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.1.p156-166>. Disponível em:

<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/242326>. Acesso em: 28 nov. 2020.