

JORGE TADEU FIM ROSAS

**MONITORAMENTO DA MATURAÇÃO DO CAFÉ USANDO IMAGENS AÉREAS
MULTIESPECTRAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto

Coorientadores: Daniel Marçal de Queiroz
Flora Maria de Melo Villar

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

R789m
2020 Rosas, Jorge Tadeu Fim, 1992-
Monitoramento da maturação do café usando imagens
aéreas multiespectrais / Jorge Tadeu Fim Rosas. – Viçosa, MG,
2020.
78f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Sensoriamento remoto. 2. Câmeras fotográficas -
Calibração. 3. Cafeicultores. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22 ed. 621.3678

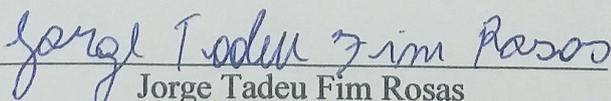
JORGE TADEU FIM ROSAS

**MONITORAMENTO DA MATUREÇÃO DO CAFÉ USANDO IMAGENS AÉREAS
MULTIESPECTRAIS**

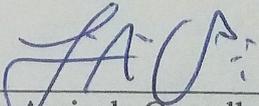
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 10 de fevereiro de 2020.

Assentimento:



Jorge Tadeu Fim Rosas
Autor



Francisco de Assis de Carvalho Pinto
Orientador

Aos meus pais Maria Aparecida Fim Rosas e José Tadeu Gonçalves Rosas, pelo
exemplo de vida, incentivo, amor e confiança...

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me conceder o dom da vida, por todas as bênçãos alcançadas e ser o refúgio nas horas mais difíceis.

À Universidade Federal de Viçosa e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de formação e apoio para realização das pesquisas.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa cedida. À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e a FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pela concessão de bolsa e financiamento das pesquisas.

Ao Professor Dr. Francisco de Assis de Carvalho Pinto, pela amizade, orientação, ensinamentos, dedicação, paciência, “puxões de orelha” construtivos e, principalmente, por me incentivar a buscar fazer sempre o melhor, contribuindo para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos Coorientadores, Dr. Daniel Marçal de Queiroz e a Dr^a. Flora Maria de Melo Villar, pelos conselhos, orientações, conhecimentos compartilhados, e principalmente por não medirem esforços quando precisei de ajuda.

Aos membros examinadores da banca, Dr. Daniel Marçal de Queiroz e Dr. Elder Sanzio Aguiar Cerqueira, por aceitarem o convite em participar, e pelos conhecimentos compartilhados para o enriquecimento deste trabalho.

Aos meus pais, José Tadeu Gonçalves Rosas e Maria Aparecida Fim Rosas, pela paciência, carinho, apoio, confiança e conselhos, e mesmo tendo que conviver com a distância estão sempre presentes e vibrando em cada uma das minhas conquistas, sem vocês não estaria aqui, serei eternamente grato.

A meus irmãos Guilherme, Luana e Pedrinho, pela amizade, carinho, preocupação, apoio em minhas decisões e principalmente por estarem sempre ao meu lado nos momentos mais difíceis me incentivando a não desistir.

A minha namorada Luciana, pelo carinho, apoio, amizade preocupação e incentivo. Obrigado por me entender em momentos de estresse e me tranquilizar com frase “Vai dar tudo certo”. Obrigado por compartilha comigo esse momento de grande importância na minha vida.

Ao professor Samuel de Assis Silva, que se dispôs a me orientar na iniciação científica no período de graduação e no decorrer dessa orientação se tornou um grande amigo. Obrigado pelos ensinamentos, pelos conselhos e principalmente pela confiança.

Aos colegas do laboratório de mecanização agrícola (LMA) Rodrigo, Lucas, Samira, Guilherme, Fernando, Amélia, Emanuel, Marcelo, Juliano, André e Jeferson pela amizade, companheirismo, trocas de conhecimentos, ajuda nas coletas de campo, e discussões sadias que me fizeram crescer profissionalmente e pessoalmente.

Aos amigos da república “Mim ataca”, Edilson, Kaique e Rodrigo; pelo companheirismo, compreensão, momentos compartilhados e amizade. Vocês tornaram os dias em Viçosa menos difíceis. Obrigado pela disponibilidade em ajudar sempre que precisei. Obrigado pelos conhecimentos compartilhados, principalmente nas análises estatísticas, e pelas críticas construtivas. Agradeço por ter tido a amizade de vocês desde a graduação até hoje, e espero de verdade que essa amizade continue sempre.

A todos os demais professores e funcionários, que contribuíram para esta conquista, em especial o professor Domingos e professor Marconi, por estarem sempre solícitos quando precisei.

Ao senhor Édson “Alemão”, por ceder a área em que realizei meu experimento e dispor de informações sobre suas lavouras.

Enfim, a todos vocês e aos demais amigos, os quais por um lapso de memória não foram citados neste pequeno texto, meu muito obrigado!

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que
ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”
(Arthur Schopenhauer)

BIOGRAFIA

JORGE TADEU FIM ROSAS, filho de Maria Aparecida Fim Rosas e José Tadeu Gonçalves Rosas, nasceu em Castelo, Espírito Santo, no dia 28 de outubro de 1992. Em janeiro de 2018, concluiu o curso de Bacharel em Agronomia Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Campus de Alegre. Em março de 2018, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2020.

RESUMO

ROSAS, Jorge Tadeu Fim, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Monitoramento da maturação do café usando imagens aéreas multiespectrais.** Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Coorientadores: Daniel Marçal de Queiroz e Flora Maria de Melo Villar.

A preocupação dos produtores de café na atualidade não se limita apenas a produtividade das lavouras, pois fatores que visam agregar valor ao produto final também estão sendo levados em consideração dentro do sistema de produção da cultura. O café é um dos poucos produtos agrícolas que tem seu valor acrescido significativamente com a melhoria da qualidade dos frutos. Dentre os diversos fatores que afetam a qualidade do café o estágio de maturação dos frutos tem sido o mais importante, dessa forma, a colheita dos frutos completamente maduros é essencial para se obter cafés com qualidade superior. Por tanto, em sistemas em que se visa a produção de cafés especiais, monitorar a maturação dos frutos de café nas plantas se torna indispensável. Atualmente, metodologias para o monitoramento da maturação dos frutos de café no campo ainda são escassas. O monitoramento da maturação é feito de forma destrutiva com colheitas de algumas plantas no talhão, que, muitas vezes não é representativo. Uma alternativa seria o uso de sensores remotos a bordo de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs). As ARPs têm ganhado destaque nos últimos anos, pois, permitem a aquisição de imagens com elevada resolução espacial e resolução temporal ajustável as necessidades do usuário. No entanto, para a aquisição de informações espectrais confiáveis, questões como a calibração radiométrica das imagens devem ser tratadas com muita atenção. O método de calibração mais usado para imagens obtidas por ARPs é o método da linha empírica, este método usa alvos de reflectância conhecidas para ajustar modelos de calibração e assim transformar o número digital da imagem em reflectância. Contudo, um dos empasses para este método é o elevado custo dos alvos de reflectância comerciais. Neste caso, a alternativa seria a construção de alvos a partir de materiais alternativos. Dessa forma, esse trabalho teve como objetivos: (1) avaliar o uso de materiais de baixo custo e de fácil acesso para calibração de imagens multiespectrais obtidas por sensores acoplados a ARPs visando monitorar pequenas lavouras de café na região da Zona da Mata Mineira; (2) avaliar o potencial de um sensor multiespectral de baixo custo, montado em uma ARP, para monitorar o processo de maturação dos frutos de cafeeiro, em lavouras cultivadas na região montanhosa da Zona da Mata Mineira. Para atender o primeiro objetivo foram testados quatro diferentes materiais alternativos para a confecção dos alvos: madeira compensada pintados com tinta fosca; napa sintética cujo material base de construção é Polyvinyl chloride (PVC); Ethylene Vinyl Acetate (EVA) e painéis de lona de PVC. Foi

determinada a vida útil de cada um dos materiais, assim como, o erro associado à calibração radiométrica. Em seguida, mapas de índices de vegetação de um talhão cultivado com café foram gerados com a finalidade de avaliar a diferença gerada pelo uso dos quatro materiais na confecção dos painéis de calibração. Os painéis feitos de madeira pintados com tinta fosca e os de madeira revestidos com napa, foram os que apresentaram menores erros no processo de calibração radiométrica, já os painéis de madeira revestido com lona de PVC foram os que resultaram em erros mais elevados de calibração. Os painéis construídos com EVA apresentaram baixa resistência ao uso, visto que sua vida útil foi inferior aos demais, já a madeira pintada foi o material mais resistente sendo assim o mais indicado para uso na calibração radiométrica de imagens multiespectrais. Já para atender o segundo objetivo, um experimento foi montado e cinco talhões distintos cultivados em café arábica foram avaliados. Durante o período de maturação do café quatro voos foram realizados para adquirir informações espectrais do dossel da cultura. Neste trabalho a câmera multiespectral Mapir Survey3W foi usada para adquirir imagens multiespectrais. Após a aquisição das imagens oito índices de vegetação foram calculados. A análise de componentes principais foi utilizada para inferir sobre a importância dos índices para monitorar a maturação do café. As imagens multiespectrais obtidas pelo sensor de baixo custo foram capazes de registrar as mudanças espectrais ocorridas nas plantas de café com o avanço da maturação na maioria dos talhões estudados, no entanto, observou-se que a produtividade e o volume de copa das plantas de café influenciaram no monitoramento da maturação do café.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. Câmeras fotográficas. Cafeicultores.

ABSTRACT

ROSAS, Jorge Tadeu Fim, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, february, 2020. **Monitoring of coffee maturation using multispectral aerial images.** Adviser: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Co-advisers: Daniel Marçal de Queiroz and Flora Maria de Melo Villar.

The concern of coffee producers today is not just limited to the productivity of crops since factors that aim to add value to the final product are also being taken into account within the production system. Coffee is one of the few agricultural products that has its value-added significantly by improving the quality of the fruits. Among several factors that affect coffee quality, the stage of fruit maturation has been the most important. Therefore, the harvesting of fully ripe fruits is essential to obtaining superior quality coffee. Thus, in production systems where the production of specialty coffees is aimed, monitoring the maturation of coffee fruits is essential. Currently, methodologies for monitoring the maturation of coffee fruits in the field are still scarce. The monitoring of fruit maturation is done in a destructive way with harvests of some plants in the field, which is often not representative. An alternative would be the use of remote sensors coupled on remotely piloted aircraft (RPAs). RPAs have gained great prominence in recent years, as they allow the acquisition of images with high spatio-temporal resolution adjustable to the user's needs. However, for the acquisition of reliable spectral information, issues such as radiometric calibration of images must be dealt with care. The most used calibration method for images obtained by RPAs is the empirical line method. This method uses known reflectance panels to adjust calibration models and, thus transforming the digital number of the image into reflectance. However, one of the drawbacks of this method is the high cost of commercial reflectance targets. In this case, the alternative would be to build calibration panels from alternative materials. Thus, this work was aimed at: (1) evaluating the use of low-cost and easily accessible materials for calibrating multispectral images obtained by sensors coupled on RPAs to monitor small coffee crops in the Zona da Mata Mineira region; and (2) to evaluate the potential of a low-cost multispectral sensor, coupled on a RPA to monitor the maturation process of coffee fruits, in coffee crops grown in the mountainous region of Zona da Mata Mineira. To meet the first objective, four different alternative materials were tested for making the panels: plywood painted with matte paint; synthetic Nappa whose base construction material is Polyvinyl chloride (PVC); Ethylene Vinyl Acetate (EVA) and PVC canvas panels. The evaluation consisted of determining the useful life of each material, as well as, the error associated with the radiometric calibration. Then, maps of vegetation indices from a coffee crop field were generated to evaluate the difference generated by the use of the four materials used

in the manufacture of the calibration panels. Panels made of wood painted with matte paint and those coated with Nappa showed the lowest errors in the radiometric calibrations, whereas those panels coated with PVC canvas resulted in the highest calibration errors. Panels made of EVA showed low resistance to use, since its useful life was shorter than the others, whereas the wood panel painted with matte paint was the most resistant, thus being the most suitable for using in the radiometric calibration of multispectral images. To meet the second objective, an experiment was set up and five different fields grown with arabica coffee were evaluated. During the coffee fruit maturation period, four flights were made to acquire spectral information from the crop canopy. In this study, the Mapir Survey3W multispectral camera was used to acquire the multispectral images. After the acquisition of the images, eight vegetation indexes (VI) were calculated. Then, a principal component analysis was used to infer the importance of the VI to monitor coffee fruit maturation. The multispectral images obtained by the low-cost sensor were able to register the spectral changes that occurred in the coffee plants with the advance of maturation in most of the studied fields. However, it was observed that the productivity and the canopy volume of the coffee plants influenced maturation monitoring.

Keywords: Remote sensing. Photo cameras. Coffee producers.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1	REFERÊNCIAS	18
2	ARTIGO I - SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS OBTIDAS COM O USO DE ARPs	22
	RESUMO	22
	ABSTRACT	23
2.1	INTRODUÇÃO.....	24
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	26
2.2.1	Construção dos painéis	26
2.2.2	Plataforma aérea e sensor	28
2.2.3	Modelo de calibração radiométrica	28
2.2.4	Teste de campo	30
2.2.5	Determinação da vida útil dos materiais utilizados na confecção de painéis para correção radiométrica	34
2.3	RESULTADOS	35
2.4	DISCUSSÃO	40
2.5	CONCLUSÃO.....	43
2.6	REFERÊNCIAS	44
3	ARTIGO II - MONITORAMENTO DA MATURAÇÃO DO CAFÉ EM REGIÃO DE MONTANHA USANDO CÂMERA MULTIESPECTRAL DE BAIXO CUSTO.....	49
	RESUMO	49
	ABSTRACT	49
3.1	INTRODUÇÃO.....	51
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.2.1	Área de Estudo	53
3.2.2	Plataforma Aérea Usada Para a Aquisição de Imagens.....	56
3.2.3	Avaliação da Qualidade das Imagens.....	56
3.2.4	Mosaico de Imagens e Ortoretificação.....	58

3.2.5	Correção Radiométrica das Imagens	59
3.2.6	Coleta de Dados de Maturação e Obtenção das Variáveis Espectrais.....	60
3.2.7	Análise Estatística dos Dados.....	62
3.3	RESULTADOS	62
3.4	DISCUSSÃO	69
3.5	CONCLUSÃO.....	72
3.6	REFERÊNCIAS	73
4	CONCLUSÃO GERAL	78

1 INTRODUÇÃO GERAL

Entre as maiores commodities do mundo, o café assume importantíssimo papel na agricultura brasileira, visto que, além de contribuir com a economia do país, é a principal fonte de renda de milhares de pequenos agricultores (MAGUIRE-RAJPAUL et al., 2018; REICHMAN, 2018; HAJJAR et al., 2019). No entanto, o atual cenário da atividade cafeeira leva os produtores a conviverem com custos elevados dos insumos e uma flutuação no preço do café no mercado, o que gera incerteza para os cafeicultores (TURCO et al., 2017; FROEHLICH et al., 2018). Diante deste cenário, uma grande preocupação é a permanência destes agricultores na atividade cafeeira e, para isso, medidas que tornem a cafeicultura uma atividade agrícola sustentável são necessárias (MILLARD, 2017).

Para superar as dificuldades na atividade cafeeira, muitos produtores estão investindo na produção de cafés especiais. De acordo com Simões et al. (2008) o café é um dos poucos produtos agrícolas que têm seu valor é acrescido significativamente com a melhoria da qualidade dos grãos. No entanto, Para a obtenção de cafés especiais fatores que alteram negativamente a qualidade dos grãos, devem ser mitigados. A qualidade do café pode ser influenciada por diversos fatores, dentre eles altitude, nutrição das plantas, período de exposição da lavoura a radiação solar, presença ou ausência de doenças (SIMÕES et al., 2008; PIMENTA et al., 2018). Contudo, um dos fatores que mais tem influenciado a qualidade do café é o ponto de colheita (FAGAN et al., 2011).

A colheita do café em momentos inapropriados afeta a qualidade sensorial das bebidas, bem como a uniformidade de cor dos grãos obtida após seu beneficiamento. Os frutos colhidos verdes dão origem a grãos defeituosos quando beneficiados, apresentando tonalidades escuras, o que deprecia o grão e torna a bebida amarga (APARECIDO et al., 2018). A qualidade de bebida inferior dos grãos originados de frutos colhidos ainda verdes está relacionada com os níveis insatisfatórios de compostos fenólicos acumulados (SITTIPOD et al., 2019). A sacarose acumulada nos frutos maduros, chegando a 8,5% para espécie *Coffea arabica*, é um dos componentes para as características de qualidade da bebida, e o maior acúmulo de sacarose nos grãos ocorre nos estádios finais de maturação (CASTRO; MARRACCINI, 2006). Diante disso, em sistemas cafeeiros onde objetiva-se a produção cafés especiais, monitorar o status de maturação dos frutos nas plantas se torna indispensável.

Atualmente, metodologias para o monitoramento da maturação dos frutos de café no campo ainda são escassas. O monitoramento da maturação é feito de forma destrutiva com colheita de plantas aleatórias no talhão e contagem de frutos verdes, o método é trabalhoso e

limita-se a poucas plantas, o que, muitas das vezes, não é representativo. Uma alternativa para monitorar a maturação do café é o uso do sensoriamento remoto. Segundo Laviola et al. (2009) a maturação dos frutos de café é um processo fisiológico que causa alterações no status nutricional da planta. Essas alterações podem surtir em uma mudança na assinatura espectral das plantas de café quando os frutos atingem a maturação completa. Mudanças essas, que se ocorrerem, podem ser detectadas e quantificadas fazendo uso de sensores remotos.

Alguns trabalhos científicos vêm demonstrando o potencial do uso do sensoriamento remoto na cafeicultura para diversos fins, dentre estes: trabalhos objetivando o monitoramento de doenças que ocorrem no café (MARIN et al., 2019); identificação de parâmetros biofísicos que influenciam as produções (RAMIREZ; ZULLO JÚNIOR, 2010); monitoramento do estresse hídrico em lavouras cafeeiras (CHEMURA et al., 2017); monitoramento do status de nitrogênio em plantas de café (CHEMURA et al., 2018). No entanto, uma das maiores limitações do sensoriamento remoto na cafeicultura é a baixa resolução espacial e temporal das imagens de domínio público, inviabilizando seu uso, principalmente para monitorar pequenas lavouras.

Com o surgimento das aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) as limitações quanto a resolução das imagens vem sendo superadas. As missões realizadas em baixas altitude, quando comparado a plataformas orbitais, gera imagens multiespectrais com resolução espacial menores até que 1,0 cm e resolução temporal ajustável de acordo com as necessidades do usuário (LELONG et al., 2008). Essas características estão fazendo com que os ARPs se consolidem na ciência do sensoriamento remoto e diversos estudos publicados nos últimos anos tem demonstrado isso (YU et al., 2016; LU; HE, 2017; NAVROZIDIS et al., 2018; ALBETIS et al., 2019; BATISTOTI et al., 2019; CORTI et al., 2019; HEIM et al., 2019; LIMA-CUETO et al., 2019; XAVIER et al., 2019).

No entanto, muitas dúvidas ainda devem ser respondidas para a que a comunidade usuária obtenha informações confiáveis com esta ferramenta. Um dos maiores empasses ao se trabalhar com imagens multiespectrais obtidas por ARPs é a calibração radiométrica (DEL POZO et al., 2014). Atualmente o método de calibração mais usado pela comunidade, é o método da linha empírica (DEL POZO et al., 2014; WANG; MYINT, 2015; DENG et al., 2018; IQBAL et al., 2018). O método da linha empírica parte do pressuposto que os números digitais brutos da imagem possuem uma relação linear e direta com a reflectância. Este método envolve uso de alvos de reflectância conhecida presentes na cena de estudo, e estes alvos são usados para ajustar modelos lineares para transformar os números digitais em reflectância (SECKER et al., 2001).

Os alvos que são usados como padrão de reflectância devem possuir características especiais, essas características são: devem ser homogêneos, devem possuir características semelhantes a corpos lambertianos e devem ser duráveis (MILTON et al., 2009; DENG et al., 2018). Atualmente o *spectralon* que é um fluoropolímero tem sido popularmente usado em estudos sobre características espectrais das superfícies (GEORGIEV; BUTLER, 2007; MILTON et al., 2009). Apesar da grande eficiência do *spectralon* devido a sua alta durabilidade, facilidade de limpeza e características lambertianas, seu alto custo de aquisição dificulta seu uso, principalmente em aplicações práticas no campo. Diante essa limitação dos painéis de *spectralon*, desenvolver painéis alternativos a partir de materiais de baixo custo torna-se necessário.

Alguns materiais alternativos já foram apresentados em trabalhos científicos, por exemplo, lonas constituídas em policloreto de vinil (PVC) foram utilizadas por Del Pozo et al. (2014) e por Herrero-Huerta et al. (2014), cartão Masonite pintado em escala de cinza foi usado por Wang e Myint (2015) e por Poncet et al. (2019), tecido construídos a partir de polipropileno foi usado por Deng et al. (2018) e por Guo et al. (2019). Apesar dos resultados positivos com o uso de materiais de baixo custo, alguns deles não é de fácil aquisição em diferentes escalas de cinza e, ainda, não são bem esclarecidas as questões quanto a característica espectral de uso com o passar do tempo. Essas questões trazem a necessidade de novos estudos visando testar novos materiais alternativos e inferir sobre a verdadeira eficiência destes para fins de calibração radiométrica.

Diante o exposto, acredita-se que imagens multiespectrais obtidas por ARPs podem ser usadas para monitorar a maturação do café, a fim de determinar o ponto de colheita dos frutos. Contudo, para que essas imagens sejam viáveis para uso dos cafeicultores, os custos associados ao processo de aquisição dessas, devem ser reduzidos, principalmente aqueles relacionados a calibração radiométrica. Dessa forma as hipóteses deste trabalho foram: (1) é possível monitorar a maturação dos frutos de café com imagens multiespectrais obtidas por sensores a bordo de ARPs; (2) é possível construir alvos com materiais alternativos de baixo custo para calibrar imagens multiespectrais obtidas por sensores a bordo de ARPs.

Para testar as hipóteses citadas acima, essa dissertação foi estruturada em dois artigos. O primeiro artigo teve como objetivo avaliar o uso de materiais de baixo custo e de fácil acesso para calibração de imagens multiespectrais obtidas por sensores acoplados a ARPs visando monitorar pequenas lavouras de café na região da Zona da Mata Mineira. O segundo artigo teve o objetivo de avaliar o potencial de um sensor multiespectral de baixo custo, montado em uma

plataforma aérea não tripulada, para monitorar o processo de maturação dos frutos de cafeeiro, em lavouras cultivadas na região montanhosa da Zona da Mata Mineira.

1.1 REFERÊNCIAS

- ALBETIS, J.; JACQUIN, A.; GOULARD, M.; POILVÉ, H.; ROUSSEAU, J.; CLENET, H.; DEDIEU, G.; DUTHOIT, S. On the potentiality of UAV multispectral imagery to detect Flavescence dorée and Grapevine Trunk Diseases. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1, 2019.
- APARECIDO, L. E. DE O.; ROLIM, G. DE S.; DEMORAES, J. R. DA S. C.; VALERIANO, T. T. B.; LENSE, G. H. E. Maturation periods for Coffea arabica cultivars and their implications for yield and quality in Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 10, p. 3880–3891, 2018.
- BATISTOTI, J.; MARCATO, J.; ÍTAVO, L.; MATSUBARA, E.; GOMES, E.; OLIVEIRA, B.; SOUZA, M.; SIQUEIRA, H.; FILHO, G. S.; AKIYAMA, T.; GONÇALVES, W.; LIESENBERG, V.; LI, J.; DIAS, A. Estimating pasture biomass and canopy height in Brazilian Savanna using UAV photogrammetry. **Remote Sensing**, v. 11, n. 20, p. 1–12, 2019.
- CASTRO, R. D. DE; MARRACCINI, P. Cytology , biochemistry and molecular changes during coffee fruit development. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, n. 1, p. 175–199, 2006.
- CHEMURA, A.; MUTANGA, O.; DUBE, T. Remote sensing leaf water stress in coffee (Coffea arabica) using secondary effects of water absorption and random forests. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 100, p. 317–324, 2017.
- CHEMURA, A.; MUTANGA, O.; ODINDI, J.; KUTYWAYO, D. Mapping spatial variability of foliar nitrogen in coffee (Coffea arabica L.) plantations with multispectral Sentinel-2 MSI data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 138, p. 1–11, 2018.
- CORTI, M.; CAVALLI, D.; CABASSI, G.; VIGONI, A.; DEGANO, L.; MARINO GALLINA, P. Application of a low-cost camera on a UAV to estimate maize nitrogen-related variables. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 4, p. 675–696, 2019.
- DEL POZO, S.; RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, P.; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D.; FELIPE-GARCÍA, B. Vicarious radiometric calibration of a multispectral camera on board an unmanned aerial system. **Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1918–1937, 2014.
- DENG, L.; HAO, X.; MAO, Z.; YAN, Y.; SUN, J.; ZHANG, A. A Subband Radiometric Calibration Method for UAV-Based Multispectral Remote Sensing. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 11, n. 8, p. 2869–2880, 2018.
- FAGAN, E. B.; SOUZA, C. H. E. DE; PEREIRA, N. M. B.; MACHADO, V. J. Efeito do tempo de formação do grão de café (coffea sp) na qualidade da bebida effect of time on coffe bean (coffea sp) growth in cup quality. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 5, p. 729–738, 2011.
- FROEHLICH, A. G.; MELO, A. S. S. A.; SAMPAIO, B. Comparing the Profitability of Organic and Conventional Production in Family Farming: Empirical Evidence From Brazil. **Ecological Economics**, v. 150, n. April, p. 307–314, 2018.
- GEORGIEV, G. T.; BUTLER, J. J. Long-term calibration monitoring of Spectralon diffusers BRDF in the air-ultraviolet. **Applied Optics**, v. 46, n. 32, p. 7892–7899, 2007.

GUO, Y.; SENTHILNATH, J.; WU, W.; ZHANG, X.; ZENG, Z.; HUANG, H. Radiometric calibration for multispectral camera of different imaging conditions mounted on a UAV platform. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 4, p. 1–24, 2019.

HAJJAR, R.; NEWTON, P.; ADSHEAD, D.; BOGAERTS, M.; MAGUIRE-RAJPAUL, V. A.; PINTO, L. F. G.; MCDERMOTT, C. L.; MILDER, J. C.; WOLLENBERG, E.; AGRAWAL, A. Scaling up sustainability in commodity agriculture: Transferability of governance mechanisms across the coffee and cattle sectors in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 124–132, 2019.

HEIM, R.; WRIGHT, I.; SCARTH, P.; CARNEGIE, A.; TAYLOR, D.; OLDELAND, J. Multispectral, Aerial Disease Detection for Myrtle Rust (*Austropuccinia psidii*) on a Lemon Myrtle Plantation. **Drones**, v. 3, n. 1, p. 25, 2019.

HERRERO-HUERTA, M.; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D.; RODRIGUEZ-GONZALVEZ, P.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J. Vicarious radiometric calibration of a multispectral sensor from an aerial trike applied to precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 108, p. 28–38, 2014.

IQBAL, F.; LUCIEER, A.; BARRY, K. Simplified radiometric calibration for UAS-mounted multispectral sensor. **European Journal of Remote Sensing**, v. 51, n. 1, p. 301–313, 2018.

LAVIOLA, B. G.; MARTINEZ, H. E. P.; DE SOUZA, R. B.; SALOMÃO, L. C. C.; CRUZ, C. D. Macronutrient accumulation in coffee fruits at Brazilian zona da mata conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 32, n. 6, p. 980–995, 2009.

LELONG, C. C. D.; BURGER, P.; JUBELIN, G.; ROUX, B.; LABBÉ, S.; BARET, F. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. **Sensors**, v. 8, n. 5, p. 3557–3585, 2008.

LIMA-CUETO, F. J.; BLANCO-SEPÚLVEDA, R.; GÓMEZ-MORENO, M. L.; GALACHO-JIMÉNEZ, F. B. Using vegetation indices and a UAV imaging platform to quantify the density of vegetation ground cover in olive groves (*Olea Europaea* L.) in Southern Spain. **Remote Sensing**, v. 11, n. 21, 2019.

LU, B.; HE, Y. Species classification using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) -acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 128, p. 73–85, 2017.

MAGUIRE-RAJPAUL, V. A.; RAJPAUL, V. M.; MCDERMOTT, C. L.; GUEDES PINTO, L. F. Coffee certification in Brazil: compliance with social standards and its implications for social equity. **Environment, Development and Sustainability**, 2018.

MARIN, D. B.; ALVES, M. DE C.; POZZA, E. A.; BELAN, L. L.; FREITAS, M. L. DE O. Multispectral radiometric monitoring of bacterial blight of coffee. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 5, p. 959–982, 2019.

MILLARD, E. Still brewing : Fostering sustainable coffee production. v. 8, n. November, p. 32–42, 2017.

MILTON, E. J.; SCHAEPMAN, M. E.; ANDERSON, K.; KNEUBÜHLER, M.; FOX, N. Progress in field spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. SUPPL. 1, p. S92–S109, 2009.

NAVROZIDIS, I.; ALEXANDRIDIS, T. K.; DIMITRAKOS, A.; LAGOPODI, A. L.; MOSHOU, D.; ZALIDIS, G. Identification of purple spot disease on asparagus crops across spatial and spectral scales. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 148, n. October 2017, p. 322–329, 2018.

PIMENTA, C. J.; ANGÉLICO, C. L.; CHALFOUN, S. M. Challenges in coffee quality: Cultural, chemical and microbiological aspects. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 42, n. 4, p. 337–349, 2018.

PONCET, A. M.; KNAPPENBERGER, T.; BRODBECK, C.; FOGLE, M.; SHAW, J. N.; ORTIZ, B. V. Multispectral UAS data accuracy for different radiometric calibration methods. **Remote Sensing**, v. 11, n. 16, p. 1–22, 2019.

RAMIREZ, G. M.; ZULLO JÚNIOR, J. Estimation of biophysical parameters of coffee fields based on high-resolution satellite images. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 3, p. 468–479, 2010.

REICHMAN, D. R. Big Coffee in Brazil: Historical Origins and Implications for Anthropological Political Economy. **Journal of Latin American and Caribbean Anthropology**, v. 23, n. 2, p. 241–261, 2018.

SECKER, J.; STAENZ, K.; GAUTHIER, R. P.; BUDKEWITSCH, P. Vicarious calibration of airborne hyperspectral sensors in operational environments. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 1, p. 81–92, 2001.

SIMÕES, R. D. O.; FARONI, L. R. D.; QUEIROZ, D. M. DE. Qualidade dos grãos de café (coffea arábica l.) Em coco processados por via seca. **Revista caatinga**, v. 21, n. 2, p. 139–146, 2008.

SITTIPOD, S.; SCHWARTZ, E.; PARAVISINI, L.; PETERSON, D. G. Identification of flavor modulating compounds that positively impact coffee quality. **Food Chemistry**, v. 301, n. March, 2019.

TURCO, P. H. N.; ESPERANCINI, M. S. T.; BUENO, O. DE C.; OLIVEIRA, M. D. M. Economic profitability in conventional and irrigated coffee production systems in three municipalities in the Marília region of São Paulo, Brazil. **Ciência Rural**, v. 47, n. 11, p. 1–7, 2017.

WANG, C.; MYINT, S. W. A Simplified Empirical Line Method of Radiometric Calibration for Small Unmanned Aircraft Systems-Based Remote Sensing. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 8, n. 5, p. 1876–1885, 2015.

XAVIER, T. W. F.; SOUTO, R. N. V.; STATELLA, T.; GALBIERI, R.; SANTOS, E. S.; SULI, G. S.; ZEILHOFER, P. Identification of Ramularia Leaf Blight Cotton Disease

Infection Levels by Multispectral, Multiscale UAV Imagery. **Drones**, v. 3, n. 2, p. 33, 2019.

YU, N.; LI, L.; SCHMITZ, N.; TIAN, L. F.; GREENBERG, J. A.; DIERS, B. W.

Development of methods to improve soybean yield estimation and predict plant maturity with an unmanned aerial vehicle based platform. **Remote Sensing of Environment**, v. 187, p. 91–101, 2016.

2 ARTIGO I - SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS OBTIDAS COM O USO DE ARPs

RESUMO

O desenvolvimento de sistemas compostos por aeronaves remotamente pilotadas e de câmeras multiespectrais está abrindo uma nova perspectiva para o uso do sensoriamento remoto na agricultura. Esses equipamentos apresentam baixo custo e permitem a obtenção de imagens com elevada resolução espacial e temporal. Entretanto, é necessário converter as imagens adquiridas em mapas de reflectância para as bandas em que as imagens foram geradas. Para isso é necessário realizar uma calibração radiométrica das imagens, que permite converter os números digitais presentes nas imagens em valores de reflectância. O método de calibração mais usado para imagens obtidas por ARPs é o método da linha empírica, este método usa alvos de reflectância conhecidas para ajustar modelos de calibração e assim transformar o número digital da imagem em reflectância. Contudo, um dos empasses para este método é o elevado custo dos alvos de reflectância comerciais. Neste caso, a alternativa seria a construção de alvos a partir de materiais alternativos. Dessa forma, esse trabalho teve como objetivo avaliar o uso de materiais de baixo custo e de fácil acesso para calibração de imagens multiespectrais obtidas por sensores acoplados a ARPs visando monitorar pequenas lavouras de café na região da Zona da Mata Mineira. Foram testados quatro diferentes materiais para a confecção dos painéis: madeira compensada pintados com tinta fosca; napa sintética cujo material base de construção é Polyvinyl chloride (PVC); Ethylene Vinyl Acetate (EVA) e painéis de lona de PVC. Foi determinada a vida útil de cada um dos materiais e determinado o erro associado à calibração radiométrica. Mapas de índice de vegetação de um talhão cultivado com café foram gerados com a finalidade de avaliar a diferença gerada pelo uso dos quatro materiais na confecção dos painéis de calibração. Os painéis feitos de madeira pintados com tinta fosca e os de madeira revestidos com napa, foram os que apresentaram menores erros no processo de calibração radiométrica, já os painéis de madeira revestido com lona de PVC foram os que resultaram em erros mais elevados de calibração. O material painéis de EVA apresentou baixa resistência ao uso, visto que sua vida útil foi inferior aos demais, já a madeira pintada foi o material mais resistente sendo assim o mais indicado para uso na calibração radiométrica de imagens multiespectrais.

Palavras chave: sensoriamento remoto, Método da linha empírica, índices de vegetação

ABSTRACT

The development of systems composed of unmanned aerial vehicles and multispectral cameras is opening a new perspective for the use of remote sensing in agriculture. These equipments have low cost and allow to obtain images with high spatial and temporal resolution. However, it is necessary to convert the acquired images into reflectance maps for the bands in which the images were generated. For that, it is necessary to carry out a radiometric calibration of the images, which allows to convert the digital numbers present in the images into reflectance values. The most used calibration method for images obtained by RPAs is the empirical line method. This method uses known reflectance panels to adjust calibration models and, thus transforming the digital number of the image into reflectance. However, one of the drawbacks of this method is the high cost of commercial reflectance targets. In this case, the alternative would be to build calibration panels from alternative materials. Therefore, the objective of this work was to evaluating the use of low-cost and easily accessible materials for calibrating multispectral images obtained by sensors coupled on RPAs to monitor small coffee crops in the Zona da Mata Mineira region. Four different materials were tested for making the panels: plywood painted with matte paint; synthetic nappa whose base construction material is Polyvinyl chloride (PVC); Ethylene Vinyl Acetate (EVA) and PVC canvas panels. The useful life of each material was determined and the error associated with the radiometric calibration was determined. Maps of vegetation index of a field cultivated with coffee were generated in order to evaluate the difference generated by the use of the four materials in the manufacture of the calibration panels. Panels made of wood painted with matte paint and wood panels coated with nappa were the ones that showed the least errors in the radiometric calibration process, whereas wood panels coated with PVC canvas were the ones that resulted in the highest calibration errors. The material of EVA panels showed low resistance to use, since its useful life was shorter than the others, whereas painted wood was the most resistant material, thus being the most suitable for use in radiometric calibration of multispectral images.

keywords: remote sensing, Empirical line method, vegetation indexes.

2.1 INTRODUÇÃO

Dentre os sensores utilizados no meio agrícola para fins de monitoramento, os sensores ópticos têm ganhado destaque, pois possuem particularidades que permitem análises não destrutivas que auxiliam uma rápida tomada de decisão (BOGUE, 2017). Os sensores ópticos podem ser utilizados para diversos fins agrícolas como, por exemplo, o monitoramento do status de nitrogênio nas culturas (NETTO et al., 2005; LIN et al., 2010; VILLAR et al., 2015; CORRÊDO et al., 2019; CORTI et al., 2019), o monitoramento de doenças nas plantas (MARTÍNEZ-MARTÍNEZ et al., 2018; NAVROZIDIS et al., 2018; ALBETIS et al., 2019; MARIN et al., 2019), a quantificação de biomassas acima do solo (ZHANG et al., 2016; BATISTOTI et al., 2019; LIMA-CUETO et al., 2019) e o mapeamento de atributos dos solos (FORKUOR et al., 2017; DEMATTÊ et al., 2018).

Os sensores ópticos são divididos em dois grupos sendo eles proximais e remotos. Os sensores remotos muitas das vezes se sobressaem em relação aos proximais por permitirem adquirir informações espectrais de áreas maiores de forma rápida e continuamente no espaço, além de demandarem mínimos esforços físicos do operador, pois, na maioria das vezes, estão acoplados em plataformas aéreas ou orbitais (BEN-DOR et al., 2009; MULLA, 2013; MAES; STEPPE, 2019). A ciência do sensoriamento remoto recorreu, nos últimos anos, às imagens obtidas em plataformas orbitais, e vários trabalhos científicos demonstram o potencial da ferramenta para diversos fins, inclusive, o monitoramento das culturas agrícolas (CALVÃO; PESSOA, 2015; ALI et al., 2016; GÓMEZ et al., 2016; BÉGUÉ et al., 2018). Apesar de grande potencial, o uso de imagens orbitais na agricultura ainda possui entraves, pois a baixa resolução espacial e temporal dos produtos que possuem domínio público dificulta sua utilização em lavouras cafeeiras, principalmente nas pequenas áreas produtoras localizadas em condição de montanha. Dessa forma, um talhão cultivado em café é representado por um número baixo de pixels, o que não garante o nível de detalhamento necessário para adquirir informações confiáveis destes ambientes. Ademais, outro fator que dificulta o uso de imagens orbitais na cafeicultura é a presença de nuvens por longos períodos durante o desenvolvimento dos frutos.

Nos últimos anos, o uso de sensores multiespectrais acoplados a aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) tem se mostrado promissor na aquisição de dados de sensoriamento remoto. Os ARPs surgiram com várias vantagens frente a plataformas orbitais, dentre essas as mais notáveis são a elevada resolução espacial e a flexibilidade da resolução temporal, visto que voos

podem ser realizados periodicamente, selecionando os dias adequados e não em datas fixas (LELONG et al., 2008; ZHANG; KOVACS, 2012; MAES; STEPPE, 2019). Vale destacar também a disponibilização no mercado de equipamentos de baixo custo, o que tem tornado viável a utilização de ARPs para o setor agrícola. Diversos estudos vêm demonstrando o real potencial do uso dos ARPs no sensoriamento remoto (YU et al., 2016; LU; HE, 2017; NAVROZIDIS et al., 2018; ALBETIS et al., 2019; BATISTOTI et al., 2019; CORTI et al., 2019; HEIM et al., 2019; LIMA-CUETO et al., 2019; XAVIER et al., 2019).

No entanto, muitas questões ainda devem ser respondidas para que os ARPs possam ser utilizados para monitoramento das lavouras cafeeiras em região de montanha. Por exemplo, a calibração radiométrica tem um papel primordial na geração de informações ao longo do tempo. Muitos trabalhos estão sendo realizados com objetivo de calibrar as imagens obtidas dos sensores acoplados em ARPs (HERNÁNDEZ-LÓPEZ et al., 2012; KELCEY; LUCIEER, 2012; DEL POZO et al., 2014; CRUSIOL et al., 2017; DENG et al., 2018; IQBAL et al., 2018). Segundo Dianguirard e Slater (1999), existem três métodos de calibração radiométrica: a pré-vo, à bordo e a vicária.

Na calibração pré-vo, o processo de calibração é feito em laboratório, assumindo relação linear entre os números digitais do sensor e a reflectância, e os coeficientes de calibração são ajustados e integrados aos sensores para a correção das imagens. Para determinar os coeficientes de correção é necessário fazer uso de esfera de integração. Recomenda-se que após algum tempo de uso do sensor a calibração seja refeita. Na calibração a bordo, um calibrador interno acompanha o sensor no momento da aquisição das imagens. Geralmente utiliza-se lâmpadas ou painéis difusores como padrões de reflectância e em algum determinado momento da aquisição de imagens o sensor faz leituras dos padrões para a calibração. Este método ainda depende de uma primeira calibração em laboratório para definir coeficientes de calibração, no entanto, durante a vida útil do sensor esses parâmetros serão reajustados fazendo uso do calibrador interno a bordo. A calibração vicária é feita nas condições do voo, sem nenhuma calibração em laboratório e assume-se uma relação linear entre o número digital bruto das imagens obtidas no voo com a reflectância. Neste método os padrões de calibração estão presentes na cena em estudo ao nível do solo.

Dentre os tipos de calibração, a mais utilizada para a calibração de imagens obtidas por ARPs é a calibração vicária, também denominada método da linha empírica (DEL POZO et al., 2014; DENG et al., 2018; IQBAL et al., 2018). A calibração vicária faz uso de alvos com reflectância conhecida que devem estar presentes na cena de interesse. O número digital dos pixels do alvo é utilizado para o ajuste de equações que permitirão a transformação dos valores

digitais das imagens obtidas em reflectância (SECKER et al., 2001). Para isso o material utilizado na confecção do alvo deve possuir características semelhantes a corpos lambertianos, ou seja, para todos os ângulos em que a reflectância necessita ser mensurada o material deve apresentar o mesmo valor. O material deve ser homogêneo e as dimensões do alvo devem ser muitas vezes maior do que o tamanho do pixel da imagem que se deseja corrigir. Além disso, o material deve ser durável, ou seja, suas características espectrais não devem se alterar no decorrer de sua vida útil (MILTON, 1987; WANG; MYINT, 2015; DENG et al., 2018).

O *spectralon*, que é um fluoropolímero, tem sido o material mais utilizado na confecção de alvos para calibração radiométrica (MILTON et al., 2009). Tal popularidade do *spectralon*, deve-se ao seu comportamento quase lambertiano na faixa do visível e no infravermelho próximo do espectro, faixas essas de grande interesse para o sensoriamento remoto. Além disso, esse material tem elevada durabilidade (GEORGIEV; BUTLER, 2007; MILTON et al., 2009). No entanto, estes painéis são caros, o que dificulta sua aquisição. Uma tentativa de resolver esse problema é a utilização de materiais alternativos. Alguns materiais alternativos já foram apresentados em trabalhos científicos, por exemplo, lonas constituídas em policloreto de vinil (PVC) foram utilizadas por Del Pozo et al. (2014) e por Herrero-Huerta et al. (2014), cartão Masonite pintado em escala de cinza foi usado por Wang e Myint (2015) e por Poncet et al. (2019), tecido construídos a partir de polipropileno foi usado por Deng et al. (2018) e por Guo et al. (2019).

Apesar dos resultados positivos com o uso destes materiais, alguns deles não é de fácil aquisição em diferentes escalas de cinza e, ainda, não são bem esclarecidas as questões quanto a característica espectral de uso com o passar do tempo. Essas questões trazem a necessidade de novos estudos visando testar novos materiais alternativos e inferir sobre a verdadeira eficiência destes para fins de calibração radiométrica. O objetivo deste estudo foi avaliar o uso de materiais de baixo custo e de fácil acesso para calibração de imagens multiespectrais obtidas por sensores acoplados a ARPs visando monitorar pequenas lavouras de café na região da Zona da Mata Mineira.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Construção dos painéis

Quatro diferentes materiais de fácil obtenção e de baixo custo foram usados para construção dos painéis de calibração: Painéis de madeira compensada pintados com tinta

esmalte sintético Suvinil, painéis de madeira compensada revestidos com napa sintética, cujo material base de construção é *Polyvinyl chloride* (PVC), painéis de *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA) e painéis de madeira compensada revestido com lona de PVC. Para cada material foram construídos quatro painéis em escala de cinza com dimensões de 0,50 por 0,50 m. A quantidade de tons, quatro, foi limitada pela disponibilidade no mercado dos materiais Napa e Lona e, mesmo que, para os materiais Tinta e EVA, mais do que quatro tons de cinza estivessem disponíveis, foram utilizados apenas quatro por questões de padronização.

Após a construção dos painéis, a reflectância de laboratório foi obtida utilizando um espectroradiômetro ASD HandHeld 2 (Analytical Spectral Devices, Inc., Boulder, Colorado, EUA), que opera na faixa de comprimento de onda de 325 nm a 1075 nm, precisão de ± 1 nm. Com o radiômetro, foi utilizada uma sonda de contato *Hi-Brite Contact Probe da ASD Inc.*, e sua conexão era feita por meio de uma fibra óptica. A sonda de contato incluía uma fonte de luz de bulbo de halogênio que, no momento da mensuração da reflectância, era posicionada verticalmente em relação ao ponto de interesse. Para as leituras de reflectância foi utilizado um spectralon com 99 % de brilho como o branco de referência e a cada 10 minutos o ajuste de branco era realizado. Cinco leituras em cada painel foram realizadas e sua média representou a reflectância do painel apresentada na Figura 1.

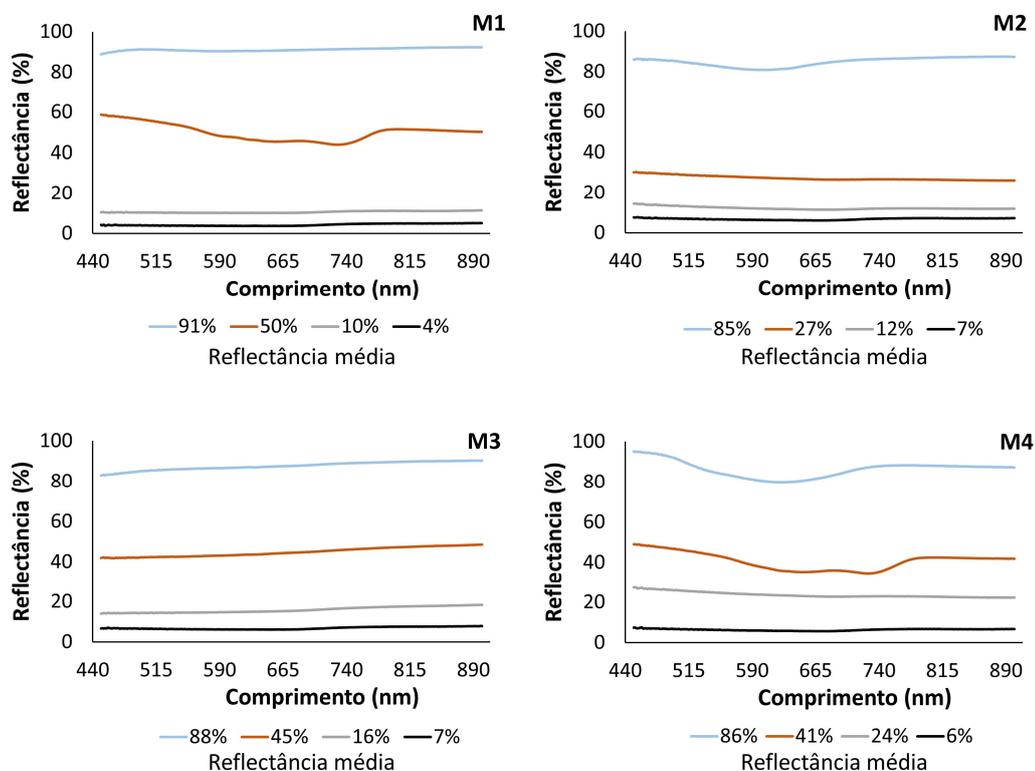


Figura 1. Assinatura espectral dos diferentes painéis usados para calibração radiométrica.

M1: painéis de madeira compensada pintados com tinta fosca; M2: painéis de napa sintética cujo material base de construção é *Polyvinyl chloride* (PVC); M3: painéis de *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA) e M4: painéis de lona de PVC.

2.2.2 Plataforma aérea e sensor

A plataforma aérea usada nesse estudo foi o DJI Matrice 100 Quadcopter (Fabricado por SZ DJI Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, China). Esse equipamento faz uso de duas baterias no momento do voo, podendo resultar em uma autonomia de até 40 minutos. O Matrice 100 é uma plataforma criada para desenvolvedores, isso facilita o acoplamento de sensores. A plataforma era equipada com um receptor GNSS que proporcionava a programação de voos autônomos, que são indispensáveis para fins de sensoriamento remoto.

O sensor multiespectral usado neste estudo foi o RedEdge-MX (Fabricado por MicaSense, Inc., Seattle, Washington, EUA). A câmera RedEdge-MX possui cinco sensores CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor), os quais forneciam informações nos seguintes comprimentos de ondas e largura de banda: azul (475 nm, banda de 20 nm), verde (560 nm, 20 nm), vermelho (668 nm, 10 nm), RedEdge (717 nm, 10 nm) e infravermelho próximo (840 nm, 40 nm). Cada um dos cinco sensores registrou imagens independentes. Cada sensor tinha seu próprio obturador global que podia ser ajustado quanto a velocidade de abertura pelo usuário. O RedEdge-MX contava com um sensor de luz solar *downwelling light sensor* (DLS), suas leituras da radiação solar eram usadas para definir o tempo de exposição para cada um dos cinco sensores no momento da captura das imagens. Com a utilização do DLS, as configurações do RedEdge-MX foram ajustadas para o modo automático, esse modo foi o neste estudo. Essas imagens foram armazenadas em formato TIFF e resolução radiométrica de 16 bits por banda.

2.2.3 Modelo de calibração radiométrica

Diversos estudos demonstram que o número digital bruto (ND) registrado por sensores ópticos possuem relação direta e linear com a reflectância da superfície (DEL POZO et al., 2014; DENG et al., 2018; IQBAL et al., 2018; CAO et al., 2019; GUO et al., 2019). Nesse sentido, a reflectância pode ser estimada convertendo o ND por meio de uma função linear simples (Equação 1).

$$R_i = a ND + b \quad (1)$$

em que,

R_i = Reflectância da superfície na banda i , %;

ND = Número digital bruto, adimensional;

a e b = Parâmetros ajustados por regressão linear.

A reflectância dos painéis determinada em laboratório e a média dos NDs desses painéis foram usados para ajustar os modelos de calibração das diferentes bandas obtidas pelo sensor multiespectral. Visto que a resolução espectral do espectralradiômetro é diferente da resolução dos canais do sensor multiespectral, foi necessário utilizar a reflectância referente ao comprimento de onda central de cada banda da câmera.

A calibração ocorreu de forma independente para cada material testado, isto é, para cada banda do sensor multiespectral quatro equações de calibração foram ajustadas, sendo uma para cada material. A Figura 2 apresenta a disposição dos painéis no momento em que foi feita a aquisição das imagens multiespectrais.

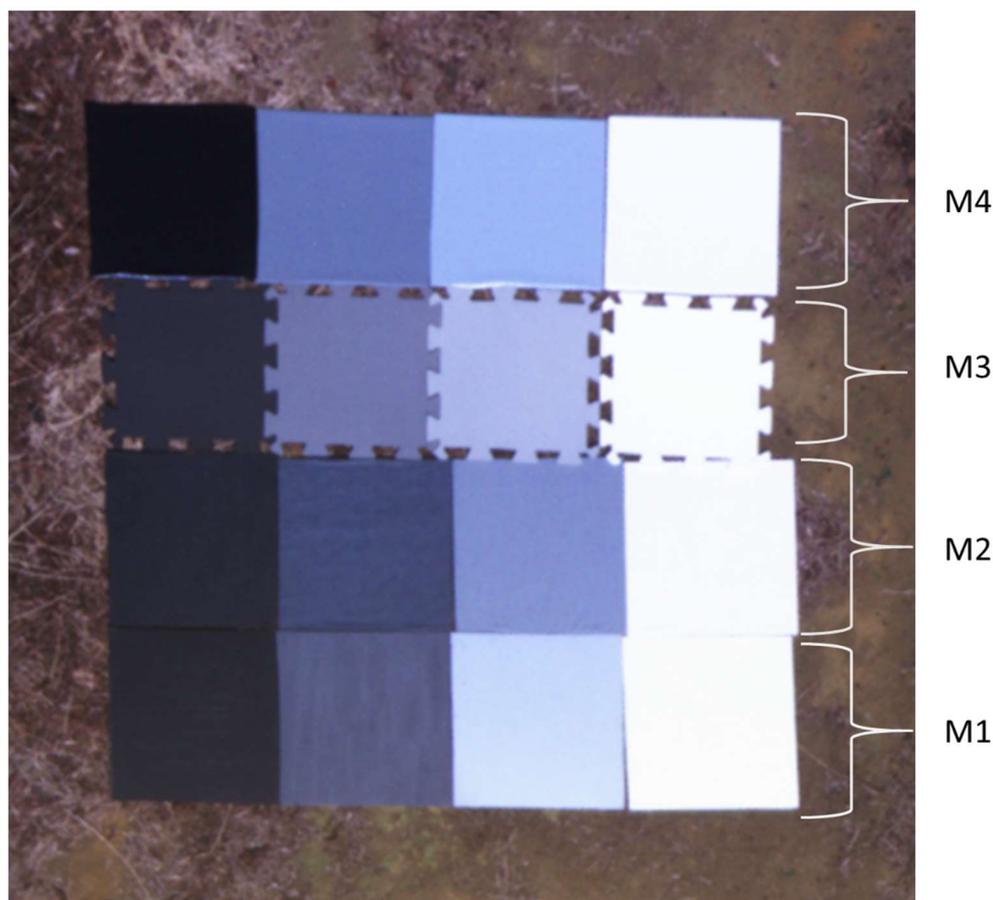


Figura 2. Painéis dos diferentes materiais testados, em escala de cinza.

M1: painéis de madeira compensada pintados com tinta fosca; M2: painéis de napa sintética cujo material base de construção é *Polyvinyl chloride* (PVC); M3: painéis de *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA) e M4: painéis de lona de PVC.

2.2.4 Teste de campo

Para a comparação da eficiência dos diferentes materiais usados na construção dos painéis um experimento de campo foi montado e as etapas do fluxograma apresentado na figura 3 foram realizadas.

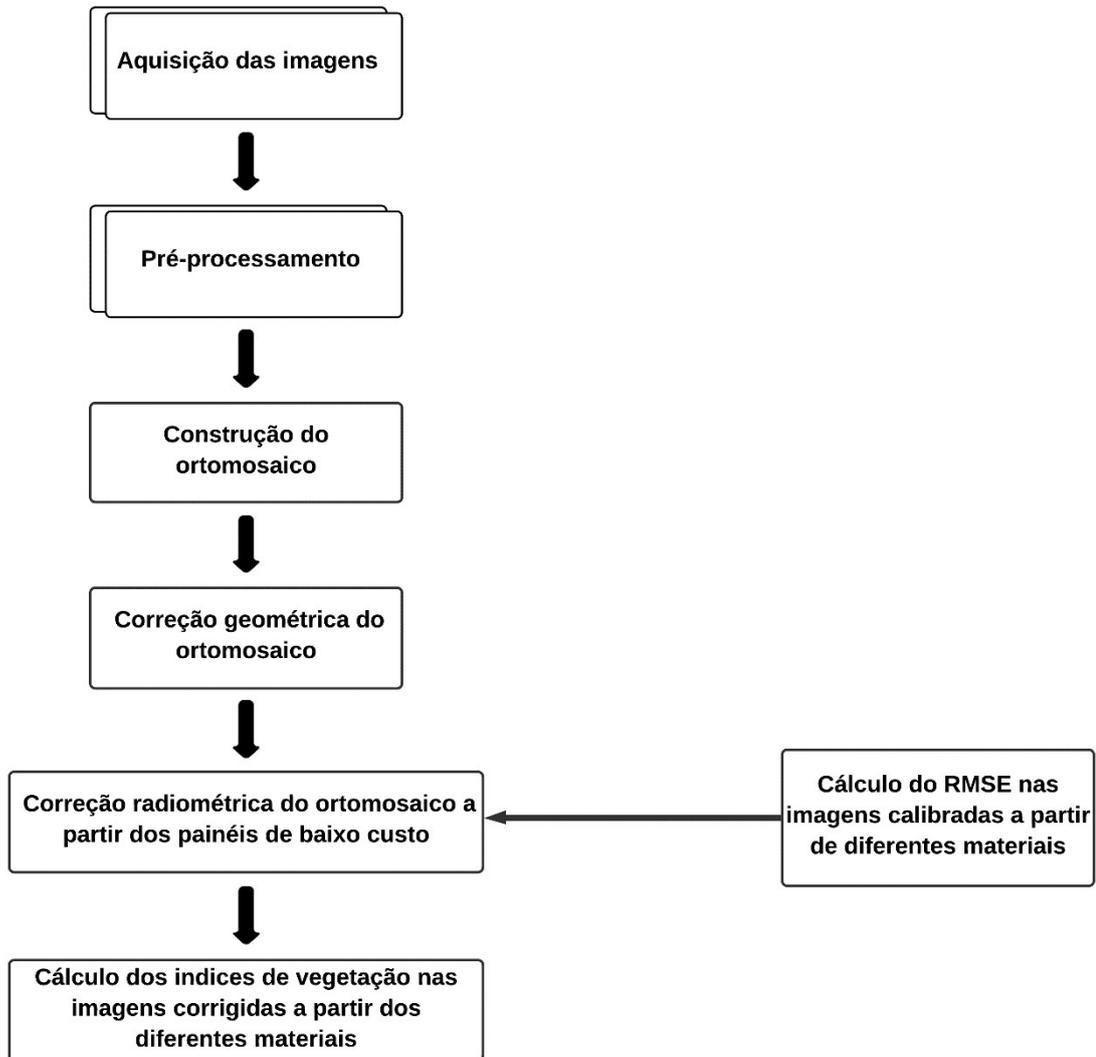


Figura 3. Fluxograma desde a aquisição das imagens até o cálculo dos índices de vegetação.

Um talhão de 2,1 ha, da Fazenda Jatobá, localizado no município de Paula Cândido, MG, Brasil, cultivado em café arábica foi utilizado nesse trabalho (Figura 4). A lavoura era explorada comercialmente a aproximadamente 15 anos e, no momento do voo, o estágio fenológico era o de floração.

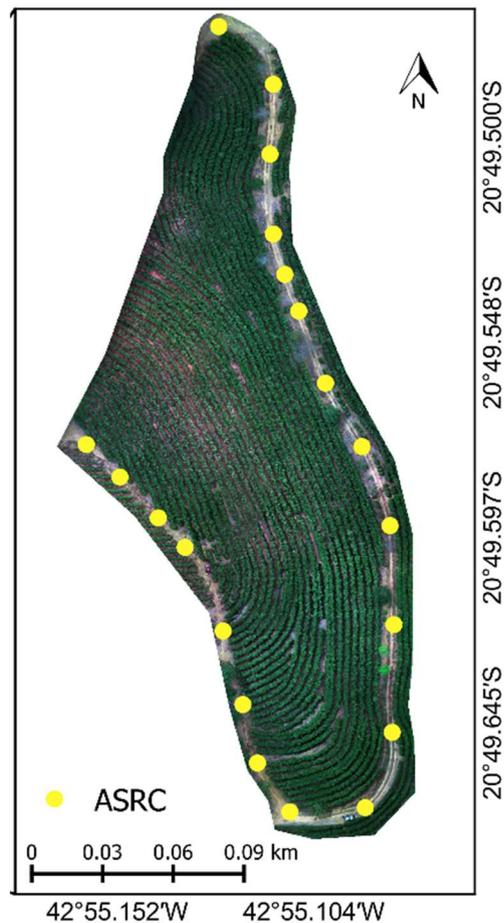


Figura 4. Imagem colorida obtida pela composição das bandas vermelha, verde e azul do sensor RedEdge-MX no dia 04 de outubro de 2019.

Pontos amarelos representa 20 Alvos sintéticos com reflectância conhecidas (ASRC), usados para inferir sobre a acurácia dos modelos de calibração radiométrica ajustados.

O voo ocorreu no dia 04 de outubro de 2019, entre as 11:40 e as 11:50, em condições de céu limpo. O horário do voo correspondeu ao meio dia solar para esta data e para o local do estudo. Essas características fazem com que se tenha a maior proporção de radiação direta incidindo na superfície terrestre e, conseqüentemente, os erros nas leituras de reflectância são menores (HONKAVAARA et al., 2009). Por outro lado, o fato de as plantas de café possuírem porte arbustivo faz com que imagens registradas em momentos diferentes do meio dia solar tenham grandes quantidades de sombras projetada pelas suas copas, o que é prejudicial a aquisição de informações espectrais. Um plano de voo foi programado garantindo 75% de sobreposição frontal e lateral na captura das imagens, a uma altura de vôo de 60 metros. Os painéis foram colocados na área em estudo no momento do voo.

Cerca de 150 imagens foram obtidas no momento do voo, essas imagens foram usadas para a construção de um ortomosaico. Antes da construção do ortomosaico a correção do efeito

de vinheta foi realizada em cada imagem. Essa correção foi feita por meio de um modelo de vinheta radial recomendado pelo fabricante da câmera (Equações 2 e 3).

$$Ic(x, y) = \frac{I(x, y)}{K} \quad (2)$$

$$K = 1 + K_0 r + K_1 r^2 + K_2 r^3 + K_3 r^4 + K_4 r^5 + K_5 r^6 \quad (3)$$

em que,

(x,y) = coordenada do pixel que está sendo corrigido;

Ic(x,y) = número digital do pixel corrigido em x, y;

I(x, y) = número digital do pixel em x, y;

K = fator de correção pelo qual o valor do pixel bruto deve ser dividido para corrigir a vinheta;

r = distância do pixel (x, y) do centro da vinheta, em pixels;

K0 a K5 = coeficientes polinomiais ajustados para o sensor e estão disponíveis nos metadados das imagens.

O ortomosaico foi obtido usando o programa Agisoft™ MetaShape (Version 1.5.3, Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia) nele as imagens foram alinhadas. Nesse processo, o cálculo da posição de cada imagem era realizado e essa posição foi utilizada para a orientação precisa das fotos individuais e geração de uma nuvem de pontos tridimensionais, que é de suma importância para descrever o relevo da área em estudo. A próxima etapa consistiu na densificação da nuvem de pontos tridimensional. Após a densificação da nuvem de pontos, um Modelo Digital de Superfície (MDS) foi construído e, posteriormente, usado para a orientação na construção do ortomosaico. Ao fim do processo, uma ortofoto, com resolução espacial de 0,05 m, foi exportada em formato GeoTiff e descarregada no QGIS (QGIS Development Team, 2019), programa de computador usado para realização da correção geométrica. Para a correção geométrica 20 pontos de controle foram utilizados, esses pontos de controle foram georeferenciados com auxílio do Receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) topográfico, modelo Trimble ProXT (Trimble Inc., Sunnyvale, Califórnia, EUA). Após a obtenção das ortofotos georeferenciadas, os NDs de cada banda da imagem multiespectral foram transformados em reflectância, fazendo uso dos modelos ajustados para os diferentes materiais.

Para avaliar cientificamente a qualidade dos modelos de calibração ajustados e comparar o ajuste feito em cada um dos diferentes materiais usados, o parâmetro *root-mean-square error* (RMSE) (Equação 4) foi calculado. Para isso, 20 alvos com reflectância conhecida (mensurada

em laboratório), construídos em PVC com dimensões de 0,50 por 0,50 m, foram espalhados ao redor do talhão (Figura 3).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

em que,

RMSE = raiz do erro quadrático médio;

\hat{Y}_i = valor da reflectância do alvo sintético obtida no campo após a correção radiométrica das imagens;

Y_i = reflectância do alvo sintético mensurada no laboratório com o espectroradiômetro;

N = número pontos experimentais utilizado no ajuste.

Ainda, com o objetivo de comparar a eficiência dos diferentes materiais para fins de correção radiométrica de imagens multiespectrais, foram calculados quatro índices de vegetação, sendo estes: *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Green Normalized Difference Vegetation Index* (GNDVI), *Blue Normalized Difference Vegetation Index* (BNDVI) e *Normalized Difference Red Edge Index* (NDRE) (Tabela 1). Durante o cálculo dos quatro índices as cinco bandas do sensor multiespectral foram envolvidas. Os mapas temáticos dos diferentes índices e diferentes materiais foram construídos. Após o cálculo dos índices de vegetação a média dos pixels de 25 plantas aleatórias no talhão foram extraídas e plotadas para a comparação entre os diferentes materiais.

Tabela 1. Índices de vegetação determinados para geração dos mapas do talhão de café estudado.

Índice de Vegetação	Equação	Referência
NDVI	$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$	(ROUSE et al., 1973)
GNDVI	$GNDVI = \frac{(NIR - G)}{(NIR + G)}$	(GITELSON et al., 1996)
BNDVI	$BNDVI = \frac{(NIR - B)}{(NIR + B)}$	(FU-MIN et al., 2007)
NDRE	$NDRE = \frac{(NIR - Re)}{(NIR + Re)}$	(ROUSE et al., 1973)

NIR: Infravermelho próximo; R: vermelho; G: verde; B: azul; Re: borda do vermelho.

2.2.5 Determinação da vida útil dos materiais utilizados na confecção de painéis para correção radiométrica

Um experimento foi montado para estudo da vida útil dos diferentes materiais usados no estudo. Cada material foi representado por 12 painéis de 0,10 por 0,10 m, sendo três repetições para cada tom de cinza. Os painéis foram submetidos ao meio sem intervenção de abrigo entre às 10:00 e 14:00 horas. As condições para a exposição destes painéis foram as mesmas adotadas para a aquisição de imagens com ARPs, ou seja, céu limpo. Cada painel foi posicionado na mesma posição até o fim do experimento e para determinar a posição de cada painel na área do experimento a aleatoriedade foi considerada. No início do experimento as reflectâncias dos painéis foram obtidas, uma segunda leitura da reflectância foi feita após 10 horas de exposição e uma terceira após 15 horas totais de exposição, a partir desta terceira, a cada 15 horas de exposição foi realizado uma nova leitura da reflectância. O limiar de 5% de alteração em relação a reflectância inicial foi adotado para inferir sobre a vida útil dos painéis. As leituras das reflectâncias ocorreram no laboratório utilizando o espectroradiômetro ASD HandHeld 2. Ao todo, cinco leituras foram realizadas em cada painel e a média destas leituras representou a reflectância do painel.

2.3 RESULTADOS

Na Tabela 2 são mostrados os modelos lineares ajustados para a correção radiométrica feita com os diferentes materiais testados em cada banda da câmera multiespectral. Com exceção da banda azul, todos os outros modelos ajustados apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,98. Na banda azul, esses coeficientes variaram de 0,88 até 0,98. A banda azul obteve os maiores erros quando comparados aos demais, com RMSE acima de 9,00 para todos os materiais testados. Por outro lado, as bandas verde e vermelho foram as que apresentaram os menores erros, com RMSE máximo de 3,89 (banda verde) e 3,71 (banda vermelha), ambos ocorreram para a lona de PVC. Quando comparado os materiais, os maiores erros foram observados fazendo uso da lona de PVC, com ressalvas para a banda azul, em que o maior erro ocorreu na tinta.

Tabela 2. Modelos ajustados para a correção radiométrica das bandas obtidas pelo sensor multiespectral RedEdge-MX, fazendo uso de quatro diferentes materiais para construção dos painéis

Material	Equação	R ²	RMSE
Banda do Azul			
M1	$y = 0,0015x - 16,705$	0,985	9,80
M2	$y = 0,0015x - 19,096$	0,952	9,04
M3	$y = 0,0014x - 20,335$	0,908	9,08
M4	$y = 0,0014x - 14,201$	0,882	9,14
Banda do Verde			
M1	$y = 0,0015x - 10,384$	0,998	2,99
M2	$y = 0,0015x - 10,465$	0,999	2,98
M3	$y = 0,0016x - 12,935$	0,989	3,55
M4	$y = 0,0015x - 7,998$	0,999	3,89
Banda do Vermelho			
M1	$y = 0,0017x - 11,95$	0,998	2,97
M2	$y = 0,0017x - 11,617$	0,999	2,92
M3	$y = 0,0018x - 15,265$	0,989	3,37
M4	$y = 0,0017x - 9,0114$	0,999	3,71
Banda do RedEdge			
M1	$y = 0,0017x - 11,852$	0,998	3,38
M2	$y = 0,0017x - 11,788$	0,999	3,36
M3	$y = 0,0019x - 15,558$	0,989	3,78
M4	$y = 0,0018x - 8,8023$	0,999	5,28
Banda do NIR			
M1	$y = 0,0019x - 17,262$	0,998	3,69
M2	$y = 0,0019x - 16,638$	0,999	3,56
M3	$y = 0,002x - 20,742$	0,989	4,10
M4	$y = 0,002x - 13,234$	0,999	6,79

M1: painéis de madeira compensada pintados com tinta; M2: painéis de napa sintética cujo material base de construção é *Polyvinyl chloride* (PVC); M3: painéis de *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA) e M4: painéis de lona de PVC; R²: coeficiente de determinação; RMSE: *root-mean-square error*; NIR: Infravermelho próximo.

Os IVs calculados para o talhão da cultura do café são apresentados em mapas temáticos na Figura 5. Os mapas mostram distribuição espacial semelhante quando a correção radiométrica foi realizada usando painéis de diferentes materiais. Os menores valores dos IVs foram observados na região central do talhão, nas entre linhas e nos carregadores que circundam o talhão. Em contraste, os maiores valores são encontrados no dossel das plantas de café. Esse comportamento ocorreu para todos os IVs avaliados. Quando se compara os diferentes materiais, observa-se que, para os IVs GNDVI e BNDVI, as imagens calibradas pelos painéis de lona de PVC resultaram em mapas em que as entrelinhas pouco se diferenciam do dossel das plantas (Figura 5.H e 5.L). Os valores do NDVI e GNDVI para o solo exposto (carregadores ao redor do talhão) foram inferiores a 0,2 em todos os materiais testados e as plantas de café apresentam valores superiores a 0,5. Já para o BNDVI, os valores, quando se utilizou os painéis de lona de PVC, foram, consideravelmente, diferentes dos demais. Isso devido ao fato que os valores do solo exposto dos carregadores apresentaram valores de até 0,5, sendo superior aos valores dos demais mapas de BNDVI. Por outro lado, nas entrelinhas, que é uma superfície heterogênea contendo plantas daninhas, restos vegetais e muitas vezes sombra das copas dos arbustos, os valores foram superiores a 0,7. Para o NDRE, os mapas oriundos da calibração radiométrica feita com os diferentes materiais foram, notavelmente, semelhantes entre si, seus valores em regiões de solos expostos foram inferiores a 0,2 e nas plantas esses valores ficaram entre 0,3 e 0,7.

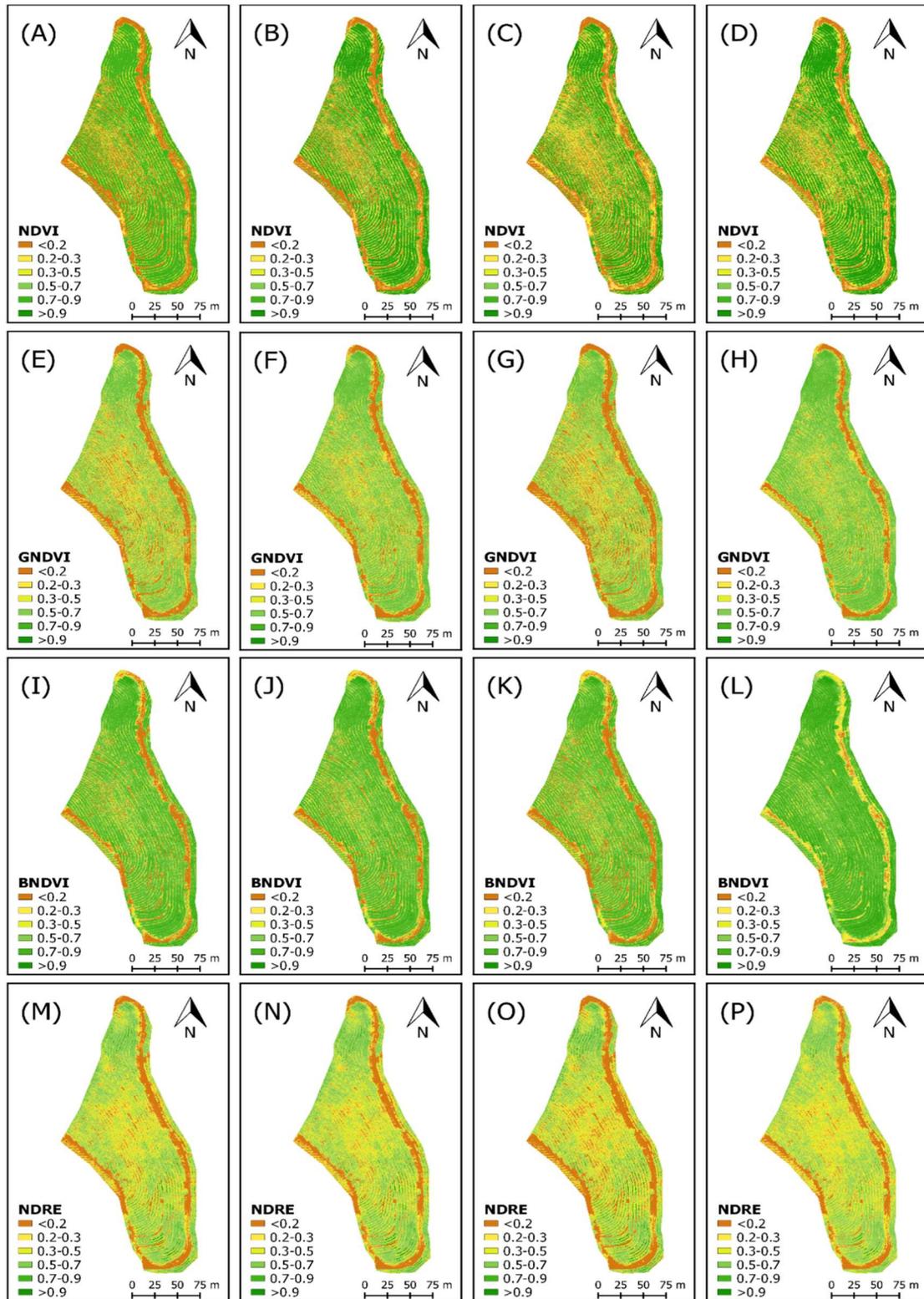


Figura 5. Mapas temáticos dos índices de vegetação calculados com as bandas corrigidas a partir dos diferentes materiais.

Os mapas A, E, I e M refere-se aos índices de vegetação fazendo uso de bandas corrigidas pelos painéis de madeira pintados com tinta; B, F, J e N refere-se ao uso da napa sintética; C, G, K e O refere-se ao uso do EVA; D, H, L e P refere-se ao uso da lona de PVC.

Na Figura 6, os IVs médios de 25 plantas de café foram extraídos e plotados para cada material, apesar dos valores dos índices não serem os mesmos para os diferentes materiais testados, existe um padrão nos valores observados. A maior semelhança entre os valores dos IVs nas plantas ocorreu para os índices NDVI e NDRE (Figura 6.A e 6.D), para o GNDVI os valores com o uso da madeira pintada e da napa sintética foram os mesmos, visto que azul (madeira pintada) é totalmente sobreposta pela curva vermelha (napa sintética). Analisando as curvas do BNDVI observa-se que apenas os valores obtidos utilizando a napa sintética se diferenciam em maior intensidade quando comparado aos demais. Houve uma tendência tanto no NDVI quanto no NDRE de seu valores serem maiores quando utilizado a lona de PVC.

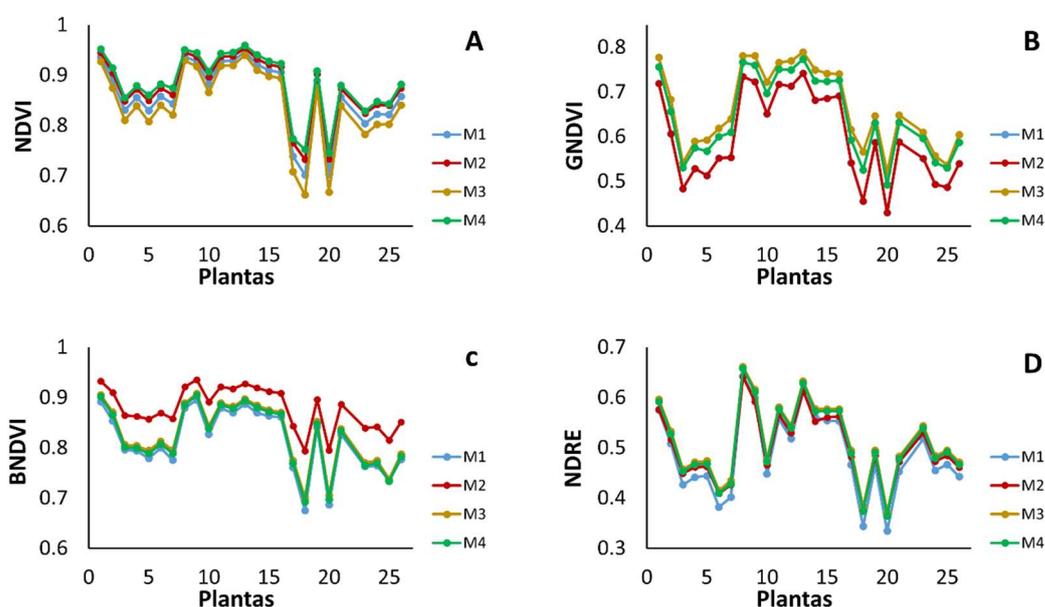


Figura 6. Índices de vegetação de 25 plantas de café calculados com imagens calibradas fazendo uso de diferentes painéis.

M1: painéis de madeira compensada pintados com tinta; M2: painéis de napa sintética cujo material base de construção é *Polyvinyl chloride* (PVC); M3: painéis de *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA) e M4: painéis de lona de PVC.

O tempo médio em que cada painel alcançou a sua vida útil seguindo os critérios estabelecidos nesse estudo é apresentado na Tabela 3. Em todos os materiais usados os painéis de menor reflectância foram mais afetados por ação do tempo, apresentando menor vida útil. Os painéis de maior reflectância da madeira pintada, napa sintética e EVA tiveram comportamento semelhante quanto suas vidas úteis, com duração entre 90 e 105 horas. Já entre os painéis de menor reflectância, o material que mais resistiu foi a madeira pintada, em torno de 30 horas. Os demais materiais apresentaram-se já degradados com 15 horas de uso. Em resumo, a madeira pintada apresentou maior resistência a mudanças na reflectância com o

decorrer do tempo de uso, em contrapartida, o EVA foi o que se degradou em um menor tempo de uso quando comparados aos demais.

Tabela 3. Tempo médio da vida útil dos quatro tons de cinza referente a cada um dos quatro diferentes materiais usados no estudo.

Tons de Cinza	M1		M2		M3		M4	
	R (%)	t (h)						
1	91	90	82	100	88	45	86	105
2	50	60	27	35	45	30	41	60
3	10	30	12	15	16	15	24	30
4	4	30	7	15	7	15	6	15

M1: painéis de madeira compensada pintados com tinta; M2: painéis de napa sintética cujo material base de construção é *Polyvinyl chloride* (PVC); M3: painéis de *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA) e M4: painéis de lona de PVC; R: é a reflectância de cada um dos tons de cinza referente aos diferentes materiais dada em porcentagem e t: tempo médio de vida útil dos painéis dado em horas.

2.4 DISCUSSÃO

Neste trabalho optou-se por usar o método da linha empírica para a calibração radiométrica das imagens multiespectrais. Esse método é mais simples que os demais, visto que não faz uso de parâmetros pré-ajustados em laboratório para a correção radiométrica, parâmetros estes que demandam equipamentos de elevados custos e de uso complexo como por exemplo esferas de integração. Assim, a linha empírica apresenta maior potencial de uso em aplicações agrícolas (DINGUIRARD; SLATER, 1999; WANG; MYINT, 2015). A calibração radiométrica foi eficiente na maioria dos canais do sensor multiespectral RedEdge-MX, no entanto, os maiores erros foram observados no canal azul. Acredita-se que os erros na banda azul, chegando a ser até três vezes superiores as demais bandas, são em decorrência do aumento da dispersão de Rayleigh em bandas de menor comprimento de onda, principalmente na região do visível (PONCET et al., 2019). Por outro lado, menores erros foram observados na banda verde e na vermelha, esses resultados são diferentes dos apresentados por Poncet et al. (2019), essa diferença pode ser em decorrência do sensor usado neste trabalho não ser o mesmo que foi usado por eles.

O tipo de material a ser utilizado como alvo para fins de calibração radiométrica é uma variante importante no processo. Nesse caso, os melhores materiais dentre os avaliados foram a madeira pintada e a napa sintética, uma vez que garantiram ajuste de equações que, no momento da conversão dos NDs brutos em reflectância, resultando em menores erros. Já a lona

de PVC apresentou erros superiores na maioria das bandas do sensor, esses erros foram entre 3,38% e 9,14%. Apesar de maiores, esses erros são semelhantes aos encontrados e considerados aceitáveis por Del Pozo et al. (2014) que obtiveram erros máximos de 8% fazendo uso de lonas de PVC como alvos de calibração. Dentre as exigências para alvos utilizados no método de correção usado neste estudo, a característica lambertiana é indispensável (MILTON, 1987; DENG et al., 2018). As características lambertianas dos alvos usados neste estudo não foram avaliadas pois não detínhamos de um goniômetro para simular diferentes posições do sol, no entanto, essas características não devem ser desprezadas em estudos temporais, visto que, diferentes ângulos zenitais do sol e contribuições de neblina atmosférica que variam temporalmente tendem a induzir erros nas leituras de reflectância (MILTON et al., 2009).

Ao trabalhar com materiais de baixo custo para fins de calibração radiométrica, um dos principais problemas encontrados é o número limitado de tons de cinza encontrados no mercado. No entanto, Deng et al. (2018) demonstram que a exigência mínima para o método da linha empírica é de, pelo menos, dois alvos sendo um alvo branco e outro preto. Embora Karpouzli e Malthus (2003) sugeriram que quanto mais alvos de reflectância conhecida sejam usados para ajustar o modelo, menor seja o erro associado a calibração radiométrica, Deng et al. (2018) demonstraram, comparando diferentes quantidades de alvos, que esse erro não é relevante.

Apesar dos erros gerados pelo uso de painéis de calibração confeccionados com diferentes materiais não serem os mesmos, os mapas de IVs apresentaram o mesmo padrão de variabilidade espacial. Isso significa que, para estudos que desejam investigar o comportamento espacial da cultura do café, qualquer um dos materiais testados pode ser usado. Por outro lado, quando o objetivo do trabalho for quantificar os IVs, uma maior atenção deve ser dada na escolha do material. Neste trabalho, o uso dos materiais tinta e napa sintética resultaram em menores erros na correção radiométrica e, para a maioria dos IVs calculados, os valores, fazendo uso destes dois materiais, são semelhantes.

Diante da complexidade da mensuração da reflectância das superfícies, todas as fontes de incertezas devem ser evitadas. Uma fonte de incerteza é a verdadeira reflectância do alvo que está sendo usado. Vários trabalhos realizam a leitura da reflectância dos alvos no momento da aquisição das imagens e, para isso, utilizam espectroradiômetros de campo (DEL POZO et al., 2014; CRUSIOL et al., 2017; IQBAL et al., 2018). Entretanto, esse procedimento é inviável para pequenos agricultores devido ao alto custo dos espectroradiômetros. Então, definir a reflectância do alvo em laboratório pode viabilizar seu uso para esse público mencionado. No

entanto, cuidados devem ser tomados, visto que com a degradação dos alvos suas assinaturas espectrais mudam, tornando-se uma fonte de incerteza na correção radiométrica.

O uso de alvos com reflectância conhecida depende de estudos que verifiquem o tempo de uso em que a reflectância mude a tal ponto que não esteja mais adequado para uso. Neste estudo aponta-se que alvos de baixo custo tendem a ter baixa vida útil, entre 15 e 30 horas de uso para alvos escuros e entre 45 e 105 horas para alvos de maior reflectância. Embora a baixa vida útil dos alvos de baixo custo ainda seja um problema, deve-se ser levado em consideração que missões aéreas em pequenas propriedades cafeeiras são rápidas, levando apenas alguns minutos para serem concluídas. Portanto, várias missões podem ser realizadas antes que haja mudanças significativas na assinatura espectral dos alvos em uso. Deve ser levado em consideração é o custo por unidade de área destes alvos equivale de 0,1 a 0,2% do custo do *spectralon*.

2.5 CONCLUSÃO

Neste estudo quatro materiais alternativos foram testados para a confecção de painéis a serem utilizados na calibração radiométrica imagens. Os painéis feitos de madeira pintados com tinta e os de madeira revestidos com napa sintética cujo material base de construção é *Polyvinyl chloride* (PVC), foram os que apresentaram menores erros no processo de calibração radiométrica, já os painéis de madeira revestido com lona de PVC foi o que apresentou os maiores erros.

O material painéis de *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA) apresentou baixa resistência ao uso, visto que sua vida útil foi inferior aos demais, já a madeira pintada foi o material mais resistente sendo assim o mais indicado para uso na calibração radiométrica de imagens multiespectrais.

2.6 REFERÊNCIAS

- ALBETIS, J.; JACQUIN, A.; GOULARD, M.; POILVÉ, H.; ROUSSEAU, J.; CLENET, H.; DEDIEU, G.; DUTHOIT, S. On the potentiality of UAV multispectral imagery to detect Flavescence dorée and Grapevine Trunk Diseases. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1, 2019.
- ALI, I.; CAWKWELL, F.; DWYER, E.; BARRETT, B.; GREEN, S. Satellite remote sensing of grasslands: From observation to management. **Journal of Plant Ecology**, v. 9, n. 6, p. 649–671, 2016.
- BATISTOTI, J.; MARCATO, J.; ÍTAVO, L.; MATSUBARA, E.; GOMES, E.; OLIVEIRA, B.; SOUZA, M.; SIQUEIRA, H.; FILHO, G. S.; AKIYAMA, T.; GONÇALVES, W.; LIESENBERG, V.; LI, J.; DIAS, A. Estimating pasture biomass and canopy height in Brazilian Savanna using UAV photogrammetry. **Remote Sensing**, v. 11, n. 20, p. 1–12, 2019.
- BÉGUÉ, A.; ARVOR, D.; BELLON, B.; BETBEDER, J.; DE ABELLEYRA, D.; FERRAZ, R. P. D.; LEBOURGEOIS, V.; LELONG, C.; SIMÕES, M.; VERÓN, S. R. Remote sensing and cropping practices: A review. **Remote Sensing**, v. 10, n. 1, p. 1–32, 2018.
- BEN-DOR, E.; CHABRILLAT, S.; DEMATTÊ, J. A. M.; TAYLOR, G. R.; HILL, J.; WHITING, M. L.; SOMMER, S. Using Imaging Spectroscopy to study soil properties. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. SUPPL. 1, p. S38–S55, 2009.
- BOGUE, R. Sensors key to advances in precision agriculture. **Sensor Review**, v. 37, n. 1, p. 1–6, 2017.
- CALVÃO, T.; PESSOA, M. F. Remote sensing in food production - A review. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 27, n. 2, p. 138–151, 2015.
- CAO, S.; DANIELSON, B.; CLARE, S.; KOENIG, S.; CAMPOS-VARGAS, C.; SANCHEZ-AZOFEIFA, A. Radiometric calibration assessments for UAS-borne multispectral cameras: Laboratory and field protocols. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 149, n. January, p. 132–145, 2019.
- CORRÊDO, L. DE P.; PINTO, F. DE A. DE C.; QUEIROZ, D. S.; VALENTE, D. S. M.; VILLAR, F. M. DE M. Nitrogen variable rate in pastures using optical sensors. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 6Supl2, p. 2917–2932, 2019.
- CORTI, M.; CAVALLI, D.; CABASSI, G.; VIGONI, A.; DEGANO, L.; MARINO GALLINA, P. Application of a low-cost camera on a UAV to estimate maize nitrogen-related variables. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 4, p. 675–696, 2019.
- CRUSIOL, L. G. T.; NANNI, M. R.; SILVA, G. F. C.; FURLANETTO, R. H.; DA SILVA GUALBERTO, A. A.; GASPAROTTO, A. DE C.; DE PAULA, M. N. Semi professional digital camera calibration techniques for Vis/NIR spectral data acquisition from an unmanned aerial vehicle. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 8–10, p. 2717–2736, 2017.
- DEL POZO, S.; RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, P.; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D.; FELIPE-

GARCÍA, B. Vicarious radiometric calibration of a multispectral camera on board an unmanned aerial system. **Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1918–1937, 2014.

DEMATTE, J. A. M.; FONGARO, C. T.; RIZZO, R.; SAFANELLI, J. L. Geospatial Soil Sensing System (GEOS3): A powerful data mining procedure to retrieve soil spectral reflectance from satellite images. **Remote Sensing of Environment**, v. 212, p. 161–175, 2018.

DENG, L.; HAO, X.; MAO, Z.; YAN, Y.; SUN, J.; ZHANG, A. A Subband Radiometric Calibration Method for UAV-Based Multispectral Remote Sensing. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 11, n. 8, p. 2869–2880, 2018.

DINGUIRARD, M.; SLATER, P. N. Calibration of space-multispectral imaging sensors: A review. **Remote Sensing of Environment**, v. 68, n. 3, p. 194–205, 1999.

FORKUOR, G.; HOUNKPATIN, O. K. L.; WELP, G.; THIEL, M. High resolution mapping of soil properties using Remote Sensing variables in south-western Burkina Faso: A comparison of machine learning and multiple linear regression models. **PLoS ONE**, v. 12, n. 1, p. 1–21, 2017.

FU-MIN, W.; JING-FENG, H.; YAN-LIN, T.; XIU-ZHEN, W. **New Vegetation Index and Its Application in Estimating Leaf Area Index of Rice**. Rice Science. **Anais...**2007.

GEORGIEV, G. T.; BUTLER, J. J. Long-term calibration monitoring of Spectralon diffusers BRDF in the air-ultraviolet. **Applied Optics**, v. 46, n. 32, p. 7892–7899, 2007.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS- MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 289–298, 1996.

GÓMEZ, C.; WHITE, J. C.; WULDER, M. A. Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 116, p. 55–72, 2016.

GUO, Y.; SENTHILNATH, J.; WU, W.; ZHANG, X.; ZENG, Z.; HUANG, H. Radiometric calibration for multispectral camera of different imaging conditions mounted on a UAV platform. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 4, p. 1–24, 2019.

HEIM, R.; WRIGHT, I.; SCARTH, P.; CARNEGIE, A.; TAYLOR, D.; OLDELAND, J. Multispectral, Aerial Disease Detection for Myrtle Rust (*Austropuccinia psidii*) on a Lemon Myrtle Plantation. **Drones**, v. 3, n. 1, p. 25, 2019.

HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D.; FELIPE-GARCÍA, B.; SÁNCHEZ, N.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D.; GOMEZ-LAHOZ, J. Testing the radiometric performance of digital photogrammetric images: Vicarious vs. laboratory calibration on the Leica ADS40, a study in Spain. **Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation**, v. 2012, n. 5, p. 557–571, 2012.

HERRERO-HUERTA, M.; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D.; RODRIGUEZ-GONZALVEZ, P.;

GONZÁLEZ-AGUILERA, D.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J. Vicarious radiometric calibration of a multispectral sensor from an aerial trike applied to precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 108, p. 28–38, 2014.

HONKAVAARA, E.; ARBIOL, R.; MARKELIN, L.; MARTINEZ, L.; CRAMER, M.; BOVET, S.; CHANDELIER, L.; ILVES, R.; KLONUS, S.; MARSHAL, P.; SCHLÄPFER, D.; TABOR, M.; THOM, C.; VEJE, N. Digital airborne photogrammetry-a new tool for quantitative remote sensing?-a state-of-the-art review on radiometric aspects of digital photogrammetric images. **Remote Sensing**, v. 1, n. 3, p. 577–605, 2009.

IQBAL, F.; LUCIEER, A.; BARRY, K. Simplified radiometric calibration for UAS-mounted multispectral sensor. **European Journal of Remote Sensing**, v. 51, n. 1, p. 301–313, 2018.

KARPOUZLI, E.; MALTHUS, T. The empirical line method for the atmospheric correction of IKONOS imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 5, p. 1143–1150, 2003.

KELCEY, J.; LUCIEER, A. Sensor correction of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing. **Remote Sensing**, v. 4, n. 5, p. 1462–1493, 2012.

LELONG, C. C. D.; BURGER, P.; JUBELIN, G.; ROUX, B.; LABBÉ, S.; BARET, F. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. **Sensors**, v. 8, n. 5, p. 3557–3585, 2008.

LIMA-CUETO, F. J.; BLANCO-SEPÚLVEDA, R.; GÓMEZ-MORENO, M. L.; GALACHO-JIMÉNEZ, F. B. Using vegetation indices and a UAV imaging platform to quantify the density of vegetation ground cover in olive groves (*Olea Europaea* L.) in Southern Spain. **Remote Sensing**, v. 11, n. 21, 2019.

LIN, F. F.; QIU, L. F.; DENG, J. S.; SHI, Y. Y.; CHEN, L. S.; WANG, K. Investigation of SPAD meter-based indices for estimating rice nitrogen status. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 71, n. SUPPL. 1, p. 60–65, 2010.

LU, B.; HE, Y. Species classification using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) -acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 128, p. 73–85, 2017.

MAES, W. H.; STEPPE, K. Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. **Trends in Plant Science**, v. 24, n. 2, p. 152–164, 2019.

MARIN, D. B.; ALVES, M. DE C.; POZZA, E. A.; BELAN, L. L.; FREITAS, M. L. DE O. Multispectral radiometric monitoring of bacterial blight of coffee. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 5, p. 959–982, 2019.

MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, V.; GOMEZ-GIL, J.; MACHADO, M. L.; PINTO, F. A. C. Leaf and canopy reflectance spectrometry applied to the estimation of angular leaf spot disease severity of common bean crops. **PLoS ONE**, v. 13, n. 4, p. 1–18, 2018.

MILTON, E. J. Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 12, p. 1807–1827, 1987.

MILTON, E. J.; SCHAEPMAN, M. E.; ANDERSON, K.; KNEUBÜHLER, M.; FOX, N. Progress in field spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. SUPPL. 1, p. S92–S109, 2009.

MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, p. 358–371, 2013.

NAVROZIDIS, I.; ALEXANDRIDIS, T. K.; DIMITRAKOS, A.; LAGOPODI, A. L.; MOSHOU, D.; ZALIDIS, G. Identification of purple spot disease on asparagus crops across spatial and spectral scales. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 148, n. October 2017, p. 322–329, 2018.

NETTO, A. T.; CAMPOSTRINI, E.; DE OLIVEIRA, J. G.; BRESSAN-SMITH, R. E. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Scientia Horticulturae**, v. 104, n. 2, p. 199–209, 2005.

PONCET, A. M.; KNAPPENBERGER, T.; BRODBECK, C.; FOGLE, M.; SHAW, J. N.; ORTIZ, B. V. Multispectral UAS data accuracy for different radiometric calibration methods. **Remote Sensing**, v. 11, n. 16, p. 1–22, 2019.

QGIS Development Team. “QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project”. <http://qgis.osgeo.org>. 2019.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W.; FREDEN, S. C. **No Title Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. Proceedings of 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. **Anais...**1973.

SECKER, J.; STAENZ, K.; GAUTHIER, R. P.; BUDKEWITSCH, P. Vicarious calibration of airborne hyperspectral sensors in operational environments. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 1, p. 81–92, 2001.

VILLAR, F. M. DE M.; PINTO, F. DE A. DE C.; FONSECA, D. M. DA; QUEIROZ, D. M. DE; ALCÂNTARA, G. R. DE. Sufficiency index for defining nitrogen recommendation in brachiaria grass pasture. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 5, p. 1333–1340, 2015.

WANG, C.; MYINT, S. W. A Simplified Empirical Line Method of Radiometric Calibration for Small Unmanned Aircraft Systems-Based Remote Sensing. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 8, n. 5, p. 1876–1885, 2015.

XAVIER, T. W. F.; SOUTO, R. N. V.; STATELLA, T.; GALBIERI, R.; SANTOS, E. S.; SULI, G. S.; ZEILHOFER, P. Identification of Ramularia Leaf Blight Cotton Disease Infection Levels by Multispectral, Multiscale UAV Imagery. **Drones**, v. 3, n. 2, p. 33, 2019.

YU, N.; LI, L.; SCHMITZ, N.; TIAN, L. F.; GREENBERG, J. A.; DIERS, B. W. Development of methods to improve soybean yield estimation and predict plant maturity with an unmanned aerial vehicle based platform. **Remote Sensing of Environment**, v. 187, p. 91–101, 2016.

ZHANG, B.; ZHANG, L.; XIE, D.; YIN, X.; LIU, C.; LIU, G. Application of synthetic NDVI time series blended from landsat and MODIS data for grassland biomass estimation. **Remote Sensing**, v. 8, n. 1, p. 1–21, 2016.

ZHANG, C.; KOVACS, J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 693–712, 2012.

3 ARTIGO II - MONITORAMENTO DA MATURAÇÃO DO CAFÉ EM REGIÃO DE MONTANHA USANDO CÂMERA MULTIESPECTRAL DE BAIXO CUSTO

RESUMO

A crescente demanda global por cafés especiais aumenta a necessidade de novos métodos para o monitoramento do processo de maturação. Atualmente, o monitoramento é realizado por meio de amostragem manual e contagem dos frutos verdes. Esse método é trabalhoso e limita-se a poucas plantas dentro do talhão. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de um sensor multiespectral de baixo custo, montado em uma plataforma aérea não tripulada, para monitorar o processo de maturação dos frutos de cafeeiro, em lavouras cultivadas na região montanhosa da Zona da Mata Mineira. Para isso um experimento foi montado e cinco talhões distintos cultivados em café arábica foram avaliados. Durante o período de maturação do café quatro voos foram realizados para adquirir informações espectrais do dossel da cultura. Neste trabalho a câmera multiespectral Mapir Survey3W foi usada para adquirir imagens multiespectrais. Após a aquisição das imagens oito índices de vegetação foram calculados. A análise de componentes principais foi utilizada para inferir sobre a importância dos índices para monitorar a maturação do café. As imagens multiespectrais obtidas pelo sensor de baixo custo foram capazes de registrar as mudanças espectrais ocorridas nas plantas de café com o avanço da maturação na maioria dos talhões estudados, no entanto, observou-se que a produtividade e o volume de copa das plantas de café influenciaram no monitoramento.

Palavras chave: ARP, Pequenos cafeicultores, Sensoriamento remoto.

ABSTRACT

The growing global demand for specialty coffees increases the need for new methods for monitoring the maturation process. Currently, monitoring is carried out through manual sampling and counting of green fruits. This method is laborious and is limited to a few plants of the stand. Therefore, the objective of this work was to evaluate the potential of a low cost multispectral sensor, assembled on an unmanned aerial platform, to monitor the maturation process of coffee fruits, in coffee crops grown in the mountainous region of Zona da Mata Mineira. For this an experiment was set up and five different field grown in arabica coffee were evaluated. During the coffee maturation period, four flights were made to acquire spectral

information from the crop canopy. In this work, the Mapir Survey3W multispectral camera was used to acquire multispectral images. After the acquisition of the images, eight vegetation indexes were calculated. Principal component analysis was used to infer the importance of the indices to monitor coffee maturation. The multispectral images obtained by the low cost sensor were able to register the spectral changes that occurred in the coffee plants with the advance of maturation in most of the studied fields, however, it was observed that the productivity and the canopy volume of the coffee plants influenced the monitoring.

Keywords: RPA, Small coffee produces, Remote sensing.

3.1 INTRODUÇÃO

A preocupação dos produtores de café na atualidade não se limita apenas a produtividade das lavouras, pois fatores que visam agregar valor ao produto final também estão sendo levados em consideração dentro do sistema de produção da cultura (VOLSI et al., 2019). O café é um dos poucos produtos agrícolas que têm seus preços com base em parâmetros qualitativos no Brasil, seu valor é acrescido significativamente com a melhoria da qualidade (SIMÕES et al., 2008; GUIMARÃES et al., 2019; PASETO; PATINO, 2019).

A qualidade dos grãos de café é afetada por diversos fatores como altitude, nutrição das plantas, período de exposição da lavoura a radiação solar, presença ou ausência de doenças (SIMÕES et al., 2008; PIMENTA et al., 2018). Além desses fatores, um outro que afeta muito a qualidade dos cafés é o estágio de maturação dos frutos no momento da colheita (FAGAN et al., 2011; VARÃO et al., 2019). A colheita do café em momentos inapropriados afeta a qualidade sensorial das bebidas, bem como a uniformidade de cor dos grãos obtida após seu beneficiamento. Os frutos colhidos verdes dão origem a grãos defeituosos quando beneficiados, apresentando tonalidades escuras, o que deprecia o grão e torna a bebida amarga (APARECIDO et al., 2018). A qualidade de bebida inferior dos grãos originados de frutos colhidos ainda verdes está relacionada com os níveis insatisfatórios de compostos fenólicos acumulados (SITTIPOD et al., 2019). A sacarose acumulada nos frutos maduros, chegando a 8,5% para espécie *Coffea arábica*, é um dos componentes para as características de qualidade da bebida, e o maior acúmulo de sacarose nos grãos ocorre nos estágios finais de maturação (CASTRO; MARRACCINI, 2006).

Os ácidos clorogênicos são os principais compostos responsáveis pelo amargor e perda de flavor da bebida (SIQUEIRA; ABREU, 2006; GLOESS et al., 2013). Os ácidos clorogênicos tendem a se translocar dos grãos para a casca no momento da maturação, com o objetivo de proteção dos frutos contra microrganismos, e no ápice da maturação os teores deste composto são minimizados no interior dos grãos (FAGAN et al., 2011; CHENG et al., 2016). Diante da importância da maturação dos frutos no momento da colheita para a produção dos cafés com qualidade superior, torna-se indispensável o monitoramento dos frutos na planta e assim determinar o ponto ideal de colheita.

Atualmente, o monitoramento da maturação do café é feito com coleta de amostras e contagem dos frutos verdes. Esse método é trabalhoso e limita-se a poucas plantas dentro do

talhão, o que pode não ser representativo. Uma alternativa a este método seria o uso do sensoriamento remoto. O fato de o sensoriamento remoto possibilitar amostragem não destrutiva e de toda a área de interesse, vem aumentando o seu uso para o monitoramento de diversas culturas. Trabalhos objetivando o monitoramento de doenças que ocorrem no café (MARIN et al., 2019) e identificação de parâmetros biofísicos que influenciam as produções (RAMIREZ; ZULLO JÚNIOR, 2010) demonstram a aplicabilidade da ferramenta na cafeicultura. No entanto, algumas limitações a este tipo de análise são encontradas, dentre elas, as imagens de domínio público obtidas por plataformas orbitais apresentam baixa resolução temporal e espacial, dificultando monitoramentos que precisam de uma rápida tomada de decisão.

Com o advento dos ARPs (Aeronaves Remotamente Pilotadas), as limitações para a aquisição da informação espectral do dossel relacionadas a resolução temporal e do custo de uma alta resolução espacial vem sendo superadas (ZHANG; KOVACS, 2012). Os ARPs têm sido utilizado no meio agrícola em decorrência, principalmente, do custo de aquisição relativamente baixo, quando comparado a outras plataformas, e por voar em baixas altitudes, o que permite imagens com alta resolução espacial, chegando a 1 cm (LELONG et al., 2008). Além disso, os avanços tecnológicos dos sensores, que vão a bordo destas aeronaves, vêm possibilitando a aquisição de imagens com elevada resolução espectral.

Imagens multiespectrais obtidas por ARPs vêm sendo utilizadas para monitorar e identificar diferentes espécies forrageiras em pastagens (LU; HE, 2017); monitorar a cultura da soja, bem como sua produtividade e maturação fisiológica (YU et al., 2016); apoiar decisões voltadas a questões nutricionais na cultura do milho, visando o correto uso do nitrogênio (CORTI et al., 2019); estimativas de biomassa na cultura da oliveira e em pastagens (BATISTOTI et al., 2019; LIMA-CUETO et al., 2019); identificação e estudo do comportamento de organismos patogênicos para as plantas (NAVROZIDIS et al., 2018; ALBETIS et al., 2019; HEIM et al., 2019; XAVIER et al., 2019). Especificamente na área de detecção de estágio de maturação de frutos, os ARPs têm sido utilizados para detectar a maturação de café (JOHNSON et al., 2004), de tomate (SENTHILNATH et al. 2016) e maçã (VALENTE et al., 2019).

Atualmente, vários sensores multiespectrais são encontrados no mercado, no entanto estes sensores ainda são onerosos, o que os tornam inacessíveis para pequenos agricultores. Uma alternativa a este problema é o uso de sensores modificados, caracterizados como de baixo custo (PUTRA; SONI, 2017). Estes sensores são câmeras coloridas, de um sensor, que são adaptados para registrar radiação também na faixa do infravermelho próximo (NIR) (COBURN et al.,

2018; CORTI et al., 2019). Os Sensores usados em câmeras convencionais são em sua maioria CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) e CCD (charge-coupled device). Graças a característica de serem sensíveis também ao NIR, é possível usá-los para obter bandas nesta faixa do espectro eletromagnético (NIJLAND et al., 2014).

Apesar do aparente potencial do uso de câmeras coloridas para adquirir imagens multiespectrais, poucos trabalhos discorrem sobre as incertezas do uso destes sensores. Adquirir imagens multiespectrais com um único sensor se trata de um grande desafio, diante ao fato, que os CMOS e CCD não possuem a mesma eficiência quântica para diferentes comprimentos de onda neles incididos (LULÉ et al., 2000). Outra questão, é que as redes de nano-filtros passa banda usadas nesses sensores não são capazes de filtrar 100% da radiação em indesejada (LEBOURGEOIS et al., 2008).

Resumindo, pode-se dizer que existe uma carência de sistemas que possam ser utilizados para detectar o ponto ideal de colheita do café e possibilitar assim a obtenção de um produto com qualidade superior. Os ARPs são plataformas que apresentam potencial para o imageamento de áreas cafeeiras com vistas à identificação do ponto ideal de colheita. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de um sensor multiespectral de baixo custo, montado em uma plataforma aérea não tripulada, para monitorar o processo de maturação dos frutos de cafeeiro, em lavouras cultivadas na região montanhosa da Zona da Mata Mineira.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Área de Estudo

O experimento foi realizado na fazenda Jatobá localizada a 20,82°S e 42,91°W no município de Paula Cândido, na região da Zona da Mata do estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1). As coletas ocorreram entre os meses de abril e maio de 2019, o período de coleta coincidiu com o período de maturação dos frutos de café. A amostragem ocorreu em quatro datas, sendo elas 29 de abril e 07, 13 e 27 de maio, visando acompanhar a maturação do café no tempo.

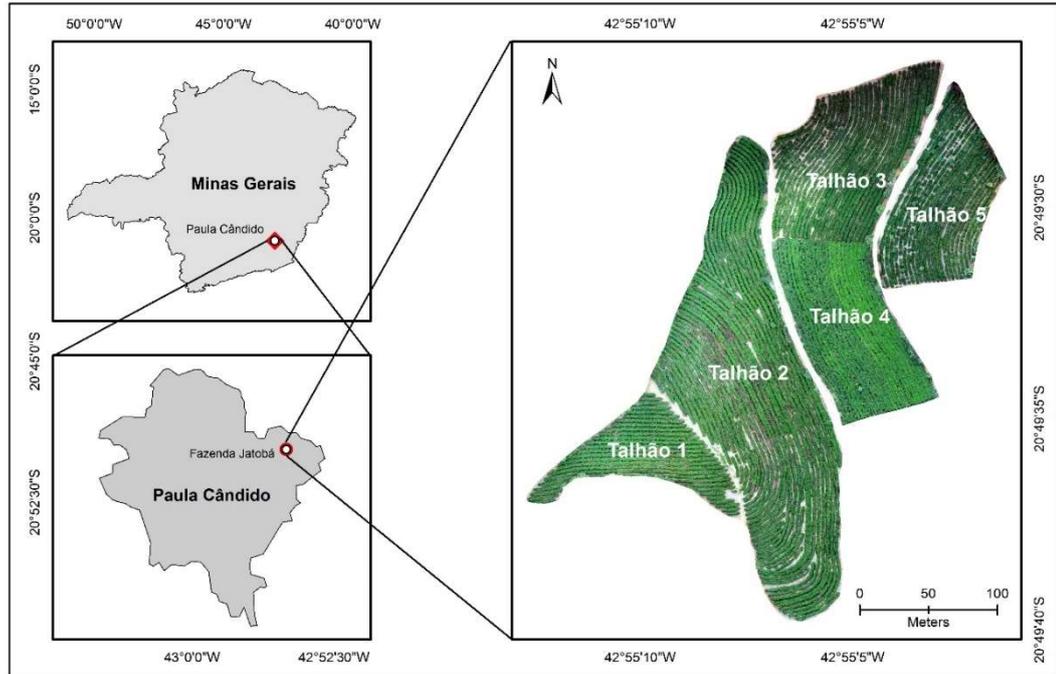


Figura 1: Área de estudo localizada no município de Paula Cândido estado de Minas Geras, Brasil

Imagem obtida com a câmera colorida abordo do *Phantom 4 Pro* no dia 29 de abril de 2019.

A região possui relevo montanhoso, e uma das suas principais atividades agrícolas é a cafeicultura, e que em sua maioria é desenvolvida por pequenos agricultores. Para este estudo, cinco talhões distintos, cultivados em café arábica foram usados. A caracterização destes talhões pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos talhões de café avaliados no município de Paula Cândido, Minas Gerais

Talhão	Área (ha)	Cultivares	Cor do fruto	Vol. de copa (m³)	Dens.	Decl. Média (%)	Prod. (scs.ha⁻¹)
1	0,54	Catuai vermelho	Vermelho	2,91 ± 0,19	4000	7,66	20,2
2	2,1	Catuai vermelho	Vermelho	1,87 ± 0,14	4000	14,39	8,0
3	1,01	MG H 419-1	Amarelo	0,62 ± 0,04	8000	16,24	62,5
4	0,77	Burbon vermelho	Vermelho	0,70 ± 0,06	13333	23,76	41,6
5	0,65	Icatu	Vermelho	1,77 ± 0,10	2222	20,79	37,0

Vol. de copa: volume de copa das plantas de café dado em m³; Dens.: densidade de plantas por hectare; Decl. Média: declividade média do relevo em cada talhão dada em %; Prod.: produtividade média do talhão dada em sacas por hectare na safra 2018-2019; scs: sacas de 60 kg.

3.2.2 Plataforma Aérea Usada Para a Aquisição de Imagens

O ARP utilizado no estudo foi um quadricóptero Phantom 4 pro. As missões foram definidas utilizando o aplicativo DroneDeploy (Infatics Inc., San Francisco, Califórnia, EUA) desenvolvido para plataformas android versão 8 e as imagens foram adquiridas no mesmo dia da amostragem das plantas. A condição de céu limpo foi estabelecida para a aquisição das imagens, sendo as missões realizadas entre às 11:00 e 13:00, horas. Um plano de voo foi construído permitindo que o ARP operasse com velocidade de 7 m s^{-1} no momento da aquisição das imagens e a uma altitude de 60 m acima do nível do solo, tomando como referencial o ponto de maior altitude da área em estudo. O plano de voo garantiu uma sobreposição de 70% frontal e 75% lateral entre as imagens.

Uma câmera modificada pela empresa Mapir, modelo Survey 3W (Peau Productions Inc., San Diego, Califórnia, EUA), foi utilizada neste estudo. Essa câmera possuía o sensor CMOS Sony Exmor R IMX117 capaz de registrar imagens com resolução de 12MP, profundidade de pixel de 24 bits no formato JPEG (Joint Photographic Experts Group) e de 36 bits no formato RAW (formato em que os dados da imagem são minimamente processados). Originalmente o sensor registra imagens coloridas RGB (Red, Green and Blue). A modificação da câmera, realizada pelo fabricante, consistiu na remoção do filtro que impede a passagem do infravermelho próximo (NIR), e após a remoção desse filtro, um filtro RGNIR (Red + Green + NIR) foi adicionado.

Durante os quatro voos, as configurações da câmera foram mantidas as mesmas. As configurações foram definidas por meio de testes prévios. A condição estabelecida para a escolha destas configurações foram que não houvesse pixels saturados em qualquer canal da câmera. Após os testes, a velocidade de abertura do obturador foi fixada em $1/500 \text{ s}$, a sensibilidade ISO 100, f-stop 2.8 e foco no infinito. As imagens foram adquiridas em formato RAW 36 bits, 12 bits por canal, o formato foi escolhido devido à ausência de qualquer tipo de processamento e compactação nas imagens obtidas pelo sensor, preservando assim todas as informações obtidas no momento de captura.

3.2.3 Avaliação da Qualidade das Imagens

Com o intuito de avaliar qualidade radiométrica em cada canal da câmera, uma análise prévia foi feita em laboratório. Para isso foi montado um experimento fazendo uso de luzes monocromáticas *light-emitting diode* (LED) (Figura 2).

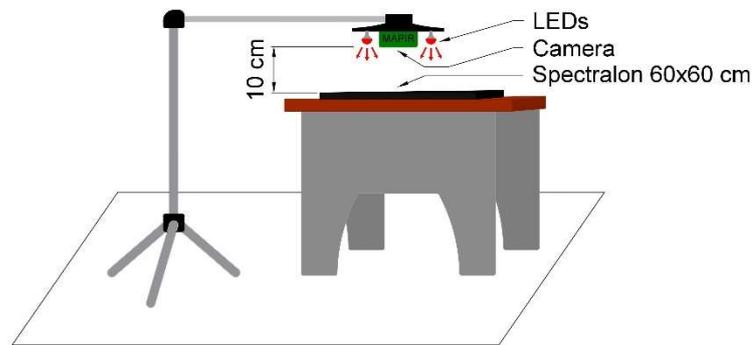


Figura 2. Estrutura montada para estudo da qualidade radiométrica da câmera modificada

Ao todo, cinco luzes monocromáticas foram utilizadas, sendo azul, verde, amarelo, vermelho e NIR. Um luxímetro foi usado para determinar a intensidade luminosa de cada LED e o espectrorradiômetro ASD HandHeld 2 foi utilizado para determinar a faixa de emitância de cada LED. As características dos Leds estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização dos LEDs usados para estudo da qualidade radiométrica da câmera modificada

Led	Banda (nm)	Potência (w)	Int. Luminosa (lux)
Azul	450-490	3	3200
Verde	530-590	3	15000
Amarelo	600-635	3	5500
Vermelho	645-685	3	7200
NIR	830-885	3	16700

Os LEDs iluminaram uma placa de *spectralon* que reflete 99% da radiação incidente, e foram registradas 5 imagens desta placa em cada uma das iluminações testadas. A configuração da câmera para este experimento foram as mesmas definidas para a obtenção das imagens de campo. Após a aquisição das imagens, a média dos números digitais (NDs) em cada canal nas diferentes iluminações foi calculada.

Outro teste para avaliar a qualidade radiométrica das imagens obtidas pelo sensor modificado foi o estudo da relação sinal ruído (SNR). Para este estudo utilizamos a razão entre

a média e o desvio padrão de uma superfície homogênea contida na cena para estimar a SNR (Equação 1), também utilizado por Hruska et al. (2012) e por (Lu e He. (2017).

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{Dpm}{Np} \right) \quad (1)$$

Em que:

SNR = Relação sinal ruído dado em decibéis;

Dpm = Número digital médio na superfície homogênea;

Np = Desvio padrão dos números digitais na superfície homogênea.

Ao todo, seis superfícies homogêneas foram utilizadas sendo elas o telhado de um banheiro (2,0 X 1,8 m), uma região de solo exposto (2,0 X 2,0), uma região em um lago (2,0 X 2,0), um alvo em cor preta (0,5 X 0,5 m), um alvo em cor branca (0,5 X 0,5 m), e um alvo em cor vermelha (0,5 X 0,5 m). Todas os alvos estavam presentes na área em estudo.

3.2.4 Mosaico de Imagens e Ortorretificação

Um total de quatro ortofotos foram geradas uma para cada dia de voo com resolução espacial aproximada de 3 cm. Para a construção das ortofotos foi utilizado o programa de computador de acesso aberto OpenDroneMap (ODM) versão 0.4.1 (“GitHub-OpenDroneMap/ODM”, [s.d.]). O ODM consiste em um conjunto de ferramentas desenvolvidas para processar e analisar imagens obtidas por ARPs.

Neste trabalho foi utilizado o aplicativo WebODM (“GitHub-OpenDroneMap/WebODM”, [s.d.]) que fornece interface para o ODM. O processo de construção do ortomosaico foi constituído por cinco etapas. Durante o processamento cerca de 90 imagens por data de coleta foram importadas para o WebODM. Neste processo os metadados das imagens foram extraídos, pois detinham as informações intrínsecas ao sensor e informações geográficas.

A segunda etapa da construção dos ortomosaicos consistiu no alinhamento. Essa etapa é tida como a mais importante da orrorretificação. Neste processo, o cálculo da posição de cada imagem é realizado, e essa posição é utilizada para a orientação precisa das fotos individuais e geração de uma nuvem de pontos tridimensional. Na terceira etapa foi realizado a densificação da nuvem de pontos tridimensional. A quarta etapa consistiu na geração do modelo digital de superfície (MDS), a partir da nuvem densa tridimensional. A quinta etapa consistiu na construção do ortomosaico a partir do MDS.

Em seguida, os ortomosaicos foram corrigidos geometricamente. Essa etapa foi realizada por meio do programa de computador QGIS (QGIS Development Team, 2019). Durante cada

vôo, seis pontos de controle foram adicionados na área em estudo. Estes pontos de controle foram georreferenciados e usados para corrigir as ortofotos. O georreferenciamento dos pontos de controle foi feito com o Receptor GNSS (Global Navigation Satellite System) topográfico, modelo Trimble ProXT (Trimble Inc., Estados Unidos).

3.2.5 Correção Radiométrica das Imagens

O monitoramento da maturação do cafeeiro consiste em um estudo temporal, conseqüentemente, para acompanhar as mudanças da maturação no decorrer do estudo, a normalização radiométrica relativa entre as imagens obtidas em diferentes datas foi necessária. Para a normalização entre as imagens, as Equações lineares (2) e (3) propostas por Hall et al. (1991) e adaptadas para uso com imagens obtidas por ARPs por Yu et al. (2016) foram utilizadas.

$$Black_{T1,k} = ak Black_{T2,k} + bk \quad (2)$$

$$White_{T1,k} = ak White_{T2,k} + bk \quad (3)$$

Em que:

$Black_{T1,k}$, $Black_{T2,k}$ são os NDs dos objetos escuros de referência na banda k de imagens registradas no momento T1 e T2;

$White_{T1,k}$, $White_{T2,k}$ são os NDs dos objetos claros de referência na banda k de imagens registradas no momento T1 e T2;

ak é a inclinação ou ganho, e bk é a intercepção ou deslocamento e são definidos com a resolução do sistema de equações lineares.

Os NDs de referência foram obtidos de alvos construídos em madeira e pintados com tinta fosca branca (alvo claro) e preto (alvo escuro). Estes alvos estavam contidos na área em estudo em todos os voos. As imagens obtidas no dia 29 de abril foram utilizadas como imagens de referência (T1) e as imagens nas outras datas foram normalizadas a partir da referência.

Após a normalização das imagens, os seus NDs foram então convertidos para reflectância, por meio de calibração vicária (DEL POZO et al., 2014). Alvos construídos em madeira e pintados com tinta fosca em quatro tons de cinza foram utilizados, esses alvos tiveram dimensões de 0,50 por 0,50 m e estavam presentes em todas as datas do estudo. Um modelo de regressão linear entre a média dos NDs dos alvos e a reflectância de laboratório dos mesmos foi ajustado para cada canal da câmera e para cada data de coleta (Figura 3). A reflectância dos

painéis foi obtida em laboratório utilizando o espectrorradiômetro ASD HandHeld 2, que opera na faixa de comprimento de onda de 325 nm a 1075 nm, precisão de ± 1 nm.

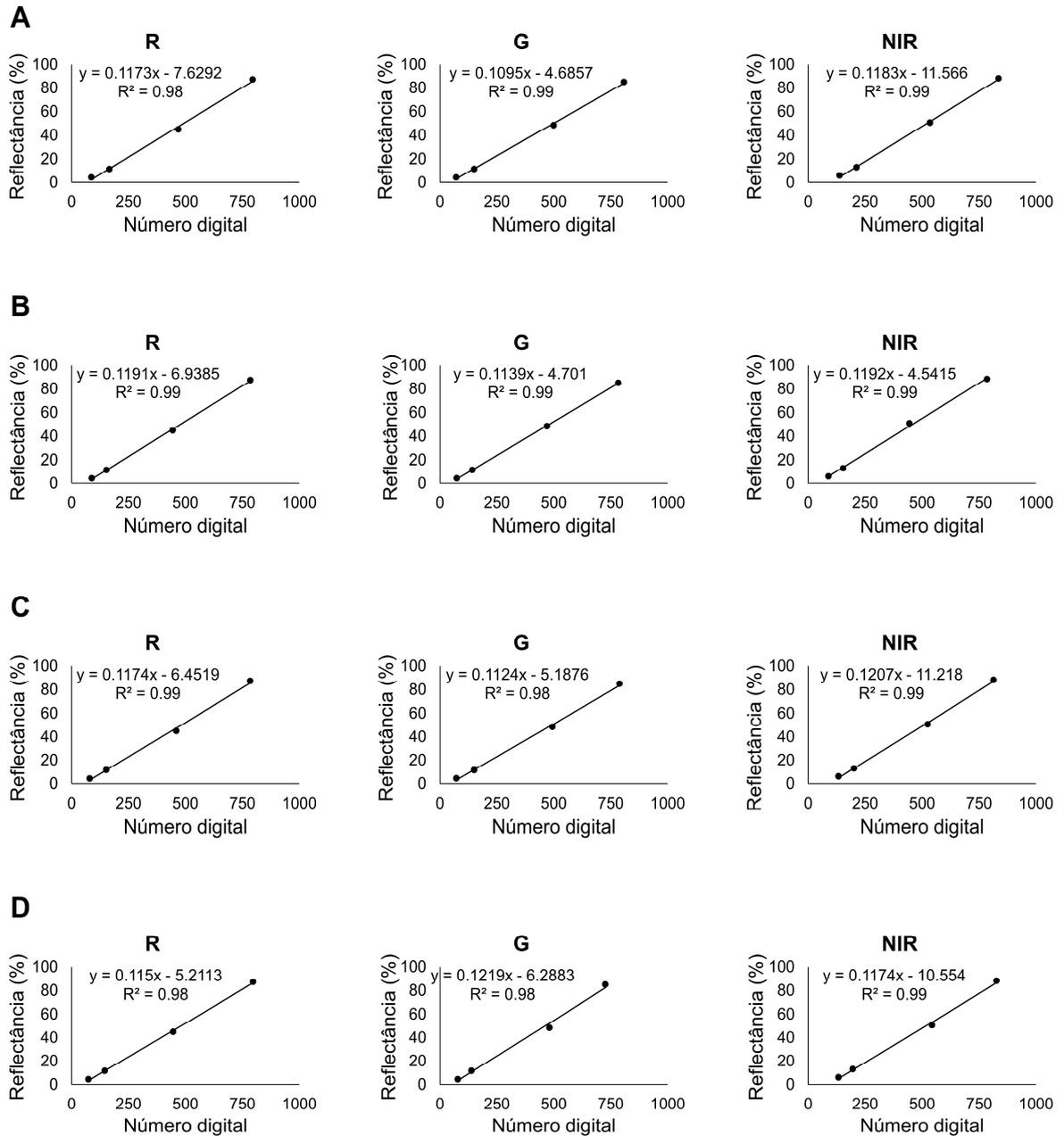


Figura 3. Modelos ajustados para a correção radiométrica dos três canais obtidos pela câmera modificada (A) no primeiro, (B) no segundo, (C) no terceiro e (D) no quarto dia de coleta NIR: Infravermelho próximo; R: vermelho; G: verde.

3.2.6 Coleta de Dados de Maturação e Obtenção das Variáveis Espectrais

Para a amostragem em campo, um *grid* irregular foi montado em cada data, e 20 pontos amostrais por hectare foram utilizados, sendo que no talhão 2 devido a grande maioria das plantas não apresentarem frutos, apenas 10 pontos por hectare foram coletados. Cada ponto

amostral foi constituído por 3 plantas localizadas lado a lado na mesma linha de cultivo. Foram escolhidos aleatoriamente quatro ramos plagiotrópicos no terço médio de cada planta, e cada ramo localizado em um quadrante. Após a escolha dos ramos, foi contabilizado ainda na planta, os frutos verdes e o total de frutos dos ramos.

A partir dos resultados obtidos nas contagens, a média de percentagem de frutos verdes foi calculada para cada ponto amostral. De posse das percentagens de frutos verdes, as plantas amostradas foram divididas em duas classes de maturação: aptas a colheita, em que a percentagem de frutos verdes < 30 % (M) e não aptas a colheita percentagem de frutos verdes \geq 30 % (V). Estas plantas foram georreferenciadas, para obtenção das variáveis espectrais posteriores.

Após a correção radiométrica das imagens multiespectrais, elas foram descarregadas em ambiente SIG. Fazendo uso do software QGIS um total de oito índices de vegetação foram calculados, sendo eles, GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*), MCARI1 (*Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index 1*), MTVI1 (*Modified Triangular Vegetation Index 1*), NDVI (*Normalized difference vegetation index*), NGRDI (*Normalized Red-Green Difference Index*), RVI (*Ratio vegetation index*), NRVI (*Normalized ratio vegetation index*), SR (*Simple ratio*). As equações usadas para o cálculo dos índices é apresentada na tabela 3.

Tabela 3. Índices de vegetação aplicados

Índice	Equação	Referencia
GNDVI	$\frac{\text{NIR} - \text{G}}{\text{NIR} + \text{G}}$	(GITELSON et al., 1996)
MCARI1	$1,2[2,5(\text{NIR} - \text{R}) - 1,3(\text{NIR} - \text{G})]$	(HABOUDANE et al., 2004)
MTVI1	$1,2[1,2(\text{NIR} - \text{G}) - 2,5(\text{R} - \text{G})]$	(HABOUDANE et al., 2004)
NDVI	$\frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}}$	(ROUSE et al., 1973)
NGRDI	$\frac{\text{G} - \text{R}}{\text{G} + \text{R}}$	(TUCKER, 1979)
RVI	$\frac{\text{R}}{\text{G} + \text{R}}$	(JORDAN, 1969)
NRVI	$\frac{\text{NIR}}{\text{RVI} - 1}$	(BARET; GUYOT, 1991)
SR	$\frac{\text{RVI} + 1}{\text{NIR}}$	(JORDAN, 1969)

NIR: Infravermelho próximo; R: vermelho; G: verde

Os critérios para a escolha dos índices foram que, para seus cálculos, as bandas existentes obtidas pela câmera modificada pudessem ser usadas, e que estes índices tivessem boa relação com o pigmento da vegetação ou boa relação com o estado nutricional das plantas. Após o cálculo dos IVs, máscaras poligonais foram criadas em cada ponto amostral envolvendo as três plantas amostradas, e a média dos valores dos índices foram extraídas.

3.2.7 Análise Estatística dos Dados

A análise de correlação linear de *Pearson*, ao nível de 5% de probabilidade, foi realizada entre a porcentagem de frutos verdes e os IVs para investigar a existência ou não de associação linear entre essas variáveis. Além disso, foi utilizada uma análise de variância (ANOVA) entre as classes de maturação M e V para comparar a média de cada variável espectral (IVs) em cada talhão estudado.

Por fim, para identificar os IVs de maior importância no monitoramento da maturação do cafeeiro e verificar a possibilidade de agrupar as plantas em grupos de plantas com frutos maduros ou verdes, a análise de componentes principais (ACP) foi usada. A ACP foi realizada individualmente em cada talhão. Os resultados da ACP foram apresentados em forma gráfica.

As análises estatísticas foram realizadas por meio do *software* R. A análise de correlação e a ANOVA foram realizadas usando o pacote *psych* (REVELLE, 2019). Para a ACP foi utilizado o pacote *FactoMineR* (LÊ et al., 2008) e seus resultados foram plotados usando o pacote *factoextra* (KASSAMBARA; MUNDT, 2016).

3.3 RESULTADOS

Os pré-testes feitos em laboratório mostram que existe uma sobreposição entre as bandas espectrais da câmera utilizada (Figura 3). O canal 1 (vermelho) apresentou sensibilidade para todas as iluminações testadas, com exceção da verde, tendo o ponto mais crítico quando incidido o LED NIR, onde registrou uma média do ND de 1862.82, este valor corresponde a 86.6 % do ND médio registrado no canal NIR na mesma circunstância. O canal 2 (verde) foi o que menos sobrepôs aos demais, apresentando apenas ligeira sensibilidade aos LEDs azul, amarelo e NIR. O canal 3 (NIR) foi sensível também aos LEDs azul, amarelo e vermelho, com destaque para a luz vermelha, onde registrou um ND médio 377.86, correspondendo a 24.58% do ND médio no canal vermelho na mesma condição. Em resumo o canal vermelho foi o que apresentou a maior sensibilidade a comprimentos de onda fora da faixa esperada.

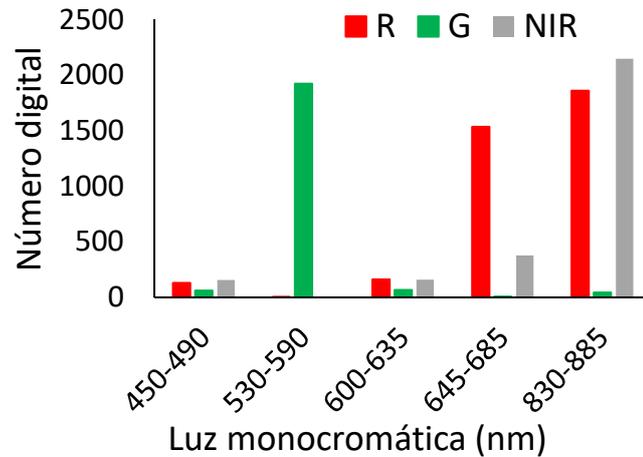


Figura 3. Sensibilidade dos diferentes canais da câmera modificada, submetidos a cinco diferentes iluminações monocromáticas

A elevada sensibilidade do canal vermelho ao infravermelho torna-se uma fonte de erro na mensuração da radiação emitida pelas superfícies em experimentos de campo, principalmente em estudos da vegetação, onde a reflectância na região do NIR é muito superior ao vermelho. O fato de o canal vermelho registrar também a radiação na faixa do NIR, faz com que os valores de NDs sejam superiores aos NDs do canal verde em situações em que se espera o contrário, como por exemplo em plantas de café com elevado vigor vegetativo (Figura 4).

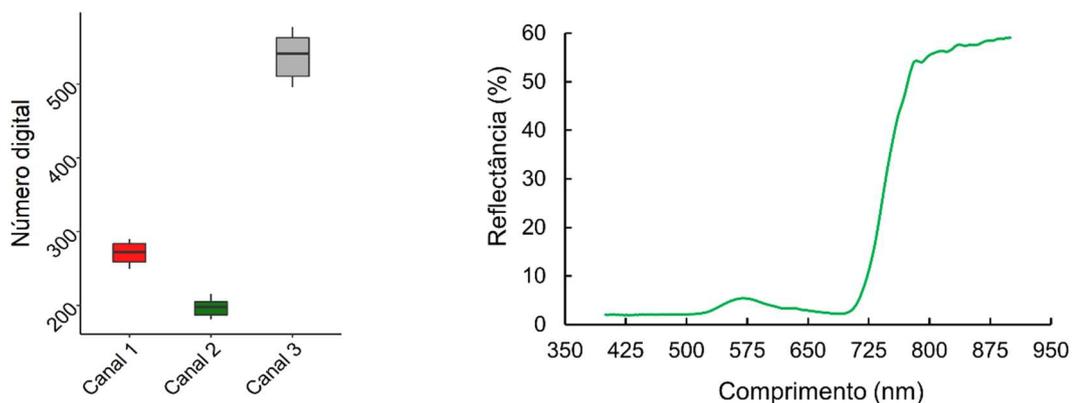


Figura 4. Resposta espectral de plantas de café com elevado vigor vegetativo. (A) boxplot da média de números digitais obtidos em 9 plantas de café, nos canais: 1 (vermelho), 2 (verde) e 3 (NIR). (B) assinatura espectral média de 9 plantas de café obtidas com espectrorradiômetro no campo

O estudo da relação sinal ruído mostrou que os três canais do sensor modificado apresentaram SNR superior a 20 dB em todas as superfícies avaliadas (Tabela 4). De modo geral o canal NIR apresentou as menores SNR, demonstrando que este canal é mais ruidoso em relação aos demais. A maior SNR foi obtida no canal vermelho 28,9 dB e ocorreu na superfície homogênea Alvo vermelho, já a menor 20,5 dB ocorreu no canal NIR na superfície homogênea Alvo branco.

Tabela 4. Relação sinal ruído dos três canais do sensor modificado em seis superfícies homogêneas expressa em decibéis (dB)

Canais	SH1	SH2	SH3	SH4	SH5	SH6
Red	26,3	27,2	24,5	21,9	21,7	28,9
Green	26,6	28,3	26,9	25,2	23,4	28,2
NIR	27,2	27,1	23,6	23,4	20,5	25,8

Telhado (SH1), uma região de solo exposto (SH2), uma região em um lago (SH3), um alvo em cor preta (SH4), um alvo em cor branca (SH5), um alvo em cor vermelha (SH6).

A análise de correlação linear entre os IVs e as porcentagens de frutos verdes é apresentada na tabela 5. Houve mudanças na resposta espectral com o avanço da maturação do café nos diferentes talhões estudados. No talhão 1 os IVs GNDVI, NDVI e NRVI apresentaram correlação positiva, já o RVI apresentou correlação negativa. No talhão 2 a característica espectral das plantas não sofreu alteração com o avanço da maturação, visto que nenhum dos IVs apresentaram correlação significativa. Os talhões em que a resposta espectral foi mais alterada no processo de amadurecimento dos frutos do cafeeiro foi o talhão 3 e no 5. No talhão 3 todos os índices se correlacionaram com o percentual de frutos verdes, já no talhão 5 apenas o NGRDI não foi correlacionado. No talhão 4 três índices apresentaram correlação significativa e positiva, os quais foram MCARI1, MTVI1 e NRVI. Em resumo na existência de correlação entre os IVs e a porcentagem de frutos verdes, para o NGRDI e o RVI as correlações foram negativas, já os demais IVs, a correlação foi positiva.

Tabela 5. Análise de correlação linear de *Pearson* entre a porcentagem de frutos verdes e os índices de vegetação utilizados no estudo

	GNDVI	MCARI1	MTVI1	NDVI	NGRDI	NRVI	RVI	SR
Talhão 1								
FV (%)	0,445*	0,165	0,116	0,441*	-0,310	0,459*	-0,460*	0,305
Talhão 2								
FV (%)	0,134	0,113	0,120	0,179	-0,045	0,098	-0,166	0,195
Talhão 3								
FV (%)	0,601*	0,603*	0,601*	0,612*	-0,385*	0,521*	-0,600*	0,628*
Talhão 4								
FV (%)	-0,140	0,381*	0,374*	0,211	0,204	0,258	-0,219	0,190
Talhão 5								
FV (%)	0,256*	0,461*	0,459*	0,305*	-0,053	0,261*	-0,291*	0,322*

* significativo ao nível de 5% de probabilidade.

As duas classes de estágio de maturação definidas M e V foram comparadas pela análise de variância (Tabela 6). Nos talhões 1 e 2 as médias das classes não se diferenciaram estatisticamente em nenhum dos IVs avaliados, em contraste no talhão 3 os valores médios das classes se diferiram em todos os índices estudados. Os índices MCARI1 e MTVI1 foram os mais sensíveis a maturação dos frutos, visto que suas médias se diferiram entre as classes de plantas contendo frutos maduros e frutos verdes no talhão 3, 4 e no 5. Os talhões em que as variáveis espectrais se diferenciaram também foram os que apresentaram a maior produtividade, com destaque para o talhão 3 e 4 em que a produtividade média foi de 62,5 e 41,6 sc ha⁻¹, as maiores entre os talhões estudados. Estes talhões também foram os que apresentaram as maiores densidades de plantas e os menores volumes de copa (Tabela 1). Por outro lado, nos talhões 1 e 2, onde a média entre as classes não se diferenciou em nenhuma das variáveis estudadas, as menores produtividades foram observadas, 20,2 e 8 sc ha⁻¹, respectivamente. Eles também foram os talhões em que as plantas tinham os maiores volumes de copa (Tabela 1).

Tabela 6. Análise de variância entre a média da classe representada por plantas contendo frutos verdes (V) e a média da classe representada por plantas contendo frutos maduros (M), realizada para os oito IVs, individualmente em cada talhão

	Talhão 1			Talhão 2			Talhão 3		
	$\bar{V} \pm EP$	$\bar{M} \pm EP$	p-value	$\bar{V} \pm EP$	$\bar{M} \pm EP$	p-value	$\bar{V} \pm EP$	$\bar{M} \pm EP$	p-value
GNDVI	0,467 ± 0,002	0,457 ± 0,008	0,119	0,456 ± 0,001	0,453 ± 0,003	0,318	0,461 ± 0,002	0,441 ± 0,004	0,000***
MCARI1	0,076 ± 0,005	0,07 ± 0,007	0,554	0,09 ± 0,002	0,082 ± 0,005	0,166	0,088 ± 0,002	0,058 ± 0,004	0,000***
MTVI1	0,041 ± 0,003	0,039 ± 0,004	0,795	0,049 ± 0,001	0,045 ± 0,003	0,170	0,046 ± 0,001	0,03 ± 0,002	0,000***
NDVI	0,324 ± 0,001	0,323 ± 0,001	0,605	0,322 ± 0,001	0,32 ± 0,002	0,307	0,32 ± 0,001	0,304 ± 0,004	0,000***
NGRDI	-0,168 ± 0,002	-0,16 ± 0,008	0,157	-0,158 ± 0,001	-0,156 ± 0,002	0,507	-0,165 ± 0,001	-0,158 ± 0,002	0,002**
NRVI	-0,337 ± 0,001	-0,338 ± 0,001	0,397	-0,336 ± 0,001	-0,338 ± 0,002	0,371	-0,336 ± 0,001	-0,346 ± 0,002	0,000***
RVI	0,511 ± 0,002	0,513 ± 0,002	0,524	0,513 ± 0,001	0,516 ± 0,002	0,353	0,516 ± 0,002	0,535 ± 0,005	0,000***
SR	1,965 ± 0,006	1,968 ± 0,008	0,791	1,956 ± 0,004	1,946 ± 0,007	0,252	1,948 ± 0,005	1,884 ± 0,014	0,000***
N	29	9		68	20		51	24	

	Talhão 4			Talhão 5		
	$\bar{V} \pm EP$	$\bar{M} \pm EP$	p-value	$\bar{V} \pm EP$	$\bar{M} \pm EP$	p-value
GNDVI	0,46 ± 0,002	0,466 ± 0,003	0,000***	0,448 ± 0,002	0,446 ± 0,004	0,631
MCARI1	0,105 ± 0,003	0,088 ± 0,006	0,004**	0,087 ± 0,002	0,064 ± 0,004	0,000***
MTVI1	0,058 ± 0,002	0,047 ± 0,003	0,002**	0,047 ± 0,001	0,034 ± 0,002	0,000***
NDVI	0,328 ± 0,0004	0,326 ± 0,001	0,033*	0,314 ± 0,002	0,31 ± 0,003	0,296
NGRDI	-0,156 ± 0,002	-0,166 ± 0,003	0,017*	-0,157 ± 0,002	-0,159 ± 0,002	0,615
NRVI	0,334 ± 0,001	0,337 ± 0,001	0,019*	-0,338 ± 0,002	-0,344 ± 0,002	0,115
RVI	0,507 ± 0,0004	0,509 ± 0,001	0,028*	0,524 ± 0,002	0,528 ± 0,004	0,338
SR	1,977 ± 0,002	1,969 ± 0,005	0,053	1,922 ± 0,007	1,904 ± 0,013	0,242
N	42	18		45	15	

*** significativo a 0.1 % de probabilidade; ** significativo a 1 % de probabilidade; * significativo a 5 % de probabilidade; \bar{M} : média do índice de vegetação nas plantas contendo frutos maduros; \bar{V} : média do índice de vegetação nas plantas contendo frutos verdes; EP: erro padrão da média.

A análise de componentes principais demonstrou que os dois primeiros componentes foram capazes de explicar mais de 75% da variância existente nos conjuntos de dados, em todos os talhões. A figura 5 contém os plotes entre as PC1 e PC2 referente aos 5 talhões estudados, junto a estes encontra-se os vetores referente as variáveis originais. De modo geral houve um padrão na importância das variáveis nos dois primeiros componentes para os diferentes talhões. No PC1 os IVs que tiveram maior importância foram o GNDVI, NDVI, RVI e o SR, já no PC2 os IVs MTVI1, MCARI1 e NGRDI foram os mais importantes, com exceção dos talhões 3 e 4, que apenas os dois primeiros IVs apresentaram maiores contribuições.

Os plotes das ACPs apoiam a dificuldade de discriminar plantas com frutos maduros de plantas com frutos verdes nos talhões 1 e 2. Nos demais talhões é possível observar um padrão de agrupamento em dois grupos, triângulos amarelos representando as plantas com frutos verdes, enquanto que pontos azuis as plantas com frutos maduros. Nos talhões 3 e 4 foi observado com maior clareza a discriminação entre os dois grupos formados. A maior dimensão dos vetores que representam os IVs MTVI1 e MCARI1 nos talhões 3 e 4 mostram sua elevada importância para a discriminação dos dois grupos formados.

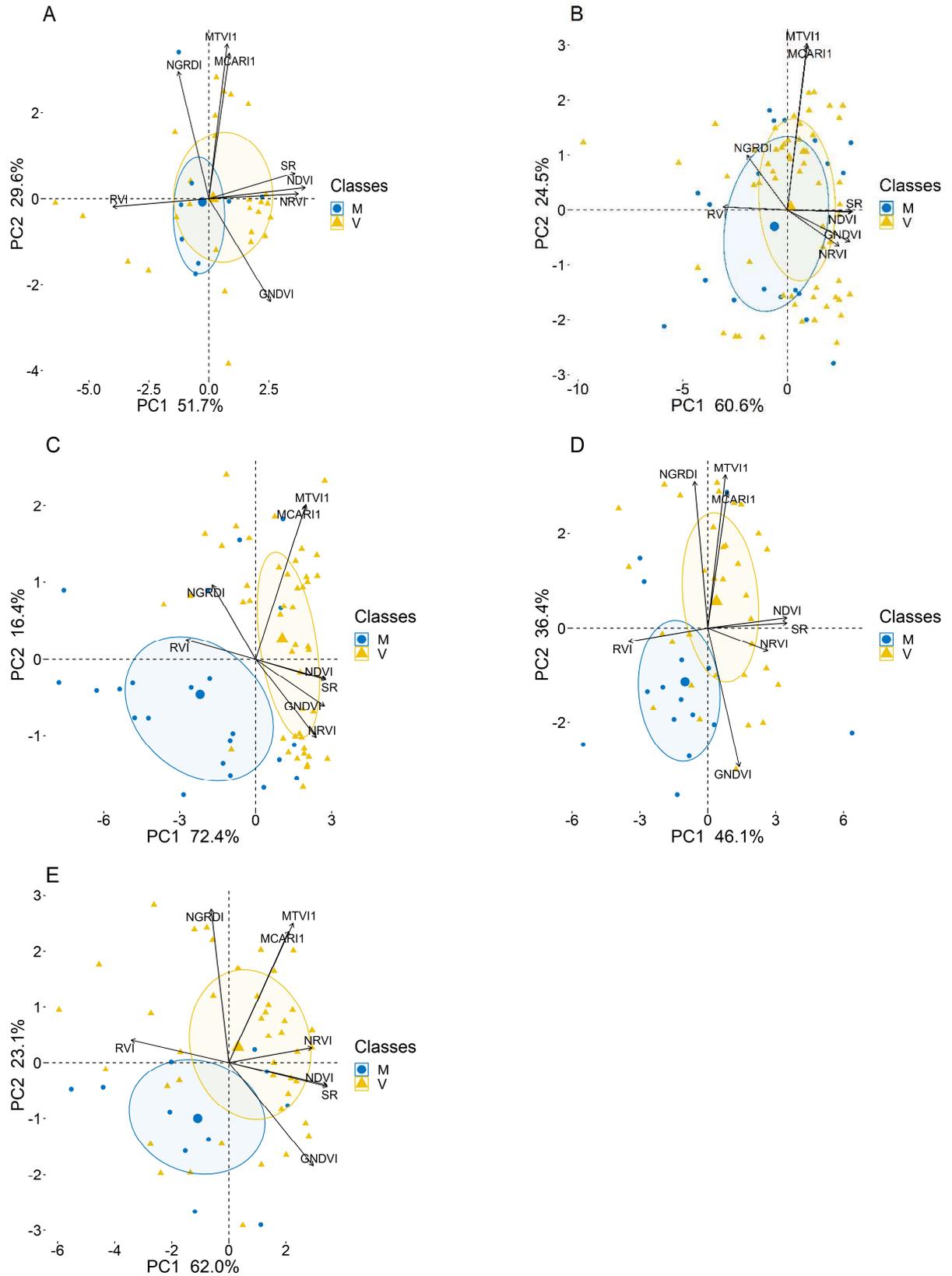


Figura 5. Resultados da análise de componentes principais (ACP) para os índices de vegetação referente as plantas amostradas no campo

Elipses traçadas seguindo distribuição t com probabilidade de 95% de confiança. Talhão 1 (A), Talhão 2 (B), Talhão 3 (C), Talhão 4 (D), talhão 5 (E). M: plantas com frutos maduros e V plantas com frutos verdes.

3.4 DISCUSSÃO

A existência de sobreposição entre as bandas espectrais é comum em câmeras modificadas (COBURN et al., 2018; LOGIE; COBURN, 2018; CORTI et al., 2019). A utilização de filtros que impedem a passagem de NIR em câmeras RGB, antes da rede de nano filtros da matriz de Bayer, tem a função de impedir a poluição dos canais na região do visível. A necessidade de um filtro NIR para adquirir bandas na região do visível se deve a dois fatores: primeiro, ao fato de que o diodo de silício que constitui os CMOs é sensível ao NIR; e segundo, os filtros passa banda usados na matriz de Bayer nem sempre são capazes de filtrar 100% do NIR (LEBOURGEOIS et al., 2008). Na câmera usada neste estudo o filtro NIR foi removido, para que no canal azul fosse registrado NIR, mas em caráter prático o canal vermelho foi afetado, visto que o canal também é sensível ao NIR.

Outro fato que deve ser levado em consideração quando pretende-se utilizar um único sensor para a aquisição de imagens multiespectrais é a sensibilidade dos CMOs, que não é a mesma para diferentes comprimentos de onda nele incidido (LULÉ et al., 2000). Em câmeras modificadas, como a utilizada neste estudo, as mesmas configurações de abertura de obturador e ISO são mantidas para todos os canais uma vez que o mesmo sensor é usado para obter as diferentes bandas. Trabalhos realizados por Lebourgeois et al. (2008) superaram essa limitação de câmeras modificadas, usando uma câmera RGB sem modificação e uma outra câmera para obter NIR, e assim obter imagens multiespectrais, dessa forma, conhecendo-se a sensibilidade do CMOs utilizado, o tempo de exposição e a sensibilidade do sensor podem ser ajustados para superar o problema mencionado. Segundo Rabatel et al. (2014), essas limitações relacionadas a sensibilidade sensor, também podem ser superadas por meio de simulação de banda por projeção ortogonal, caso se conheça a curva de sensibilidade do sensor (nem sempre é uma informação fácil de se obter) dessa forma melhores resultados são alcançados quando pretende-se usar apenas um sensor. No entanto, este método piora a relação sinal ruído das imagens obtidas.

A presença de ruído gerado pela radiação NIR no canal vermelho fez com que os NDs de seus pixels fossem superestimados, pois esse valor é um somatório da radiação vermelha e parte da radiação NIR refletida pelas superfícies. Resultados encontrados por Lu e He. (2017) assemelham-se a características espectrais encontradas neste trabalho, onde valores digitais no canal azul foram superiores aos do canal verde quando se registrou imagens da vegetação

fazendo uso de uma câmera modificada. A relação entre o número digital bruto da imagem é a refletância das superfícies assume comportamento linear como demonstrado por Wang e Myint, (2015) e por Iqbal et al. (2018) portanto, números digitais brutos baixos são esperados em superfícies de baixa refletância, caso isso não ocorra a calibração radiométricas dessas imagens apresentará erros elevados.

A SNR é um importante parâmetro de qualidade das imagens multiespectrais. Baixas SNR indicam imagens ruidosas, com valores de pixels que não descrevem a realidade com exatidão. Imagens com grande presença de ruído induzem a sérios erros quando pretende-se trabalhar com características quantitativas. A SNR encontrada neste estudo foi superior a resultados considerados aceitáveis por Lu e He. (2017), de 14 dB para um sensor modificado.

A mudança na resposta espectral das plantas de café com o avanço da maturação de seus frutos foi diferente em todos os talhões estudados. A produtividade dos talhões mostrou-se uma variável muito importante quando pretende-se monitorar a maturação do cafeeiro. Os talhões com maior produtividade foram os que mais tiveram suas características espectrais influenciadas. A fase final da formação do fruto de café demanda grandes quantidades de nutrientes, e esses nutrientes tendem a ser translocados das folhas para os frutos conforme demonstrado por Laviola et al. (2009). Plantas com maiores rendimentos de campo tendem a translocar maiores concentrações de nutrientes quando comparado com plantas de menores rendimentos, podendo até causar deficiência de nutrientes que tem acentuada mobilidade nos tecidos vegetais, como por exemplo os macronutrientes (AMARAL et al., 2001; LAVIOLA et al., 2009). As translocações fisiológicas de nutrientes das folhas para os frutos podem alterar a assinatura espectral da planta, o que torna possível inferir sobre o estágio de maturação dos frutos.

Por outro lado, a interação entre a produtividade do talhão e o volume de copa também pode ser uma característica importante para estudos como este. Os talhões 3 e 4, além de apresentarem maior produtividade, também apresentaram menores volumes de copa. Essa combinação faz com que maiores quantidades de frutos estejam expostas, para que no momento da aquisição das imagens suas informações espectrais sejam obtidas. No processo de maturação a coloração dos frutos muda de verde para vermelho ou para amarelo, espera-se que essa nova coloração cause mudanças perceptíveis na assinatura espectral das plantas e, quanto maior a produção de frutos maior vai ser esta mudança.

Os IVs MCARI1 e MTVI1 foram os mais sensíveis as alterações causadas pelo processo de maturação do café, visto que a análise de variância revelou diferença estatística entre os seus valores em plantas com frutos maduros e plantas com frutos verdes em três dos cinco talhões

estudados. Estes índices são sensíveis as variações de clorofila nos tecidos vegetais conforme demonstrado por Vincini et al. (2007), Huang et al. (2015) e Sonobe e Wang (2017). A alteração nestes índices no período de maturação dos frutos de café pode ser em decorrência do decaimento nos teores de nitrogênio foliar nesta fase fenológica da cultura, em função da síntese de antioxidantes nos frutos, que os levam a requerer reservas de nitrogênio foliar, conforme demonstrado por Reis et al. (2015).

3.5 CONCLUSÃO

O sensor modificado abordado do ARP mostrou potencial para o monitoramento temporal da cultura do café em regiões de montanha, visto que foi capaz de registrar as mudanças espectrais ocorridas nas plantas de café. Os índices de vegetação foram sensíveis a mudança da maturação dos frutos de café no decorrer do tempo estudado.

A produtividade e o volume de copa das plantas de café foram variáveis que influenciaram no monitoramento temporal da maturação do café.

3.6 REFERÊNCIAS

- ALBETIS, J.; JACQUIN, A.; GOULARD, M.; POILVÉ, H.; ROUSSEAU, J.; CLENET, H.; DEDIEU, G.; DUTHOIT, S. On the potentiality of UAV multispectral imagery to detect Flavescence dorée and Grapevine Trunk Diseases. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1, 2019.
- AMARAL, J. A. T.; DA MATTA, F. M.; RENA, A. B. Effects of fruiting on the growth of arabica coffee trees as related to carbohydrate and nitrogen status and to nitrate reductase activity. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, n. 1, p. 66–74, 2001.
- APARECIDO, L. E. DE O.; ROLIM, G. DE S.; DEMORAES, J. R. DA S. C.; VALERIANO, T. T. B.; LENSE, G. H. E. Maturation periods for Coffea arabica cultivars and their implications for yield and quality in Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 10, p. 3880–3891, 2018.
- BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, p. 161–173, 1991.
- BATISTOTI, J.; MARCATO, J.; ÍTAVO, L.; MATSUBARA, E.; GOMES, E.; OLIVEIRA, B.; SOUZA, M.; SIQUEIRA, H.; FILHO, G. S.; AKIYAMA, T.; GONÇALVES, W.; LIESENBERG, V.; LI, J.; DIAS, A. Estimating pasture biomass and canopy height in Brazilian Savanna using UAV photogrammetry. **Remote Sensing**, v. 11, n. 20, p. 1–12, 2019.
- CASTRO, R. D. DE; MARRACCINI, P. Cytology , biochemistry and molecular changes during coffee fruit development. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, n. 1, p. 175–199, 2006.
- CHENG, B.; FURTADO, A.; SMYTH, H. E.; HENRY, R. J. Influence of genotype and environment on coffee quality. **Trends in Food Science & Technology**, v. 57, p. 20–30, 2016.
- COBURN, C. A.; SMITH, A. M.; LOGIE, G. S.; KENNEDY, P. Radiometric and spectral comparison of inexpensive camera systems used for remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 15–16, p. 4869–4890, 2018.
- CORTI, M.; CAVALLI, D.; CABASSI, G.; VIGONI, A.; DEGANO, L.; MARINO GALLINA, P. Application of a low-cost camera on a UAV to estimate maize nitrogen-related variables. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 4, p. 675–696, 2019.
- DEL POZO, S.; RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, P.; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D.; FELIPE-GARCÍA, B. Vicarious radiometric calibration of a multispectral camera on board an unmanned aerial system. **Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1918–1937, 2014.
- FAGAN, E. B.; SOUZA, C. H. E. DE; PEREIRA, N. M. B.; MACHADO, V. J. Efeito do tempo de formação do grão de café (coffea sp) na qualidade da bebida effect of time on coffe bean (coffea sp) growth in cup quality. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 5, p. 729–738, 2011.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS- MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 289–298, 1996.

GitHub-OpenDroneMap/ODM. Disponível em: <<https://github.com/OpenDroneMap/ODM/>>. Acesso em: 15 maio. 2019.

GitHub-OpenDroneMap/WebODM. Disponível em: <<https://github.com/OpenDroneMap/WebODM/>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

GLOESS, A. N.; SCHÖNBÄCHLER, B.; KLOPPROGGE, B.; D'AMBROSIO, L.; CHATELAIN, K.; BONGARTZ, A.; STRITTMATTER, A.; RAST, M.; YERETZIAN, C. Comparison of nine common coffee extraction methods : instrumental and sensory analysis. **European Food Research and Technology**, p. 607–627, 2013.

GUIMARÃES, E. R.; LEME, P. H. M. V.; DE REZENDE, D. C.; PEREIRA, S. P.; DOS SANTOS, A. C. The brand new Brazilian specialty coffee market. **Journal of Food Products Marketing**, v. 25, n. 1, p. 49–71, 2019.

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; PATTEY, E.; ZARCO-TEJADA, P. J.; STRACHAN, I. B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 3, p. 337–352, 2004.

HALL, F. G.; STREBEL, D. E.; NICKESON, J. E.; GOETZ, S. J. Radiometric Rectification : Toward a Common Radiometric Response Among Multidate , Multisensor Images. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, p. 11–27, 1991.

HEIM, R.; WRIGHT, I.; SCARTH, P.; CARNEGIE, A.; TAYLOR, D.; OLDELAND, J. Multispectral, Aerial Disease Detection for Myrtle Rust (*Austropuccinia psidii*) on a Lemon Myrtle Plantation. **Drones**, v. 3, n. 1, p. 25, 2019.

HRUSKA, R.; MITCHELL, J.; ANDERSON, M.; GLENN, N. F. Radiometric and geometric analysis of hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle. **Remote Sensing**, v. 4, n. 9, p. 2736–2752, 2012.

HUANG, S.; MIAO, Y.; ZHAO, G.; YUAN, F.; MA, X.; TAN, C.; YU, W.; GNYP, M. L.; LENZ-WIEDEMANN, V. I. S.; RASCHER, U.; BARETH, G. Satellite remote sensing-based in-season diagnosis of rice nitrogen status in Northeast China. **Remote Sensing**, v. 7, n. 8, p. 10646–10667, 2015.

IQBAL, F.; LUCIEER, A.; BARRY, K. Simplified radiometric calibration for UAS-mounted multispectral sensor. **European Journal of Remote Sensing**, v. 51, n. 1, p. 301–313, 2018.

JORDAN, C. F. . Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. Wiley on behalf of the Ecological Society of America Stable, v. 50, n. 4, p. 663–666, 1969.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. Package ‘factoextra’ - Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses, 2016.

- LAVIOLA, B. G.; MARTINEZ, H. E. P.; DE SOUZA, R. B.; SALOMÃO, L. C. C.; CRUZ, C. D. Macronutrient accumulation in coffee fruits at Brazilian zona da mata conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 32, n. 6, p. 980–995, 2009.
- LÊ, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR: An R package for multivariate analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, n. 1, p. 1–18, 2008.
- LEBOURGEOIS, V.; BÉGUÉ, A.; LABBÉ, S.; MALLAVAN, B. Can Commercial Digital Cameras Be Used as Multispectral. p. 7300–7322, 2008.
- LELONG, C. C. D.; BURGER, P.; JUBELIN, G.; ROUX, B.; LABBÉ, S.; BARET, F. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. **Sensors**, v. 8, n. 5, p. 3557–3585, 2008.
- LIMA-CUETO, F. J.; BLANCO-SEPÚLVEDA, R.; GÓMEZ-MORENO, M. L.; GALACHO-JIMÉNEZ, F. B. Using vegetation indices and a UAV imaging platform to quantify the density of vegetation ground cover in olive groves (*Olea Europaea* L.) in Southern Spain. **Remote Sensing**, v. 11, n. 21, 2019.
- LOGIE, G. S. J.; COBURN, C. A. An investigation of the spectral and radiometric characteristics of low-cost digital cameras for use in UAV remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 15–16, p. 4891–4909, 2018.
- LU, B.; HE, Y. Species classification using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) -acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 128, p. 73–85, 2017.
- LULÉ, T.; BENTHIEN, S.; KELLER, H.; MUÛTZE, F.; RIEVE, P.; SEIBEL, K.; SOMMER, M.; BOÖHM, M. Sensitivity of CMOS based imagers and scaling perspectives. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 47, n. 11, p. 2110–2122, 2000.
- MARIN, D. B.; ALVES, M. DE C.; POZZA, E. A.; BELAN, L. L.; FREITAS, M. L. DE O. Multispectral radiometric monitoring of bacterial blight of coffee. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 5, p. 959–982, 2019.
- NAVROZIDIS, I.; ALEXANDRIDIS, T. K.; DIMITRAKOS, A.; LAGOPODI, A. L.; MOSHOU, D.; ZALIDIS, G. Identification of purple spot disease on asparagus crops across spatial and spectral scales. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 148, n. October 2017, p. 322–329, 2018.
- NIJLAND, W.; JONG, R. DE; JONG, S. M. DE; WULDER, M. A.; BATER, C. W.; COOPS, N. C. Agricultural and Forest Meteorology Monitoring plant condition and phenology using infrared sensitive consumer grade digital cameras. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 184, p. 98–106, 2014.
- PASETO, L.; PATINO, M. T. O. Recognition of Key Drivers to the Improvement of Competitiveness Strategies in Brazilian Coffee. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 6, n. 7, p. 188–196, 2019.

PIMENTA, C. J.; ANGÉLICO, C. L.; CHALFOUN, S. M. Challenges in coffee quality: Cultural, chemical and microbiological aspects. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 42, n. 4, p. 337–349, 2018.

PUTRA, B. T. W.; SONI, P. Evaluating NIR-Red and NIR-Red edge external filters with digital cameras for assessing vegetation indices under different illumination. **Infrared Physics and Technology**, v. 81, p. 148–156, 2017.

QGIS Documentation. Disponível em: <<https://www.qgis.org/en/docs/index.html>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

RABATEL, G.; GORRETTA, N.; LABBÉ, S. Getting simultaneous red and near-infrared band data from a single digital camera for plant monitoring applications: Theoretical and practical study. **Biosystems Engineering**, v. 117, n. 1, p. 2–14, 2014.

RAMIREZ, G. M.; ZULLO JÚNIOR, J. Estimation of biophysical parameters of coffee fields based on high-resolution satellite images. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 3, p. 468–479, 2010.

REIS, A. R.; FAVARIN, J. L.; GRATÃO, P. L.; CAPALDI, F. R.; AZEVEDO, R. A. Antioxidant metabolism in coffee (*Coffea arabica* L.) plants in response to nitrogen supply. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 27, p. 203–213, 2015.

REVELLE, W. Package “psych” -Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research, 2019. Disponível em: <https://personality-project.org/r/psych>

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W.; FREDEN, S. C. No Title Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings of 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 **Symposium. Anais...**1973

SIMÕES, R. D. O.; FARONI, L. R. D.; QUEIROZ, D. M. DE. Qualidade dos grãos de café (*coffea arábica* l.) Em coco processados por via seca. **Revista caatinga**, v. 21, n. 2, p. 139–146, 2008.

SIQUEIRA, H. H. DE; ABREU, C. M. P. DE. Composição físico-química e qualidade do café submetido a dois tipos de torração e com diferentes formas de processamento. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n. 1, p. 112–117, 2006.

SITTIPOD, S.; SCHWARTZ, E.; PARAVISINI, L.; PETERSON, D. G. Identification of flavor modulating compounds that positively impact coffee quality. **Food Chemistry**, v. 301, n. March, 2019.

SONOBE, R.; WANG, Q. Hyperspectral indices for quantifying leaf chlorophyll concentrations performed differently with different leaf types in deciduous forests. **Ecological Informatics**, v. 37, p. 1–9, 2017.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127–150, 1979.

VARÃO, T.; MARCONDES, D.; PEREIRA, B.; ANCHIETA, J.; NETO, G. Prediction of black, immature and sour defective beans in coffee blends by using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. **Food Chemistry**, v. 278, n. November 2018, p. 223–227, 2019.

VINCINI, M.; FRAZZI, E.; D’ALESSIO, P. Narrow-band vegetation indexes from hyperion and directional CHRIS/PROBA data for canopy chlorophyll density estimation in maize. **European Space Agency**, (Special Publication) ESA SP, n. SP-636, 2007.

VOLSI, B.; TELLES, T. S.; CALDARELLI, C. E.; CAMARA, M. R. G. DA. The dynamics of coffee production in Brazil. **Plos One**, v. 14, n. 7, p. e0219742, 2019.

WANG, C.; MYINT, S. W. A Simplified Empirical Line Method of Radiometric Calibration for Small Unmanned Aircraft Systems-Based Remote Sensing. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 8, n. 5, p. 1876–1885, 2015.

XAVIER, T. W. F.; SOUTO, R. N. V.; STATELLA, T.; GALBIERI, R.; SANTOS, E. S.; SULI, G. S.; ZEILHOFER, P. Identification of Ramularia Leaf Blight Cotton Disease Infection Levels by Multispectral, Multiscale UAV Imagery. **Drones**, v. 3, n. 2, p. 33, 2019.

YU, N.; LI, L.; SCHMITZ, N.; TIAN, L. F.; GREENBERG, J. A.; DIERS, B. W. Development of methods to improve soybean yield estimation and predict plant maturity with an unmanned aerial vehicle based platform. **Remote Sensing of Environment**, v. 187, p. 91–101, 2016.

ZHANG, C.; KOVACS, J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 693–712, 2012.

4 CONCLUSÃO GERAL

De modo geral, pelos resultados obtidos neste trabalho, pôde-se concluir que:

Materiais de baixo custo podem ser usados para a calibração radiométrica de imagens multiespectrais obtidas por sensores a bordo de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) com êxito. No entanto, alguns materiais alternativos podem gerar menores erros no processo de calibração, como por exemplo madeira compensada pintada, e outros podem gerar maiores erros como por exemplo a lona de PVC. Os materiais alternativos possuem baixa durabilidade cerca de 15 a 30 horas, contudo, seus custos ficam em torno de 0,01 a 0,02% do custo do *spectralon*.

As imagens multiespectrais obtidas por ARPs apresentaram grande potencial para monitorar a maturação dos frutos de café, visto que em três dos cinco talhões estudados houve discriminação das características espectrais de plantas contendo frutos verdes e plantas contendo frutos maduros. Entretanto, a carga de frutos nas plantas influenciou as mudanças na sua assinatura espectral durante o processo de maturação das plantas.

Dentre os índices de vegetação usados no estudo do monitoramento da maturação do café os índices MCARI1 e MTVI1 foram os que mais mudaram durante o processo de maturação dos frutos.