



**GLEYDSON ANTÔNIO DE OLIVEIRA CAMPOS**

**MONITORAMENTO DE CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS E  
VIGOR DE CULTIVARES DE CAFÉ POR CIÊNCIA DE SENSORIAMENTO  
REMOTO MULTISENSOR**

**LAVRAS -MG**

**2020**

**GLEYDSON ANTÔNIO DE OLIVEIRA CAMPOS**

**MONITORAMENTO DE CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS E  
VIGOR DE CULTIVARES DE CAFÉ POR CIÊNCIA DE SENSORIAMENTO  
REMOTO MULTISENSOR**

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

Orientador

Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves

**LAVRAS -MG**

**2020**

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

Campos, Gleydson Antônio de Oliveira.

Monitoramento de características morfométricas e vigor de  
cultivares de café por ciência de Sensoriamento Remoto  
Multisensor / Gleydson Antônio de Oliveira Campos. - 2020.  
57 p. : il.

Orientador(a): Marcelo de Carvalho Alves.

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

Bibliografia.

1. *Machine Learning*. 2. Ndvi. 3. Cafeicultura. I. Alves,  
Marcelo de Carvalho. II. Título.

**GLEYDSON ANTÔNIO DE OLIVEIRA CAMPOS**

**MONITORAMENTO DE CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS E VIGOR  
DE CULTIVARES DE CAFÉ POR CIÊNCIA DE SENSORIAMENTO REMOTO  
MULTISENSOR**

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

Aprovada em 08 de dezembro de 2020.

Dr. Marcelo de Carvalho Alves UFLA

Dr. Mário Lúcio V. Resende - UFLA

Dr. Gladyston Rodrigues Carvalho - FAPEMIG

Orientador

Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves

**LAVRAS – MG**

**2020**

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de aprimorar o conhecimento.

Ao professor Dr. Marcelo de Carvalho Alves, pela orientação, paciência e compartilhamento do conhecimento na área de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

Ao amigo Dr. Jonathan da Rocha Miranda pelo auxílio com os voos de SISANT na área de estudo e tratamento dos dados.

Ao professor Dr. Mário Lúcio Vilela Resende, pela atenção e colaboração com a pesquisa.

Ao pesquisador Dr. Gladyston Rodrigues Carvalho, pelo apoio e esclarecimento de dúvidas.

Ao graduando José Ferreira Leite Neto pelo auxílio na coleta de dados.

Muito obrigado!

## RESUMO GERAL

Com o uso do sensoriamento remoto foi possível obter informações em baixas altitudes de voo e com altíssima resolução espacial, na cafeicultura. Objetivou-se desenvolver e avaliar técnicas para monitorar características morfométricas e o vigor vegetativo do cafeeiro com dados obtidos por medições diretas e indiretas *in situ*, monitoramento aéreo por imagens RGB ortorretificadas em 2 altitudes de voo e imageamento multiespectral da órbita da Terra utilizando as bandas 4 e 8 do vermelho e, do infravermelho, respectivamente. O estudo foi conduzido na área experimental do INCT do Café, na Universidade Federal de Lavras. A coleta de dados *in situ* foi realizada com os equipamentos, régua graduada topográfica, sensor de NDVI Greenseeker™, e o sensor de índice de área foliar, LAI2000 de forma comparativa ao monitoramento aéreo com o SISANT DJI Phantom 4 e, orbital, com o Sentinel 2A. Foi coletado pontos para obtenção da altura de planta, diâmetro de copa, índice vegetativo de diferença normalizada (NDVI) e índice de área foliar (IAF) de 20 cultivares de cafeeiro arábica nos meses de junho a agosto de 2019. Foram realizados dois levantamentos aéreos por meio da SISANT na altura de 30 e 70 metros e para mesma data em que foi realizado o imageamento com Sentinel 2A, por volta das 11:00 a.m. Foram calculados o modelo de elevação da superfície e do terreno e, pela diferença das imagens, foi obtida a altura das plantas. Foram calculados o IAF, para os dados coletados *in situ* e altura de planta e diâmetro da copa extraído das imagens do SISANT. Com relação ao NDVI, foram utilizados algoritmos de *Machine Learning* por *Random Forest* e Regressão Múltipla Linear para calibrar o NDVI do SISANT com base no NDVI das plantas medidas *in situ* com o Greenseeker™ e outro modelo equiparável ao NDVI obtido pelo imageamento com o Sentinel 2A. Foi possível determinar um valor de vigor de NDVI de SISANT RGB para monitorar a copa de 20 cultivares de café com valor de  $R^2$  igual a 0,72. Com relação a morfometria da copa das plantas, a altura das plantas medidas por processamento de imagens do SISANT foi próxima ao determinado *in situ*, com diferença média inferior a 0,15m.

Palavras chave: *Machine Learning*, NDVI, Cafeicultura.

# REMOTE SENSING MULTISENSOR SCIENCE MONITORING MORPHOMETRIC FEATURES AND VIGOR OF COFFEE CROP CULTIVARS

## GENERAL ABSTRACT

With the use of remote sensing it was possible to obtain information at low flight altitudes and with very high spatial resolution, in coffee growing. The objective was to develop and evaluate techniques to monitor the morphometric characteristics and the vegetative vigor of the coffee tree with data obtained by direct and indirect measurements in situ, aerial monitoring by orthorectified RGB images at 2 flight altitudes and multispectral imaging of the Earth's orbit using bands 4 and 8 for red and infrared, respectively. The study was conducted in the experimental area of INCT do Café, at the Federal University of Lavras. In situ data collection was performed with the equipment, graduated topographic ruler, NDVI Greenseeker™ sensor, and the leaf area index sensor, LAI2000 compared to aerial monitoring with UAS DJI Phantom 4 and, orbital, with the Sentinel 2A. Points were collected to obtain the plant height, crown diameter, vegetative index of normalized difference (NDVI) and leaf area index (LAI) of 20 arabica coffee cultivars from June to August 2019. Two aerial surveys by means of UAS at the height of 30 and 70 meters and for the same date that the imaging was carried out with Sentinel 2A, around 11:00 am The surface and terrain elevation model was calculated and, by the difference of the images, plant height was obtained. The LAI was calculated for data collected in situ and plant height and crown diameter extracted from UAS images. Regarding NDVI, Machine Learning algorithms by Random Forest and Multiple Linear Regression were used to calibrate the NDVI of UAS based on the NDVI of the plants measured in situ with the Greenseeker™ and another model comparable to the NDVI obtained by imaging with Sentinel 2A. It was possible to determine an NDVI vigor value of UAS RGB to monitor the canopy of 20 coffee cultivars with an  $R^2$  value equal to 0.72. With regard to plant crown morphometry, the height of the plants measured by UAS image processing was close to that determined in situ, with an average difference of less than 0.15m.

Keywords: Machine Learning, NDVI, Coffee.

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE .....</b>	<b>9</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1. O café no Brasil.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Sensoriamento remoto multiespectral na cafeicultura.....</b>	<b>11</b>
<b>2.3 Sistemas de Aeronaves não Tripuladas (SISANT) .....</b>	<b>12</b>
<b>2.4 Sensor óptico ativo para detecção do NDVI.....</b>	<b>13</b>
<b>2.5 Variação espectral e sensores para determinar índices biofísicos do cafeeiro..</b>	<b>14</b>
<b>3 REFERENCIAS .....</b>	<b>16</b>
<b>4 SEGUNDA PARTE – ARTIGOS.....</b>	<b>21</b>
<b>ARTIGO 1.....</b>	<b>21</b>
<b>Monitoramento Remoto de Características Morfométricas de cultivares de café com Sistema de Aeronave Não Tripulada .....</b>	<b>21</b>
<b>ARTIGO 2.....</b>	<b>36</b>
<b>Monitoramento Remoto do Vigor Vegetativo de Cultivares de Café com diferentes Sensores e diferentes alturas de coleta de dados.....</b>	<b>36</b>

## **PRIMEIRA PARTE**

### **1 INTRODUÇÃO**

As técnicas de obtenção de dados por sensores orbitais têm se destacado devido a praticidade e dados cada vez mais precisos. A cultura a se beneficiar com estudos de dados orbitais é o café (Trabaquini et al., 2011; Oliveira et al., 2020; Moreira et al., 2004), que tem grande importância nacional, o que faz com que o nível de detalhamento se torne um fator fundamental para monitorar e tomar decisões assertivas. Para isso as imagens de satélite têm dado espaço para as imagens do uso de Sistemas de Aeronaves não Tripuladas (SISANT) que possuem alta resolução espacial.

Estudos utilizando imageamento com o SISANT, tem sido adotados para práticas de avaliação do crescimento, bem como detecção de falhas e vigor vegetativo, (Madec et al., 2017; Watanabe et al., 2017 ) porém a dificuldade em padronizar as técnicas tem sido um desafio para os pesquisadores e produtores de café. As limitações para o manuseio dos sensores e processamento por falta de conhecimento, fazem com que os resultados não tenham confiabilidade e não representem a real situação da lavoura, gerando impasse para decisões.

Um indicativo que pode ser utilizado para o monitoramento do cafeeiro é por meio de índice de área foliar (IAF), as variações deste índice podem ser utilizadas para avaliação de práticas culturais tais como poda, adubação, irrigação e aplicação de defensivos agrícolas (BARBOSA et al., 2012). Segundo Favarin et al. (2002), o IAF pode ser interpretado com o um indicativo de produtividade, pois o processo fotossintético depende da energia luminosa e da sua conversão em energia química, fatores que são cruciais para a determinação do índice. No entanto, os métodos comuns para determinação do IAF são frequentemente exaustivos e em muitos casos se faz necessário a destruição da planta. Deste modo, o desenvolvimento de um método não destrutivo, otimizado e representativo de toda lavoura é crucial para o avanço no manejo da cafeicultura com uso da agricultura de precisão.

Outro mecanismo de monitoramento das lavouras cafeeiras é por meio dos índices de vegetação, sendo o mais utilizado o NDVI desenvolvido por Huete et al. (1997). O NDVI pode ser utilizado para alcançar eficiência e reduzir a quantidade de nitrogênio reativo desperdiçado, que atinge o meio ambiente (ALI, et al. 2015). O uso mais comum do NDVI é por meio de imagens de satélite, e são utilizados para detecção doenças

(MIRANDA et al 2020, MARIN et al 2019), caracterização fenológica (CARVALHO JUNIOR et al 2013), modelo agrometeorológico espectral (ALMEIDA et al 2013; ROSA et al 2010).

A resolução do Satélite Sentinel 2 A, que disponibiliza imagens gratuitas, é de 10 m, mas para melhor detalhamento pode optar em satélites pagos ou mesmo um mapeamento por SISANT. Os equipamentos utilizados para o NDVI para maior detalhamento das plantas são de alto custo de aquisição como câmeras multiespectrais acoplada no SISANT ou mesmo equipamento de medição *in situ* como o Greenseeker™. Neste sentido, as câmeras RGB são opção para a determinação do NDVI por ser uma tecnologia mais acessível, embora sofram interferência da luminosidade.

Para determinar este índice por meio das câmeras RGB, podem ser utilizados de ferramentas de aprendizado de máquinas, pois podem determinar padrões de comportamento e modelar os dados, sendo estas ferramentas mais promissoras que a estatística tradicional. Para o cafeeiro o uso de algoritmos de *Machine Learning* é promissor em estudos com dados de sensoriamento remoto, como demonstram estudos (Miranda, Alves, 2020; Girolamo Neto et al., 2014) pois é possível modelar o comportamento dos dados e possibilitar aplicações.

As ferramentas podem ser utilizadas para aprimorar o processamento de imagens do SISANT como a análise do vigor vegetativo e obtenção de dados morfométricos. Desta maneira o agricultor pode tomar medidas assertivas, prevenindo sua lavoura de doenças e acompanhar seu desenvolvimento. Uma vez estabelecido um método de estimativa para dados morfométricos e vigor vegetativo da lavoura cafeeira, este pode ser aplicado por pequenos a grandes produtores de café arábica.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. O café no Brasil**

No primeiro levantamento sobre a área de cultivo de café brasileiro na safra 2020, a CONAB (2020) determinou área total cultivada de café arábica e conilon de 2,16 milhões de hectares, com aumento de 1,4% em relação à 2019. Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de café, seguido por Vietnã e Colômbia.

O agronegócio do café no Brasil teve grande ganho financeiro e significativo no ano de 2016 para o país, além de destaque nas exportações, sendo a escolha do tipo de espécie plantada influenciada pelas negociações dos preços no mercado internacional (MERGULHÃO, 2017).

Vários estudos têm sido desenvolvidos para o melhoramento e resistência a doenças, pragas, plantas daninhas e tolerância ao estresse hídrico no cafeeiro visando manter a produção e alta qualidade de grãos (FAZUOLI et al., 2019; BORGES et al., 2019; GARCIA et al., 2019).

Um dos grandes problemas enfrentados pelos cafeicultores para produzir frutos com quantidade e qualidade satisfatória é a suscetibilidade de cultivares de cafeeiro a várias doenças que podem ocorrer tanto na fase de viveiro como no campo. A incidência dessas doenças na planta é um dos fatores que contribuem para a redução da produtividade e da qualidade do café, além de aumentar o custo de produção (CARVALHO et al., 2012).

Doenças como a ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*), faz com que o cafeeiro fique comprometido em relação a produtividade de frutos e qualidade da bebida ao causar desfolha intensa em plantas suscetíveis (MENDONÇA et al., 2019). A incidência da ferrugem e cultivares resistentes tem sido estudada por vários pesquisadores com objetivo de prevenir ou controlar a ferrugem no cafeeiro (GARÇON et al., 2004; FAZUOLI et al., 2007; CARVALHO et al., 2017).

Com objetivo de monitorar a lavoura cafeeira, o uso do sensoriamento remoto com sensores multiespectrais apresenta-se como uma metodologia confiável e viável para controle e auxílio de decisões agronômicas.

## **2.2 Sensoriamento remoto multiespectral na cafeicultura**

O sensoriamento remoto é uma ciência que estuda padrões de energia e o uso de tecnologias de monitoramento que podem ser aliadas ao conceito de gestão na cafeicultura, com o geoprocessamento de informações em tempo real, por meio de sensores e técnicas de processamento de imagens.

Os dados de sensoriamento remoto podem ser obtidos em diferentes alturas com o uso de sensores orbitais (Sentinel-2), aéreos ou sub-orbitais (SISANT) e terrestres

(Greenseeker™). Dentre os sensores orbitais, o Sentinel-2 tem sido aplicado na cafeicultura para monitoramento da lavoura cafeeira em estudos recentes.

A missão Sentinel-2 foi constituída de 2 satélites A e B que contam com o sensor Multispectral Instrument (MSI) com 13 bandas espectrais, com altitude média de 800 km, capacidade de revisita de 5 dias no equador e, de 2 a 3 dias nas latitudes médias, com bandas que cobrem as regiões espectrais do visível (VIS), do infravermelho próximo (NIR), do infravermelho de ondas curtas (SWIR) e a na faixa do infravermelho (RedEdge) sendo quatro bandas (B02, B03, B04 e B08) com resolução espacial de 10 metros, seis bandas (B05, B06, B07, B08A, B11 e B12) com resolução espacial de 20 metros e três bandas (B01, B09, B04 e B10) com resolução espacial de 60 metros (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2018; DRUSCH et al., 2012)

A fim de obter uma menor cobertura de nuvens, uma boa iluminação solar e uma similaridade com os dados da série Landsat e SPOT, os satélites da missão Sentinel-2 passam pelo equador às 10:30 a.m. do horário local (DRUSCH et al., 2012).

As imagens do satélite da missão Sentinel-2 (2A e 2B), são de elevada qualidade geométrica e radiométrica, voltadas para o monitoramento terrestre.

Em estudos que simularam dados do Sentinel-2 houve boa correlação da refletância com a clorofila e o IAF (DELEGIDO et al., 2011; FRAMPTON et al., 2013), a radiação fotossinteticamente ativa (DONG ET AL, 2015), a concentração de nitrogênio nas folhas (RAMOELO et al., 2015), a biomassa acima do solo (SIBANDA et al., 2015) e, o IAF verde e senescente da cultura do milho, feijão, girassol e kiwi (DELEGIDO et al., 2015).

Na cultura do cafeeiro, Chemura et al. (2017) avaliou os níveis de infecção de ferrugem com métodos de aprendizado de máquina simulando dados do sensor MSI do Sentinel-2. Houve precisão de 63,5% e de 71,4% utilizando bandas espectrais e índices de vegetação para detecção da ferrugem no cafeeiro, respectivamente.

### **2.3 Sistemas de Aeronaves não Tripuladas (SISANT)**

As aplicações e potencialidades do sensoriamento remoto na agricultura de precisão, destaca o desenvolvimento recente do Sistemas de Aeronaves não Tripuladas (SISANT), equipadas com sensores que fornecem imagens com altas resoluções espaciais

e temporais aumentando as oportunidades de entender a variabilidade das condições do solo.

Estudos realizados na mecanização do cafeeiro por Souza et al. (2018), destaca a ampla gama de aplicações de SISANT, conseguindo bons resultados na identificação visual de falhas e distribuição das linhas de cultivo. Segundo Floreano e Wood (2015), as imagens de SISANT podem ser obtidas a poucos metros acima do solo contemplando imagens caras, dependentes do tempo, permitindo o monitoramento contínuo do crescimento e qualidade da cultura.

De acordo com Johnson; Lobitz; Dunagan (2004) já foi confirmado que com imagem aérea o monitoramento é mais rápido e preciso do que o monitoramento de campo realizado por técnicos e produtores.

Atualmente, segundo Hasegawa e Arruda Júnior (2004), as imagens obtidas com câmeras digitais não métricas, têm o ângulo de cobertura bastante reduzido em relação às fotografias aéreas convencionais, necessitando-se assim, de inúmeras imagens para recobrir uma mesma área.

Recomenda-se voo com horário de boa iluminação solar e sobreposição frontal de pelo menos 75% e uma sobreposição lateral de 60% para construção de ortomosaicos com imagens RGB (BATER et al., 2011; RASMUSSEN et al., 2014).

## **2.4 Sensor óptico ativo para detecção do NDVI**

As disponibilidades de sensores para agricultura, tem destacado o uso de sensores ópticos portáteis para a detecção instantânea no NDVI. Estudos realizados por Ali et al. (2019), utilizando o sensor óptico ativo Greenseeker <sup>TM</sup> partiram do pré-suposto que o sensor possui um sistema de auto-iluminação nos comprimentos de onda do vermelho (656nm) e infravermelho próximo (774nm) exibindo o NDVI, variando em uma escala de 0,00 a 0,99.

Estudos utilizando o sensor óptico Greenseeker <sup>TM</sup>, tem ganhado destaque pelos resultados apresentados em diversas culturas como o amendoim (CARNEIRO et al, 2019), algodão (ALI et al, 2014) arroz e milho (GUTIERREZ-SOTO et al, 2011) e café (BARBOSA et al, 2020), que utilizando do sensor como ferramenta de avaliação do NDVI de mudas de café, manejadas a uma profundidade de 0,60 m, foi observado maior

crescimento e vigor vegetativo, devido a melhor absorção de água e nutrientes do subsolo pelo cafeeiro.

## **2.5 Variação espectral e sensores para determinar índices biofísicos do cafeeiro**

O Sensoriamento Remoto tem se tornado uma ferramenta importante no estudo da vegetação por meio de fotografias aéreas, com destaque principalmente para a agricultura e estudos florestais. Atualmente, também são utilizados sensores terrestres que permitem estabelecer relações entre atributos do solo (KUIAWSKI et al., 2017), da cultura, e variáveis agronômicas. Para compreender como essas relações se relacionam é indispensável o entendimento de como a vegetação se comporta espectralmente, ou seja, qual a resposta espectral da vegetação dada pelos sensores ao interagir com a radiação eletromagnética incidente.

A folha do café se caracteriza como um dos objetos mais importantes, pois sua resposta espectral numa dada circunstância representa uma “boa aproximação” da assinatura espectral de folhas verdes, sendo nela que se processam todas as reações fotoquímicas da planta, além de outras reações vitais, como a respiração e transpiração (MOREIRA et al., 2004).

Segundo Chemura et al. (2017), há poucos trabalhos que relacionaram níveis de incidência de doenças e bandas espectrais na cafeicultura, devido a complexidade e a não linearidade entre o comportamento espectral e a incidência de patógenos.

O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) é amplamente utilizado por captar as variações de vigor da vegetação e é um indicador numérico e apresenta comportamentos distintos ao longo do ciclo fenológico de algumas culturas, como o cafeeiro (ZERBATO et al., 2016; ALMEIDA et al., 2017; HERWITZ et al., 2004).

Para a determinação dos índices que expressam o vigor vegetativo de uma planta, utilizam-se de diferentes sensores que podem ser classificados em sensores ativo ou passivo, imageadores e não-imageadores. Os índices de vegetação (IVs) são medidas da atividade da vegetação criadas por variação da refletância. Para Atzberger (2013), as propriedades da refletância são melhores analisadas por meio de combinações matemáticas de distintas faixas espectrais, pois os dados da refletância são associados às características biofísicas da planta, como biomassa, fração radiativa interceptada fotossinteticamente ou a área foliar.

A variação espectral da vegetação verde saudável é influenciada pela clorofila e reflete em toda a faixa da região do visível sendo que as maiores absorções da luz são na faixa do vermelho (600 a 700 nm) e do azul (400 a 500 nm), com ápice no comprimento de onda do verde (500 a 600 nm) (BRANDÃO et al., 2008).

Os índices baseados nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo, como o NDVI, são indicadores numéricos que medem a quantidade de clorofila e energia absorvida pela planta (MYNENI ET al, 1997; ZERBATO et al, 2016).

Em estudos realizados para identificar e mapear variáveis bióticas e abióticas do cafeeiro, Marin et al. (2019) utilizou o sensoriamento remoto multiespectral Landsat para mapear e identificar as alterações na reflectância espectral dos cafeeiros. De acordo com os autores, foi possível avaliar a variação espacial e espectral de infestação do bichomineiro na lavoura em relação aos teores de silte e argila no solo e concentrações de Mg, Cu, B e Mn nas folhas do cafeeiro.

### 3 REFERENCIAS

ALI. A. M.; IBRAHIM S.M.; SINGH B., Wheat grain yield and nitrogen uptake prediction using at Leaf and Greenseeker portable optical sensors at jointing growth stage. **Information Processing in Agriculture**, 2019.

ALMEIDA, T. S.; SEDIYAMA, G. C.; de Alencar, L. P. estimativa da produtividade de cafeeiros irrigados pelo método zona agroecológica espectral. revista engenharia na agricultura. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 25, n. 1, p.1-11, 2017

ATZBERGER C. Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs. **Remote Sensing**, v.5 n.2 p.949-981, 2013.

BARBOSA S. M.; SILVA B. M.; OLIVEIRA G. C.; BENEVENUTE P. A. N.; SILVA R. F.; CURI N.; MORETTI B. S.; SILVA S. H. G.; NORTON L.D.; PEREIRA V. M. Deep furrow and additional liming for coffee cultivation under first year in a naturally dense inceptisol, Science Direct **Geoderma**, v. 357, 2020.

BARBOSA, J. P. Rodrigues Alves Delfino et al. Estimativa do IAF de cafeeiro a partir do volume de folhas e arquitetura da planta. 2012.

BATER, C.W.; COOPS, N.C.; WULDER, M.A.; HILKER, T.; NIELSEN, S.E.; MCDERMID, G.; STENHOUSE, G.B. Using digital time-lapse cameras to monitor species-specific understorey and overstorey phenology in support of wildlife habitat assessment. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.180, p. 1–13, 2011.

BORGES, L.G.M.; MIRANDA, F.R.; BORGES, A.M.; SILVA, J.R.O.; CAMPOS, A.A.V.; RONCHI, C.P.; Response of Arabica Coffee Cultivars to Competition from Beggarticks. **Planta daninha**, Viçosa, v.37, 2019.

BRANDÃO Z. N.; BEZERRA M. V. C.; FREIRE E. C.; SILVA B. B. Agricultura de precisão para gerenciamento do algodão, **Embrapa Informação Tecnológica**, Brasília v. 2, 2008.

CARNEIRO, F. M. FURLANI, C. E. A., ZERBATO, C., MENEZES, P. C., GÍRIO, L. A. S. Correlations among vegetation indices and peanut traits during different crop development stages. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 39, 2019.

CARVALHO, V. L.; CUNHA, R. L.; SILVA, N. R. N. Alternativas de controle de doenças do cafeeiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 42-49, 2012.

CHEMURA, A.; MUTANGA, O.; DUBE, T. Separability of coffee leaf rust infection levels with machine learning methods at Sentinel – 2 MSI spectral resolutions. **Precision Agriculture**, v.18, n.5, p 859-881, 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompamento da Safra Brasileira**: primeiro levantamento da safra 2020. Brasília, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, 2020, p. 62.

DELEGIDO, J.; VERRELST, J.; ALONSO, L.; MORENO, J. Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. **Sensors**, v. 11, n. 7, p. 7063–7081, 2011.

DONG, T.; MENG, J.; SHANG, J.; LIU, J.; WU, B.; HUFFMAN, T. Modified vegetation indices for estimating crop fraction of absorbed photosynthetically 98 active radiation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 12, p. 3097–3113, 2015.

DRUSCH, M.; DEL BELLO, U.; CARLIER, S.; COLIN, O.; FERNANDEZ, V.; GASCON, F.; HOERSCH, B.; ISOLA, C.; LABERINTI, P.; MARTIMORT, P.; MEYGRET, A.; SPOTO, F.; SY, O.; MARCHESE, F.; BARGELLINI, P. Sentinel2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. **Remote sensing of Environment**, v. 120, p. 25–36, 2012.

FAVARIN, José Laércio et al. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 37, n. 6, p. 769-773, 2002.

FAZUOLI, L. C.; BRAGHINI, M. T.; SILVAROLLA, M B.; GONÇALVES, W.; MISTRO, J. C.; GALLO, P. B.; GUERREIRO FILHO, O.; IAC Catuaí SH3 - a dwarf Arabica coffee cultivar with leaf rust resistance and drought tolerance. **Applied Biotechnology**, v.19, n.3, 2019.

FLOREANO, D.; WOOD R. J. Science, technology and the future of small autonomous drones, **Nature**, v.521, p. 460-466, 2015.

FRAMPTON, W. J. J.; DASH, J.; WATMOUGH, G.; MILTON, E. J. J. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 82, p. 83–92, 2013.

GARCIA, F. H. S.; MATUTE, A.F. M.; SILVA, L. C.; SANTOS, H. R. B., BOTELHO, D. S., RODRIGUES, M.; BARBOSA, J. P. R. A. D., Análise fisiológica em mudas de cafeeiro com cercosporiose submetida a diferentes lâminas de irrigação. **Summa phytopathol**, v.45, n.1, 2019.

GARÇON, C. L. P.; ZAMBOLIM, L.; MIZUBUTI, E. S. G.; VALE, F. X. R. DO; COSTA, H. Controle da ferrugem do cafeeiro com base no valor de severidade. *Fitopatologia Brasileira*, 2004.

HASEGAWA, J. K.; ARRUDA Jr. E. R., Mosaico com imagens digitais, UNESP – Campus de Presidente Prudente, *Bol. Ciênc. Geod*, sec. Artigos, Curitiba, v. 10, no 1, p.31-50, 2004.

HERWITZ, S.R.; JOHNSON, L.F.; DUNAGAN, S.E.; HIGGINS, R.G.; SULLIVAN, D.V.; ZHENG, J.; LOBITZ, B.M.; LEUNG, J.G.; GALLMEYER, B.A.; AOYAGI, M.; SLYE, R.E.; BRASS, J.A. Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support. **Computer and electronics in agriculture**, v.44, p. 49-61, 2004.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K. V; LEEUWEN, W. VAN. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote sensing of environment*, v. 59, n. 3, p. 440–451, 1997. Elsevier.

JOHNSON L. F., LOBITZ B. M., DUNAGAN S., Feasibility of monitoring coffee field ripeness with airborne multispectral imagery. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 20, n. 6, p. 845–849, 2004.

JOHNSON, L. F.; TROUT, T. J. Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin valley. **Remote Sensing**, v.4, p.439-455, 2012.

JÚNIOR, A. F. C., O. A. de Carvalho Júnior, É. de Souza Martins, and A. F. Guerra, Phenological characterization of coffee crop (*Coffea arabica* L.) from Modis time series, *Brazilian J. Geophys.*, vol. 31, no. 4, pp. 569–578, 2013.

KUIAWSKI, A. C. M. B.; SAFANELLI J. L.; BOTTEGA E. L.; OLIVEIRA NETO A. M.; GUERRA N. Vegetation indexes and delineation of management zones for soybean. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 47, n. 2, p. 168–177, 2017.

MARIN, D. B., M. de Carvalho Alves, E. A. Pozza, L. L. Belan, and M. L. de Oliveira Freitas, Multispectral radiometric monitoring of bacterial blight of coffee, **Precis. Agric.**, vol. 20, no. 5, pp. 959–982, 2019.

MARIN, D. B.; ALVES, M. C.; POZZA, E. A.; GANDIA, R. M.; CORTEZ, M. L. J.; MATTIOLI, M. C. Sensoriamento remoto multiespectral na identificação e mapeamento

das variáveis bióticas e abióticas do cafeeiro. **Revista Ceres**, Viçosa , v. 66, n. 2, p. 142-153, 2019.

MENDONÇA, R. F.; JESUS JUNIOR, W. C.; FERRÃO, M. A. G.; MORAES, W. B.; BUSATO, L. M.; FERRÃO, R. G.; TOMAZ, M. A.; FONSECA, A. F. A. Genótipos de café conilon e sua reação à ferrugem alaranjada. **Summa phytopathol**, v.45, n.3, p. 279-284 , 2019.

MERGULHÃO, A.D. Os Fluxos, as relações e os agentes envolvidos na produção e comercialização do café produzido atualmente no Brasil, **Revista da ANGEPE**, v.13, n.22, 2017.

MIRANDA, J. da R., M. de Carvalho Alves, E. A. Pozza, and H. S. Neto, Detection of coffee berry necrosis by digital image processing of landsat 8 oli satellite imagery, **Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.**, vol. 85, p. 101983, 2020.

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

MYNENI, R.B.; RAMAKRISHNA, R.; NEMANI, R.R.; RUNNING, S.W. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.35, p.1380-1393, 1997.

OLIVEIRA PIRES, M. S. DE; CARVALHO ALVES, M. DE; POZZA, E. A. Multispectral radiometric characterization of coffee rust epidemic in different irrigation management systems. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 2020.

OVERVIEW, Multispectral instrument (MSI). **European Space Agency**, Europe, Disponível em:<<https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msiinstrument>>.Acesso em: 7 mar. 2018.

RAMOELO, A.; CHO, M.; MATHIEU, R.; SKIDMORE, A. K. Potential of Sentinel-2 spectral configuration to assess rangeland quality. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 9, n. 1, 2015.

RASMUSSEN, J., NTAKOS, G., NIELSEN, J., SVENSGAARD, J., POULSEN, R.N. e CHRISTENSEN, S. Are vegetation indices derived from consumer-grade cameras mounted on UAVs sufficiently reliable for assessing experimental plots. **European Journal of Agronomy**, v.74, p. 75–92, 2016.

- ROCHA MIRANDA, J. DA; CARVALHO ALVES, M. DE. The use of machine learning in digital processing of satellite images applied to coffee crop. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 2020.
- ROSA, V. G. C., M. A. Moreira, B. F. T. Rudorff, and M. Adami, Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral, **Pesqui. Agropecu. Bras.**, vol. 45, no. 12, pp. 1478–1488, 2010.
- SIBANDA, M.; MUTANGA, O.; ROUGET, M. Examining the potential of Sentinel-2 MSI spectral resolution in quantifying above ground biomass across different fertilizer treatments. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 110, p. 55–65, 2015.
- TRABAQUINI, K.; MIGLIORANZA, É.; FRANÇA, V. DE; NETO, O. C. P. Caracterização de lavouras cafeeiras, utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, no município de Umarama - PR. *Ciencia e Agrotecnologia*, 2011.
- ZERBATO, C.; ROSALEN D. L.; FURLANI C. E. A.; DEGHAID, J; VOLTARELLI, M. A. Agronomic characteristics associated with the normalized difference vegetation index (NDVI) in the peanut crop. **Australian Journal of Crop Science** v. 10, p. 758-764, 2016.

## 4 SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

### ARTIGO 1

#### **Monitoramento Remoto de Características Morfométricas de cultivares de café com Sistema de Aeronave Não Tripulada**

Artigo submetido ou em processo de submissão

Gleydson Antônio de O. Campos<sup>a</sup>, Marcelo de C. Alves<sup>a</sup>, Jonathan da R. Miranda<sup>a</sup>, José Ferreira Leite Neto<sup>a</sup>, Mário Lúcio V. Resende<sup>c</sup>, Gladyston Rodrigues Carvalho<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário CEP: 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil

<sup>b</sup>Departamento de Biologia da Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário CEP: 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil

<sup>c</sup>Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário CEP: 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil

<sup>d</sup>Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas CEP: 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil

Autor para correspondência: Gleydson Antônio de Oliveira Campos  
gleydson.campos@ufla.br

Preparado em concordância com as normas do periódico  
“Computers and Electronics in Agriculture”  
(Versão preliminar – em processo de submissão)

#### **RESUMO**

O gerenciamento empresarial das propriedades cafeeiras tem estimulado o avanço tecnológico de sistemas de sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados na cafeicultura. A demanda por informações que contribua de forma rápida e precisa nas tomadas de decisão na lavoura é cada vez mais crescente. Com objetivo de avaliar a morfometria com dados de altura, diâmetro e índice de área foliar (IAF) para uma lavoura de café arábica, utilizou-se de um sistema de aeronave não tripulada (SISANT) com voos de 30 e 70 metros de altura em lavoura com declividade de 7% nos meses de junho a agosto de 2019. Um equipamento comercial (LAI2000, Li-Cor®) foi utilizado para coleta de dados *in situ* de IAF em 20 cultivares de Café arábica localizado na Universidade Federal de Lavras pertencente ao INCT do Café, a fim de avaliar o desempenho do levantamento com um SISANT. Com imagens obtidas pelo SISANT, corrigidas e

ajustadas com pontos de controle georreferenciados com receptores GNSS, foi possível gerar o ortomosaico e obter para cada planta de café, o Índice de Área Foliar (IAF) e comparar com dados do LAI2000, Li-Cor® obtidos *in situ*. Os dados de altura e diâmetro extraídos das imagens foram comparados aos de medição com régua graduada utilizando ferramentas de análise de software de SIG. Nos resultados obtidos houve boa precisão e acurácia para estimar o IAF de cultivares de café com imagens de SISANT a uma altura de 30 metros. Com base nos resultados obtidos, dados morfométricos de cultivares, Aranãs RV, Araçuaia MG-1, Catiguá MG-1, Catiguá MG-2, Catiguá MG-3, Pau-Brasil MG-1, Acauã, Acauã Novo, Arara, Clone 224, Clone 312, Guará, Saíra II, Siriema, Catucaí Amarelo 2SL, IAPAR 59, IPR 100, IPR 102, IPR 103, Rubi MG-1192, podem ser monitoradas remotamente para avaliação de desenvolvimento, em terrenos com declividade de 7%.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Remoto, *Coffea arabica L.*, SISANT.

## INTRODUÇÃO

Com a importância da cafeicultura no Brasil, tecnologias e sistemas de Sensoriamento Remoto foram cada vez mais utilizados para o mapeamento de lavouras cafeeiras (TRABAQUINI et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2020; MOREIRA et al., 2004).

Existem no entanto, uma certa dificuldade em extrair informações de plantas individuais por meio de imagens orbitais devido a heterogeneidade de paisagens dos ambientes tropicais (Li et al., 2014) afetando diretamente o mapeamento dos cafezais e a inexistência de imageamento orbital de altíssima resolução espacial gratuito.

A determinação de dados morfométricos em plantas de café como altura, diâmetro e volume demandaram grande número de pessoas, houve alta susceptibilidade a erros de análise humana por falta de treinamento, calibração e padronização de leitura de dados observados, além de algumas técnicas de coleta de dados *in situ* serem destrutivas, prejudicando a estimativa e qualidade dos resultados obtidos. (LYNCH, 2012).

Segundo Zhou et al., (2017), mesmo com o desenvolvimento recente de plataformas de satélites, em termos de sofisticação de sensores, com a melhora da resolução espacial de imagens para 30 m, 10 m e até 3 m, ainda é difícil e dispendioso obter informações para pequenas áreas, como, por exemplo, as de cultivo agrícola, que geralmente são divididas em pequenos talhões. Portanto, os sistemas aéreos não tripulados (SISANTs) se tornaram de grande utilidade em várias lavouras de diferentes culturas devido à alta resolução das imagens, sendo possível a determinação de variáveis morfométricas da planta, como trigo e sorgo (MADEC et al., 2017; WATANABE et al., 2017).

De acordo com os assuntos apresentados, o método de determinação remota por SISANTs, poderá preencher uma lacuna na literatura, visto que não foram realizados estudos comparativos entre diferentes métodos de obtenção de dados morfométricos no agroecossistema cafeeiro.

Partindo-se da hipótese de que é possível obter dados morfométricos para a cultura do café utilizando SISANT, objetivou-se comparar dados coletados em diferentes alturas de voo e cultivares, com dados *in situ* e avaliar a precisão dos resultados obtidos nos diferentes métodos.

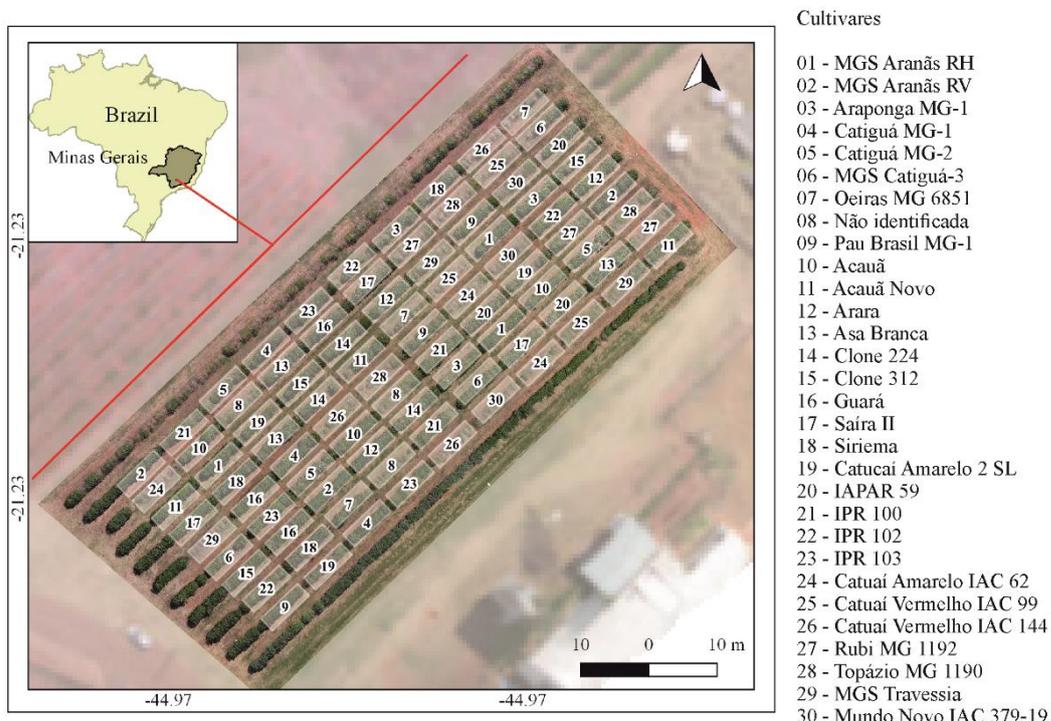
## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de Estudo

A área de estudo está localizada no campo experimental do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do Café (INCT do CAFÉ) na Universidade Federal de Lavras – UFLA, com coordenadas geográficas: Latitude: 21°13'35" S, Longitude: 44°58'14" W, com altitude média de 941,096 metros.

A área de estudo é composta por 30 cultivares da espécie *Coffea arabica* L. com data de plantio em 30/03/2015, onde estão dispostas em 3 blocos de 30 parcelas com 10 plantas por parcela. As plantas estão espaçadas em 3,5 m entre linhas e 0,7 m entre plantas (Figura 1).

A escolha da área de estudo foi fundamental para testar o modelo em 20 cultivares. A presença de plantas com resistência e susceptibilidade a ferrugem (*Hemileia vastatrix*), possibilitou avaliar plantas com desfolha (Tabela 01).



**Figura 1.** Relação de cultivares/genótipos para pesquisa – INCT do Café -Universidade Federal de Lavras – UFLA – Minas Gerais – BRASIL

Uma das consequências causadas pela ferrugem é a queda precoce das folhas, seca de ramos, impedindo a produção de frutos. Os primeiros sintomas da doença são manchas cloróticas com 1 a 3 mm de diâmetro (BROWN et al., 1995). A maioria das cultivares comerciais da espécie *Coffea arabica* L. são suscetíveis à ferrugem (ALFONSI et al., 2019).

**Tabela 01:** Susceptibilidade e resistência a ferrugem de cultivares implantadas na área experimental para verificar o desempenho agrônômico das mesmas.

<b>Cultivar</b>	<b>Nível de Resistência à Ferrugem</b>
MGS Aranãs RH	Resistente
MGS Aranãs RV	Resistente
Araponga MG 1	Resistente
Catiguá MG-1	Resistente
Catiguá MG-2	Resistente
MGS Catiguá 3	Resistente
Oeiras MG 6851	Moderadamente resistente
Não identificada	Altamente resistente
Pau-Brasil MG-1	Resistente
Acauã	Resistente
Acauã Novo	Resistente
Arara	Resistente
Asa Branca	Resistente
Guará	Resistente
Saíra II	Moderadamente resistente
Siriema	Moderadamente resistente
IAPAR 59	Resistente
IPR 100	Suscetível
IPR 102	Moderadamente resistente
IPR 103	Moderadamente resistente
Catuaí Amarelo IAC 62	Suscetível
Catuaí Vermelho IAC 99	Suscetível
Catuaí Vermelho IAC 144	Suscetível
Rubi MG 1192	Suscetível
Topázio MG 1190	Suscetível
MGS Travessia	Suscetível
Mundo Novo IAC 379-19	Suscetível
Clone 224	Moderadamente resistente
Clone 312	Resistente
Catuaí Amarelo 2 SL	Moderadamente resistente

### **Definição dos pontos amostrais**

Foram selecionadas 90 plantas de 20 cultivares de maneira aleatória na área de estudo, sendo elas, MGS Aranãs RV, Araponga MG-1, Catiguá MG-1, Catiguá MG-2, MGS Catiguá 3, Pau Brasil MG-1, Acauã, Acauã Novo, Arara, Clone 224, Clone 312, Guará, Saíra II, Siriema, Catucaí Amarelo 2 SL, IAPAR 59, IPR 100, IPR 102, IPR 103, Rubi MG 1192. A área foi georreferenciada com o receptor GNSS Spectra SP60 L1/L2 RTK coletando informações planialtimétricas do terreno e a posição de cada planta amostrada. Os pontos amostrais foram levantados utilizando o método de posicionamento relativo utilizando a técnica *Real Time Kinematic* (RTK) e ajustados pelo método dos mínimos quadrados em relação à Estação Geodésica de Referência de Nível 3045T do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), localizada no campus da Universidade Federal de Lavras.

### **Aquisição de dados *in-situ* da altura, diâmetro e IAF das cultivares**

Foram coletados na área experimental as características morfométricas das plantas de café, com auxílio de uma régua graduada e um equipamento de medição do IAF denominado LAI 2000.

A altura foi determinada com a régua graduada considerando a altura máxima do ramo ortotrópico enquanto o diâmetro de copa foi medido considerando a base (saia) da planta de café.

Com o uso do LAI 2000 foram obtidas as medidas de referências do IAF para as análises. A coleta foi realizada posicionando o equipamento acima da copa a fim de calibrá-lo quanto à luz ambiente, logo em seguida foi utilizado novamente abaixo da copa, para calcular a quantidade de luz que foi transmitida para a parte interna da planta, estimando assim o índice de área foliar da planta.

### **Aquisição de dados por imagens de SISANT e correção posicional**

Foram realizados vôos com altura de 30 e 70 metros em relação ao ponto de decolagem com o gimbal da câmera posicionada a 90 graus em relação ao nadir, sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 75% (BATER et al., 2011; RASMUSSEN et al., 2016) e velocidade do SISANT a  $3 \text{ m.s}^{-1}$ . A resolução espacial das imagens foram

de 0,01 e 0,03 m para o voo de 30 e 70 m respectivamente, ambas imagens tiveram a resolução radiométrica de 8 bits.

Para correção geométrica das imagens, foram utilizados 10 pontos de controle, sendo estes distribuídos nas bordas e no centro da área. Os pontos de controle foram georreferenciados por meio do receptor GNSS Spectra SP60 L1/L2 RTK, e ajustados pelos mesmos procedimentos adotados na coleta para os pontos amostrais.

### **Processamento de imagens de SISANT e obtenção do Modelo Digital de Superfície e Terreno**

O processamento das imagens consistiu nos procedimentos de rotina para o mosaico de imagens. O processo inicia-se pelo alinhamento das fotos encontrando os pontos homólogos entre as fotos. Os pontos de controle foram utilizados para orientar os pontos homólogos iniciais e posteriormente os demais pontos foram obtidos de forma automática. A nuvem densa de pontos foi obtida posteriormente ao ajuste e alinhamento das fotos no software Pix4d em sua versão de teste. Nesta etapa foram adquiridos os pontos utilizando o critério de maior número de pontos possíveis para a qualidade ótima de imagem. Pelo processo de estereoscopia foi adquirido o modelo digital do terreno (MDT) e o modelo digital da superfície (MDS), neste modelo toda a superfície como as copas das plantas foram registradas tendo um valor de altitude na imagem, comparados ao levantamento planialtimétrico realizado com os receptores GNSS.

Para a obtenção do MDT, foi realizada uma filtragem da nuvem densa dos pontos, nos quais estavam contidos na condição de possuir uma declividade inferior a 25 % para um raio de 2 metros.

### **Determinação do índice de área foliar IAF**

O índice de área foliar foi determinado por três métodos de avaliação, pela medição direta no aparelho LAI 2000, pelo método de Favarin et al. (2002) e por meio de imagem provinda do SISANT.

Foi utilizado a Equação 1 proposta por Favarin (2002), para o cálculo de área foliar por fatores geométricos da planta, tais como o diâmetro inferior do dossel e a altura da planta

$$IAF = 0,0134 + 0,7276 D_i^2 * H_d \quad (1),$$

Em que,  $D_i$  foi o diâmetro inferior do dossel e  $H_d$ , a altura do dossel.

O IAF oriundo pelas imagens do SISANT foi obtido utilizando da mesma equação provinda do método do Favarin et al. (2002), mas coletando os valores do diâmetro do dossel e altura das plantas pelas imagens. Para coletar estas informações de forma mais otimizada, foi considerado um *buffer* de 0,7 m que representou o espaçamento entre plantas. A altura foi obtida com a diferença entre o MDS e o MDT gerados pela imagem. Foi considerado que a área máxima do dossel está em função da área do buffer padronizado em 1,54 m<sup>2</sup>. A área do dossel foi calculada pela somatória dos pixels contida no buffer cuja a altura seja superior a 0,1 m, sendo este valor obtido na imagem da diferença da altura entre o MDS e MDT. Para converter o número de pixel contido no buffer em área, foi multiplicado o valor da somatória dos pixels pela resolução espacial da imagem. Este procedimento foi efetuado para imagens do voo a 70 e 30 m.

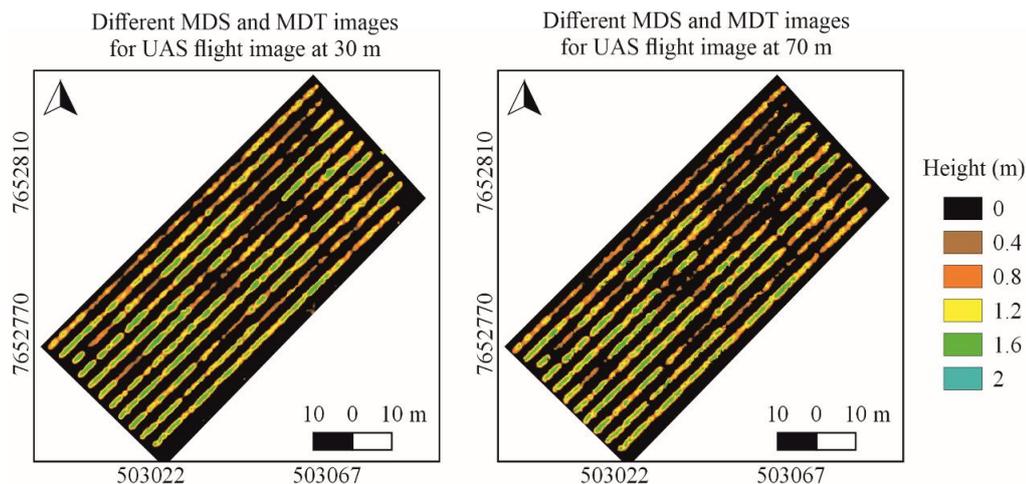
### **Avaliações realizadas**

Foi realizada a comparação dos valores de altura e diâmetro de copa obtidos pelo SISANT em diferentes alturas de voo, 30 e 70 metros, em relação às obtidas *in situ*. Posteriormente foram comparados os valores de IAF obtidos com o método de Favarin et al. (2002), utilizando variáveis medidas *in situ* com SISANT e LAI 2000.

### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os pontos de controle e as plantas georreferenciadas com receptores GNSS, foram processados e ajustados pelo método dos mínimos quadrados. O erro maior após ajuste, foi de 0,023 m para a horizontal e 0,037 m para a vertical, ambos os vetores com solução fixa.

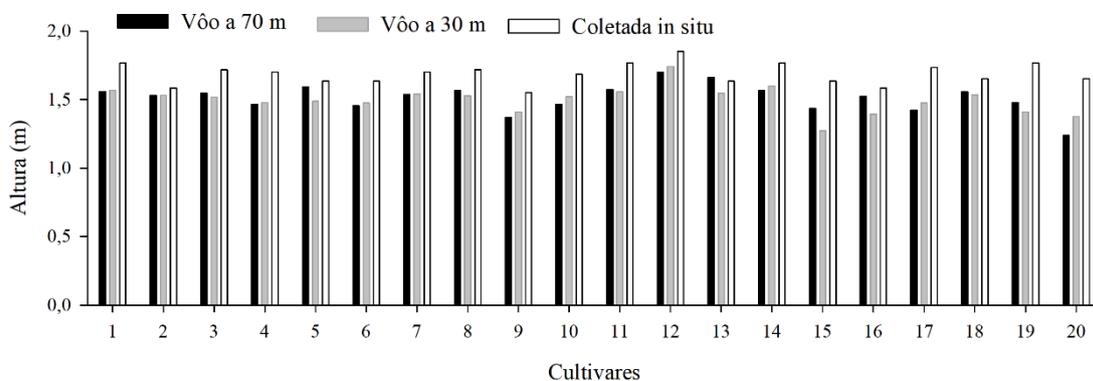
Após a ortorretificação da imagem, foi observado que o voo com altura de 30 m, obteve aparentemente mais detalhe da superfície, mas os valores de altura foram relativamente próximo se comparado ao voo de 70 m (Figura 2). Com este método foi possível separar e destacar as plantas de café, identificar falha de plantio e plantas com baixo enfolhamento.



**Figura 2.** Imagem da diferença do MDS e MDT obtidas pelo SISANT na altura de voo de 30 e 70 m.

O ganho na resolução da imagem proporcionou uma maior identificação de feições, neste sentido mais detalhes da planta foram representados no ortomosaico. Mesmo com baixo enfolhamento, ainda foi possível a medição de altura. Guerra-Hernández et al. (2016) mostrou que um SISANT equipado com câmeras de baixo custo possibilita fornecer informações de mapeamento florestal e pode ser usado para levantamento de variações espacial do crescimento ou produção.

Comparando os valores com as medidas in situ, a tomada de altura por imagens com o SISANT a 30 m obteve valores mais próximos em relação ao voo a 70 m (Figura 3).



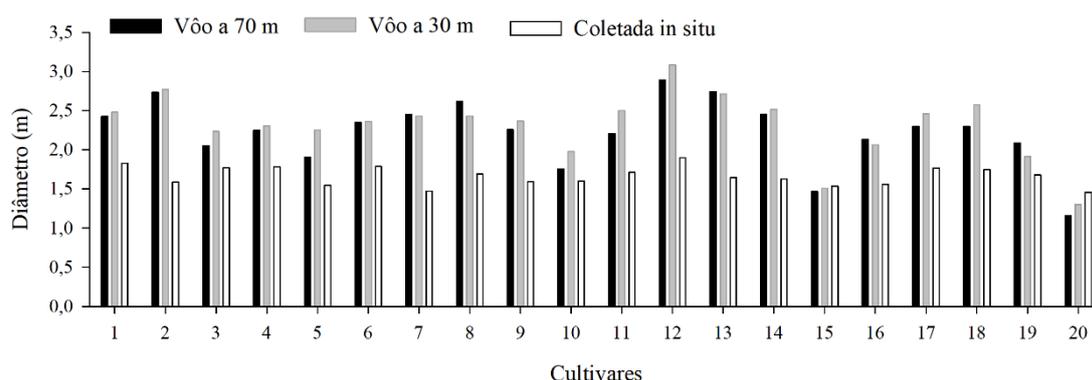
1. Aranãs RV, 2. Araponga MG-1, 3. Catiguá MG-1, 4. Catiguá MG-2, 5. Catiguá MG-3, 6. Pau-Brasil MG-1, 7. Acauã, 8. Acauã Novo, 9. Arara, 10. Clone 224, 11. Clone 312, 12. Guará, 13. Saíra II, 14. Siriema, 15. Catucaí Amarelo 2SL, 16. IAPAR 59, 17. IPR 100, 18. IPR 102, 19. IPR 103, 20. Rubi MG-1192.

**Figura 3.** Distribuição espacial dos pontos amostrados na comparação da altura de plantas oriundos de imagens do SISANT com altura de voo de 30 e 70 m e a altura de plantas medidas *in situ*.

A altura dimensionada por imagens do SISANT necessita de uma superfície detectável na imagem como uma maior concentração de folhas no ramo. Watanabe et al. (2017), observou em seu estudo com a cultura do sorgo, uma baixa precisão na obtenção das alturas, concluindo que se a densidade das plantas for alta o suficiente para formar um dossel contínuo, a maioria dos pontos são capturados podendo obter-se a altura precisamente. Deste modo, os ramos sem presença de folhas que foram medidos com a régua graduada, não foram contabilizados pela imagem do SISANT, o que gerou a diferença nas medições de altura pelos métodos abordados.

Estudo realizado por Castro et al. (2018) em videiras, comparou medições manuais e imagem de SISANT, encontrando uma boa relação de altura estimada e medida, enquanto que Matese et al. (2017) relatou uma discordância significativa (0,50 m) entre as alturas medidas e estimadas.

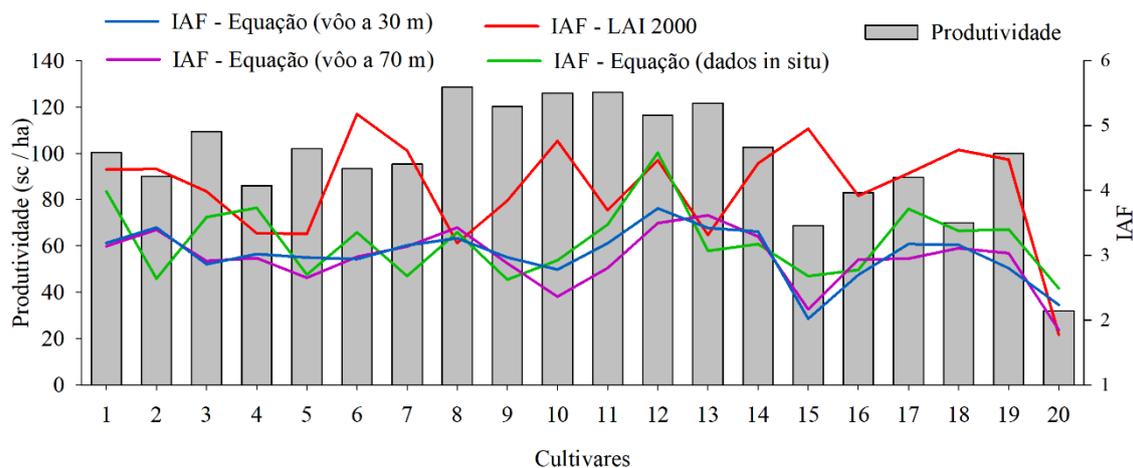
As medições foram maiores em relação aos valores coletados *in situ*. Este aumento no diâmetro pode ter sido afetado pelos ramos plagiotrópicos superiores estarem mais evidentes vistos pela imagem.



1. Aranãs RV, 2. Araponga MG-1, 3. Catiguá MG-1, 4. Catiguá MG-2, 5. Catiguá MG-3, 6. Pau-Brasil MG-1, 7. Acauã, 8. Acauã Novo, 9. Arara, 10. Clone 224, 11. Clone 312, 12. Guará, 13. Saíra II, 14. Siriema, 15. Catucaí Amarelo 2SL, 16. IAPAR 59, 17. IPR 100, 18. IPR 102, 19. IPR 103, 20. Rubi MG-1192.

**Figura 4.** Distribuição espacial dos pontos amostrados na comparação do diâmetro do dossel oriundos de imagens do SISANT com altura de voo de 30 e 70 m.

Com o LAI 2000, ocorreu as maiores divergências com relação aos demais métodos de medição do IAF, onde observou plantas com IAF superiores a 5 o que não foi encontrado pelas imagens do SISANT e medições métricas *in situ* (Figura 5). A produtividade foi comparada ao IAF obtido com os demais métodos, sendo baixa a correlação IAF LAI 2000 x Produtividade (sc/ha) muito baixa.



1. Aranãs RV, 2. Araçuaia MG-1, 3. Catiguá MG-1, 4. Catiguá MG-2, 5. Catiguá MG-3, 6. Pau-Brasil MG-1, 7. Acauã, 8. Acauã Novo, 9. Arara, 10. Clone 224, 11. Clone 312, 12. Guará, 13. Safra II, 14. Siriema, 15. Catucaí Amarelo 2SL, 16. IAPAR 59, 17. IPR 100, 18. IPR 102, 19. IPR 103, 20. Rubi MG-1192.

**Figura 5.** Distribuição das medições do Índice de Área Foliar (IAF), obtidos por meio do LAI 2000, medição métrica *in situ* e imagens do SISANT na altura de voo de 30 e 70 m comparados à produtividade

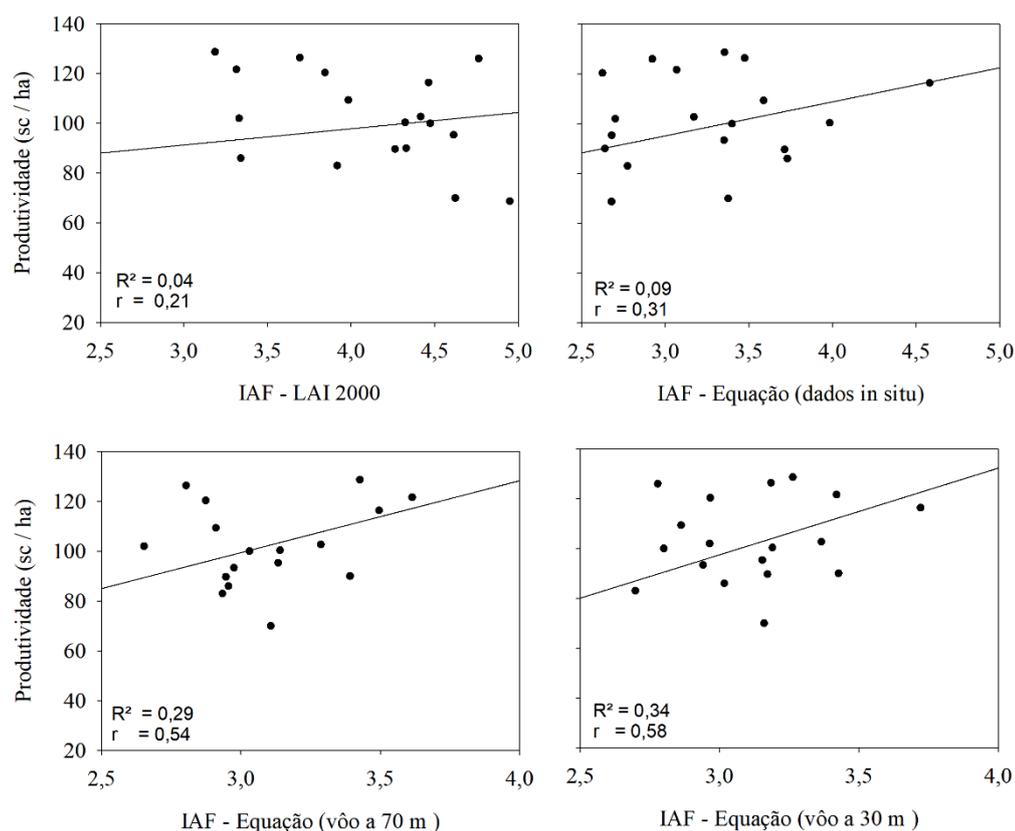
O LAI 2000 quando inserido na parte inferior das plantas possui característica de detectar a energia eletromagnética restante, sendo correspondente a parte não absorvida pelas folhas, logo todas as folhas no interior da copa são consideradas para determinação do IAF. A imagem provinda do SISANT somente caracterizou as folhas externas da copa do dossel. A falta de informação a respeito das folhas no interior da copa é um possível motivo pela diferença do IAF medido pelo LAI 2000 e o SISANT. No método de Favarin et al. (2002), a planta foi considerada cônica, a fim de aproximar ao real formato da planta, portanto é esperado diferenças entre os modelos e métodos de avaliação do IAF.

Para as cultivares (6) Pau Brasil MG-1, (15) Catucaí Amarelo 2 SL e (18) IPR 102, houve as discrepâncias mais acentuadas devido ao fechamento do dossel e ao

enfolhamento, elevando o IAF diferenciando dos métodos utilizados. Estudos realizados por Ribeiro et al., (2013), utilizando o LAI 2000 em cafeeiros, concluiu que o equipamento apresentou baixa correlação com o enfolhamento real e algumas inconsistências em plantas mais jovens, visto que o equipamento não considerou a estrutura da planta diretamente, como ramos, caules, troncos, flores e frutos (CUTINI et al., 1998; KUCHARIK et al., 1998).

A cultivar susceptível à ferrugem, (20) Rubi MG 1192, apresentou baixo IAF, devido à desfolha causada pela doença e apresentou maior erro na determinação das características morfométricas.

No entanto o voo a 30m de altura proporcionou melhor resultado devido a resolução espacial, proporcionando maior precisão na obtenção dos dados morfométricos, apresentando um  $R^2$  igual a 0,34 (figura 7).



**Figura 7.** Equação do Índice de Área Foliar (IAF) das 20 cultivares obtido com o LAI 2000, dados morfométricos de imagens do SИСANT com voo de 30 e 70 m e dados *in situ*

No cafeeiro, a copa não é uniforme para representar toda estrutura da planta e ainda pode variar mesmo sendo de uma mesma cultivar. Considerar este tipo de método para o cálculo do IAF não foi suficiente para equiparar com as medições do LAI 2000. Outras abordagens podem ser utilizadas para aproximar os valores de IAF para os métodos, como técnicas de *Machine learning* incluindo também os valores da imagem RGB do SISANT. No entanto, no que se refere às medições métricas o SISANT é uma alternativa de medições para toda área cafeeira contida no mapeamento de forma mais ágil se comparado às medições *in situ* com régua graduada. Com uso do SISANT, alguns pesquisadores tem alcançado bons resultados ao mensurar a geometria de plantas (CASTRO et al., 2018; CASTALDI et al., 2017).

## CONCLUSÃO

Com o uso de imagens de SISANT, foi possível mensurar o diâmetro de copa e a altura de plantas das 30 cultivares de café estudadas, com bom nível de precisão para plantas enfolhadas. Plantas desfolhadas apresentam baixa precisão para altura de plantas, diâmetro de copa e IAF, devido à baixa refletância e uma nuvem de pontos menos adensada.

No voo de 30 metros foram obtidos os melhores resultados nas medições de dados morfométricos para a determinação do IAF.

Portanto, a técnica utilizada com o SISANT, pode ser recomendada para uma análise detalhada em nível de planta.

## Agradecimentos

Os autores agradecem (i) ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras (UFLA) pela disponibilização de escritórios e infraestrutura para o alcance dos resultados obtidos neste artigo, (ii) à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), (iii) ao CNPq pela bolsa de produtividade (GRC) e (iv) ao INCT do Café.

## REFERÊNCIAS

- ALFONSI, W. M. V.; COLTRI, P. P.; ZULLO JÚNIOR, J.; PATRÍCIO, F. R. A.; ALFONSI, E. L. Período de incubação da ferrugem do cafeeiro. **Summa Phytopathologica**, 2019.
- BATER, C. W.; COOPS, N. C.; WULDER, M. A.; et al. Using digital time-lapse cameras to monitor species-specific understorey and overstorey phenology in support of wildlife habitat assessment. **Environmental Monitoring and Assessment**, 2011.
- BROWN, J. S.; KENNY, M. K.; WHAN, J. H.; MERRIMAN, P. R. The effect of temperature on the development of epidemics of coffee leaf rust in Papua New Guinea. **Crop Protection**, 1995.
- CASTRO, A. I. DE; JIMÉNEZ-BRENES, F. M.; TORRES-SÁNCHEZ, J.; et al. 3-D characterization of vineyards using a novel UAV imagery-based OBIA procedure for precision viticulture applications. **Remote Sensing**, 2018.
- CUTINI, A.; MATTEUCCI, G.; MUGNOZZA, G. S. Estimation of leaf area index with the Li-Cor LAI 2000 in deciduous forests. **Forest Ecology and Management**, 1998.
- FAVARIN, J. L.; DOURADO NETO, D.; GARCÍA Y GARCÍA, A.; VILLA NOVA, N. A.; FAVARIN, M. DA G. G. V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2002.
- GUERRA-HERNÁNDEZ, J.; GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; SARMENTO, A.; et al. Using high resolution UAV imagery to estimate tree variables in Pinus pinea plantation in Portugal. **Forest Systems**, 2016.
- KUCHARIK, C. J.; NORMAN, J. M.; GOWER, S. T. Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, 1998.
- LI, C.; WANG, J.; WANG, L.; HU, L.; GONG, P. Comparison of classification algorithms and training sample sizes in urban land classification with landsat thematic mapper imagery. **Remote Sensing**, 2014.
- LYNCH, H. J. Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications . By Hamlyn G. Jones and Robin A. Vaughan. Oxford and New York: Oxford University Press. \$55.00 (paper). xxvi + 353 p. + 12 pl.; ill.; index. ISBN: 978-0-19-920779-4. 2010. . **The Quarterly Review of Biology**, 2012.
- MADEC, S.; BARET, F.; SOLAN, B. DE; et al. High-throughput phenotyping of plant

height: Comparing unmanned aerial vehicles and ground lidar estimates. **Frontiers in Plant Science**, 2017.

MATESE, A.; GENNARO, S. F. DI; BERTON, A. Assessment of a canopy height model (CHM) in a vineyard using UAV-based multispectral imaging. **International Journal of Remote Sensing**, 2017.

OLIVEIRA PIRES, M. S. DE; CARVALHO ALVES, M. DE; POZZA, E. A. Multispectral radiometric characterization of coffee rust epidemic in different irrigation management systems. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 2020.

RIBEIRO, K. M.; BRAGA, R. A.; SCALCO, M. S.; HORGAN, G. W. Leaf area estimation of medium size plants using optical metrology. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2013.

TRABAQUINI, K.; MIGLIORANZA, É.; FRANÇA, V. DE; NETO, O. C. P. Caracterização de lavouras cafeeiras, utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, no município de Umuarama - PR. **Ciencia e Agrotecnologia**, 2011.

WATANABE, K.; GUO, W.; ARAI, K.; et al. High-throughput phenotyping of sorghum plant height using an unmanned aerial vehicle and its application to genomic prediction modeling. **Frontiers in Plant Science**, 2017.

ZHOU, X.; ZHENG, H. B.; XU, X. Q.; et al. Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 2017.

## ARTIGO 2

### Obtenção Remota do Vigor Vegetativo de Cultivares de Café com diferentes Sensores e diferentes alturas de coleta de dados

Artigo submetido ou em processo de submissão

Gleydson Antônio de O. Campos<sup>a</sup>, Marcelo de C. Alves<sup>a</sup>, Jonathan da R. Miranda<sup>a</sup>, João Paulo Rodrigues Alves Delfino Barbosa<sup>b</sup>, Mário Lúcio V. Resende<sup>c</sup>, Gladyston Rodrigues Carvalho<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário CEP: 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil

<sup>b</sup>Departamento de Biologia da Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário CEP: 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil

<sup>c</sup>Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário CEP: 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil

<sup>d</sup>Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas CEP: 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil

Autor Correspondente: Gleydson Antônio de Oliveira Campos

Email: gleydson.campos@ufla.br

Preparado em concordância com as normas do periódico  
“Computers and Electronics in Agriculture”  
(Versão preliminar – em processo de submissão)

**Resumo:** A demanda do mercado por cafés de melhor qualidade determinaram o uso de sensoriamento remoto e geoprocessamento para o monitoramento da safra de café. O objetivo do trabalho foi treinar algoritmos de *Machine learning* para estimar o NDVI com imagens RGB de sistema aéreo não tripulado (SISANT) equiparável ao sensor óptico Greenseeker<sup>TM</sup> e o satélite Sentinel 2A e também avaliar o enfolhamento por classificação com auxílio de algoritmos de *Machine Learning*, em 20 cultivares de café arábica (Acauã, Acauã Novo, MGS Aranãs RV, Araponga MG 1, Arara, Catiguá MG-1, Catiguá MG-2, MGS Catiguá 3, Catucaí Amarelo 2 SL, Clone 224, Clone 312, Guará,

IAPAR 59, IPR 100, IPR 102, IPR 103, Pau Brasil MG-1, Rubi MG 1192, Saíra II e Siriema) na área experimental do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do Café (INCT do Café), localizada no campus da Universidade Federal de Lavras. O vigor vegetativo da cultura do café foi avaliado *in situ* com o índice de diferença normalizada (NDVI) utilizando o sensor óptico Greenseeker <sup>TM</sup> acima do dossel da planta (1 metro de altura) e com o sensor multiespectral Sentinel-2A (780 a 820 nm de altura). A altura de voo com o SISANT foi de 70 metros acima da lavoura. Com as assinaturas espectrais das 20 cultivares de café, foram avaliadas por meio de técnicas de aprendizagem de máquinas e processamento digital de imagens, as relações com dados obtidos *in situ* da produtividade (litros/parcela), enfolhamento e NDVI obtido com sensor óptico Greenseeker <sup>TM</sup>. O NDVI estimado com bandas RGB com base no sensor óptico Greenseeker <sup>TM</sup>, foram satisfatórios quando comparados aos dados *in situ*, proporcionando a utilização de um método simples e eficaz de avaliação do vigor vegetativo de diferentes cultivares de café.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, NDVI, processamento digital de imagens, folhagem, café.

## 1 INTRODUÇÃO

Para realizar o manejo adequado dos cafezais de forma a deixar as plantas bem nutridas e produtivas, uma das ferramentas disponíveis é a utilização do monitoramento geoespacial e temporal da cafeicultura.

O sensoriamento remoto tem sido cada vez mais utilizado para avaliar a variação espectral da cultura do café por meio de técnicas de processamento digital de imagens, a fim de obter resultados de variáveis do agroecossistema que possibilitem a tomada de decisões com base na refletância eletromagnética de folhas, plantas individuais e conjunto de cafeeiros. (JOHNSON; TROUT, 2012). Com a combinação de dados espectrais de sensores que possuem duas ou mais bandas, é possível determinar índices de vegetação para detectar variáveis biofísicas da vegetação. (ZANZARINI et al., 2013).

Diversos estudos utilizaram diferentes sensores e alturas para obter informações e tomar decisões relacionadas ao café: Sensor ativo Greenseeker <sup>TM</sup> como ferramenta de avaliação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com práticas adotadas no manejo para melhorar a absorção de água e nutrientes no subsolo

(BARBOSA et al., 2020). Estimar o volume do cafeeiro usando imagens de sistemas aéreos não tripulados (SISANT) para aprimorar as técnicas de aplicação de pesticidas (CUNHA, DA et al., 2019). Validação de medições de campo para variedades de tomate com uso de SISANT (ENCISO et al., 2019). Uso de dados multiespectrais do Sentinel-2 MSI para mapear a variabilidade espacial do nitrogênio foliar em plantações de café (*Coffea arabica L.*) (CHEMURA; MUTANGA; ODINDI; et al., 2018).

Sensores multiespectrais foram usados para monitorar as safras de café; mapear ervas daninhas usando redes neurais artificiais (SARTORI et al., 2009); Mapeamento da cultura do café por classificação automática usando atributos espectrais (MARUJO et al., 2017).

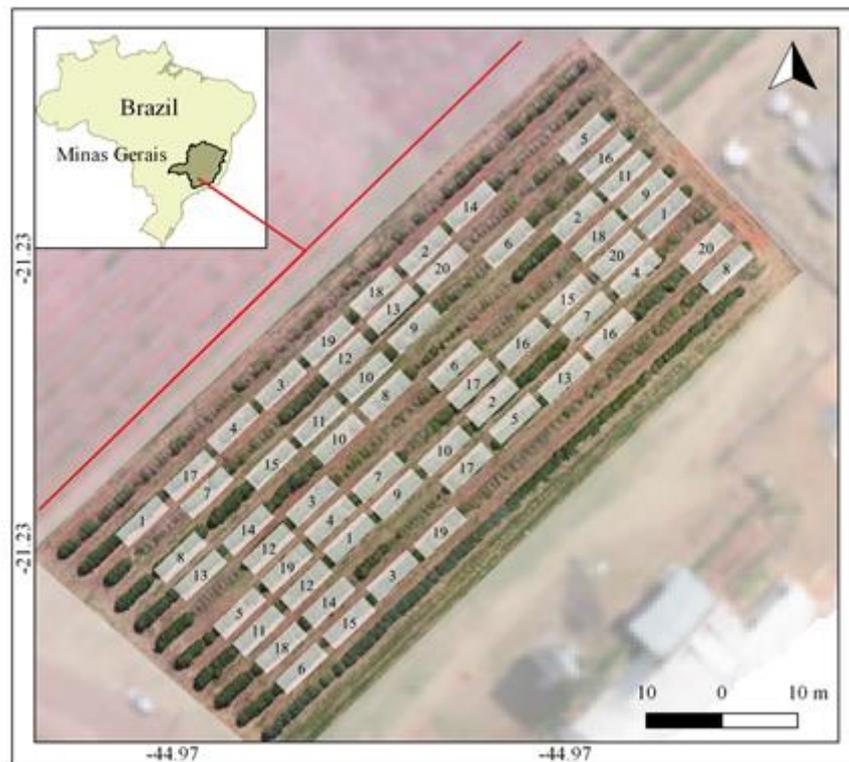
Usando algoritmos de Aprendizado de Máquina, foi possível determinar modelos de previsão da ferrugem do café (*Hemileia vastatrix*) em cafés. (Girolamo Neto et al., 2014) e detectar necrose em grãos de café (MIRANDA et al., 2020), mostrando o potencial do uso de inteligência artificial na mineração de dados de campo. De acordo com os tópicos abordados, a avaliação do enfolhamento e do vigor vegetativo de lavouras de café, pode preencher uma lacuna na literatura, uma vez que não foram realizados estudos comparativos entre diferentes sensores e alturas de coleta de dados no agroecossistema cafeeiro para estimar o NDVI de cultivares de café arábica com dados de sensor RGB.

Partindo da hipótese de que com técnicas de sensoriamento remoto multisensor e algoritmos de aprendizagem de máquinas pode-se estimar o vigor vegetativo e classificar o enfolhamento de lavouras cafeeiras, objetivou-se determinar o NDVI, e classificar o enfolhamento de 20 cultivares de café arábica e sua relação com a produtividade do cafeeiro utilizando dados de sensor RGB embarcado em um SISANT.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Área de Estudo**

A área de estudo está localizada no campo experimental do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do Café (INCT do Café) na Universidade Federal de Lavras - UFLA, com Latitude: 21 ° 13' 35" S, Longitude: 44 ° 58'14" W, com altitude média de 941,096 metros. A área foi destinada ao cultivo do café da espécie *Coffea arabica L.* A com data de plantio em 30/03/2015. As plantas estão espaçadas 3,5 m entre linhas e 0,7 m entre plantas (Figura 1).



#### Cultivares Avaliadas

1. Aranãs RV, 2. Araponga MG-1, 3. Catiguá MG-1, 4. Catiguá MG-2, 5. Catiguá MG-3, 6. Pau-Brasil MG-1, 7. Acauã, 8. Acauã Novo, 9. Arara, 10. Clone 224, 11. Clone 312, 12. Guará, 13. Saíra II, 14. Siriema, 15. Catucaí Amarelo 2SL, 16. IAPAR 59, 17. IPR 100, 18. IPR 102, 19. IPR 103, 20. Rubi MG-1192.

**Figura 1.** Lista de cultivares / genótipos para pesquisa - “INCT do Café” - Universidade Federal de Lavras - UFLA - Minas Gerais – Brasil

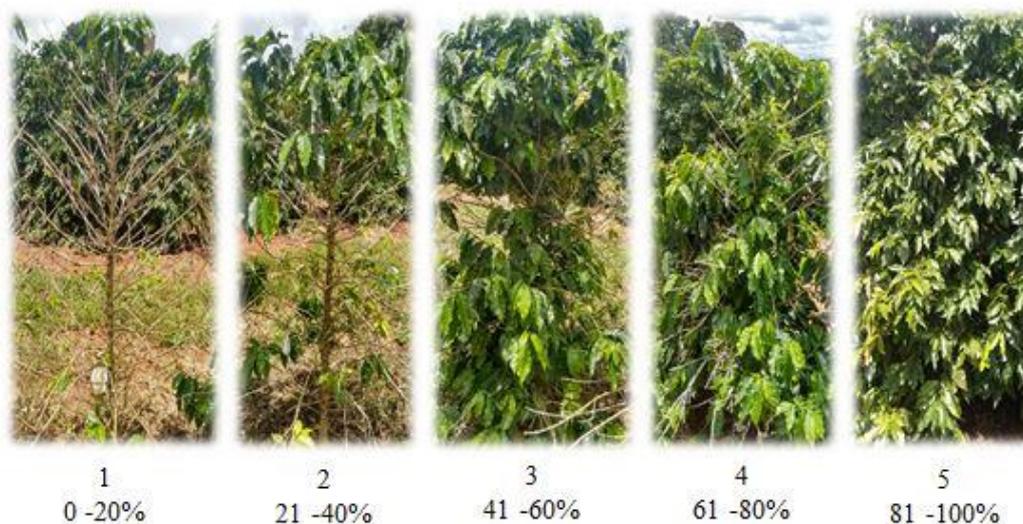
## 2.2 Definição dos pontos amostrais

Foram selecionados 90 pontos amostrais (plantas) de maneira aleatória, para obtenção do NDVI com o sensor óptico GreenSeeker™ e o satélite Sentinel 2A. Dentre os 90 pontos, foram selecionadas 20 diferentes cultivares de café arábica; MGS Aranãs RV, Araponga MG-1, Catiguá MG-1, Catiguá MG-2, MGS Catiguá 3, Pau Brasil MG-1, Acauã, Acauã Novo, Arara, Clone 224, Clone 312, Guará, Saíra II, Siriema, Catucaí Amarelo 2 SL, IAPAR 59, IPR 100, IPR 102, IPR 103, Rubi MG 1192, ambas repetidas em 3 blocos, totalizando 60 pontos para avaliação do enfolhamento, vigor vegetativo (NDVI) e produção (litros/parcela). Nesses locais, os pontos coletados no ramo ortotrópico da planta foram georreferenciados com o receptor RTK GNSS Spectra SP60 L1 / L2. Os pontos amostrais foram levantados com a técnica *Real Time Kinematic* (RTK)

e ajustados em relação à Estação Geodésica de Referência de Nível denominada 3045T do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), localizada no campus da Universidade Federal de Lavras.

### 2.3 Avaliação *in situ*

Para determinar o NDVI, foi utilizado o sensor óptico Greenseeker™ acima do dossel da planta a 1 metro de altura (ALI; IBRAHIM, 2019; BARBOSA et al., 2020). A coleta do NDVI com o sensor foi realizada no mesmo dia e horário da passagem do satélite Sentinel 2A pela área de estudo, aproximadamente às 11 horas da manhã. O enfolhamento foi avaliado *in situ* por inspeção visual de três avaliadores, considerando a nota media, com pontuações de 1 a 5, sendo 1 para plantas com folhagem baixa ou desfolhadas e 5 para plantas com folhagem máxima de acordo com a escala de pontuação (SILVA; ALVES, 2013) ( Figura 2).



**Figura 2.** Nota de classificação visual do plantio de folhas em cafezais

A produtividade foi obtida por meio da derriça manual, sendo todo volume coletado por planta foi inserido em um recipiente graduado. Logo a produtividade foi dada em litros por planta e posteriormente convertida em sacos por hectare.

## 2.4 Aquisição de imagens do Sentinel 2A e do sensor RGB a bordo do SISANT

As imagens adquiridas do Sentinel 2A foram com resolução espacial de 10 m (Tabela 1) que devido a área experimental ser considerada pequena, apenas 24 pixels das imagens ditos puros, continham expressivamente cafeeiros, os demais foram excluídos de maneira a evitar misturas espectrais devido à presença de solo exposto nas áreas adjacentes à parcela.

As configurações do plano de vôo foram, altura do SISANT a 70 m em relação ao ponto de decolagem, gimbal da câmera posicionado a 90 graus em relação ao nadir, sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 75% (BATER et al., 2011; RASMUSSEN et al., 2016) e velocidade de 3 ms-1. Ressalta-se que, devido ao Greenseeker™ adotar um raio de 60 cm de abrangência, foi utilizada uma resolução compatível de 60 cm utilizada para as imagens do sensor RGB após o processo ortomosaico.

Para a correção geométrica das imagens, foram utilizados 10 pontos de controle, os quais foram distribuídos nas bordas e no centro da área. Os pontos de controle foram georreferenciados utilizando o receptor GNSS Spectra SP60 L1 / L2 RTK, e ajustados pelos mesmos procedimentos adotados na coleta para os pontos de amostragem.

Para a imagem do Sentinel 2A, o NDVI (HUETE et al., 1997) foi calculado, que consiste basicamente na diferença normalizada entre as bandas NIR e Red (Equação 1):

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1),$$

Em relação às imagens do sensor RGB a bordo do SISANT, foi calculada a proporção normalizada entre as bandas Verde e Vermelho (NPGR), Verde e Azul (NPGB) e Vermelho e Azul (NPRB) (Equação 2.3 e 4). NPGR =

$$\frac{Green - Red}{Green + Red} \quad (2),$$

$$NPGB = \frac{Green - Blue}{Green + Blue} \quad (3),$$

$$NPGR = \frac{Red - Blue}{Red + Blue} \quad (4),$$

## 2.5 Aprendizado de máquina para estimativa de NDVI e enfolhamento

Como as imagens do sensor RGB foram ajustadas para fixar a mesma resolução espacial de 10 m do Sentinel 2 A, e de 60 cm para equiparar ao raio de abrangência do sensor óptico Greenseeker™, foram extraídos os valores das bandas vermelha, verde e azul, bem como a proporção normalizada entre as bandas para os pontos amostrados.

Para ajustar o modelo que calcula os valores NDVI com dados do sensor RGB com base nos sensores Greenseeker™, e MSI do Sentinel 2A, foi usado o algoritmo *Machine Learning Random Forest* e Regressão linear. O *Random Forest* foi ajustado considerando um erro médio absoluto como critério para ramificação e treinamento do conjunto de regras, utilizando 500 árvores de decisão.

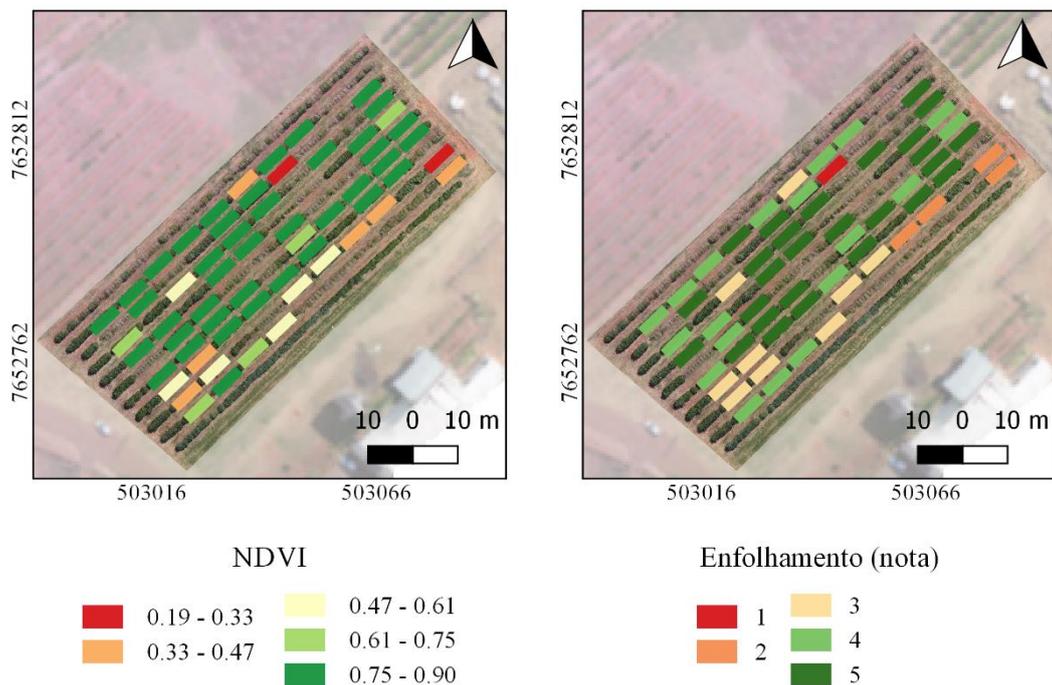
Para classificar as imagens do sensor RGB, quanto às classes de enfolhamento, utilizou-se o algoritmo *Random Forest* com 500 árvores de decisão, considerando neste caso a entrada como critério de ramificação e conjunto de regras.

A validação do modelo foi realizada pelo método *Leave one out*, que consiste em repetir o processo de validação de um ponto, onde em cada processo um único ponto é retirado do conjunto de treinamento e a interação é realizada até que todos os pontos sejam previstos.

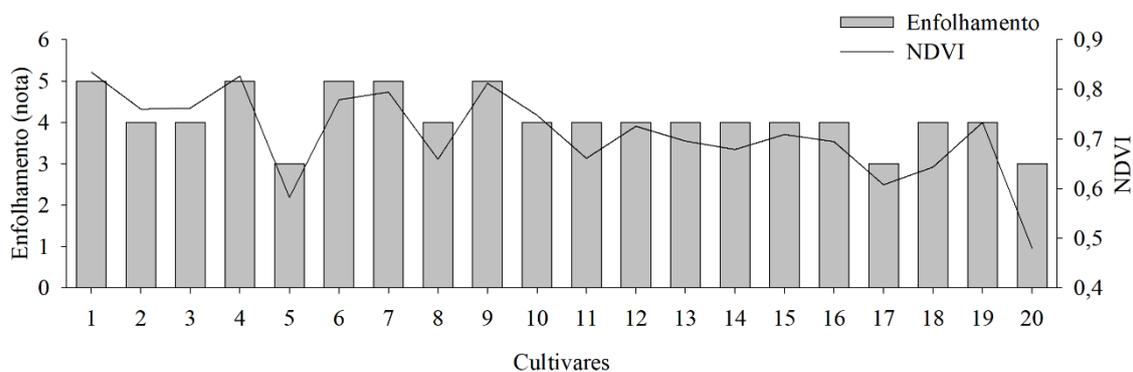
Os modelos foram submetidos a erro absoluto médio, erro quadrático médio e coeficiente de determinação. Quanto à classificação, aplicou-se precisão global e precisão global balanceada. Sendo uma precisão global, uma proporção do número total de amostras, uma precisão global equilibrada, uma proporção da média entre a sensibilidade e a especificidade do modelo.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A distribuição espacial do enfolhamento foi semelhante ao NDVI medido com o sensor óptico Greenseeker™ (Figuras 3 e 4). Plantas pouco enfolhadas apresentaram comportamento espectral que indicam que estão sofrendo de alguma doença fitossanitária, falta de água ou nutrição. O NDVI, é um indicador numérico que oscila ao longo do ciclo fenológico de algumas culturas, como o café. (HERWITZ et al., 2004; ZERBATO et al., 2016; ALMEIDA et al., 2017). Com base na análise de campo, pode-se observar uma alta correlação entre enfolhamento e NDVI ( $r$  0,97, valor de  $p < 0,01$ ).



**Figura 3.** Atribuição de notas de enfolhamento e distribuição espacial do NDVI medido pelo sensor óptico Greenseeker™.



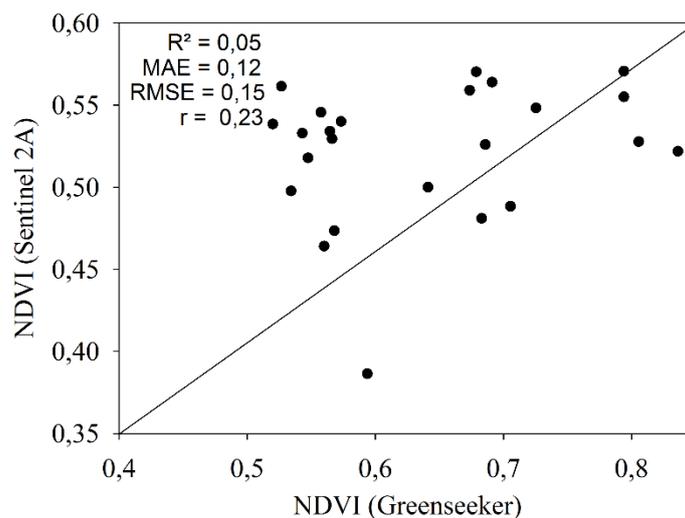
1. Aranãs RV, 2. Araçuaia MG-1, 3. Catiguá MG-1, 4. Catiguá MG-2, 5. Catiguá MG-3, 6. Pau-Brasil MG-1, 7. Acauã, 8. Acauã Novo, 9. Arara, 10. Clone 224, 11. Clone 312, 12. Guarã, 13. Saíra II, 14. Siriema, 15. Catucaí Amarelo 2SL, 16. IAPAR 59, 17. IPR 100, 18. IPR 102, 19. IPR 103, 20. Rubi MG-1192.

**Figura 4.** Comportamento da média do NDVI e do nível foliar para cultivares avaliadas

A percepção visual da folhagem é um método mais simples e intuitivo, e o NDVI pode ser considerado um método mais assertivo quando se trata de avaliar o vigor da planta.

Observou-se que existe uma correlação entre os métodos, pois ambos estão ligados ao estado das folhas do cafeeiro. Um método não substitui o outro, mas o enfolhamento pode ajudar a otimizar o uso do Greenseeker <sup>TM</sup>, já que plantas do mesmo nível de enfolhamento tendem a ter valores de NDVI próximos entre si, exigindo menos amostra para caracterizar a cultura. De acordo com Moreira et al. (2004), as folhas das plantas configuram-se como o objeto mais importante, visto que contém todas as reações fotoquímicas da planta, além de outras reações vitais, como respiração e transpiração.

Devido a altura dos sensores, o tamanho da área imageada e outros fatores como nebulosidade e correções, não houve correlação entre os valores do NDVI do sensor óptico Greenseeker <sup>TM</sup> e Sentinel 2 A (Figura 5). O Greenseeker <sup>TM</sup> capta o sinal diretamente nas folhas e por ser um sensor ativo, o sinal sofre pouca interferência no caminho entre a emissão e a recepção da energia eletromagnética. Porém, Sentinel 2 A, depende da irradiância solar que é atenuada pelos efeitos atmosféricos.



**Figura 5.** Relação do NDVI obtido pela diferença normalizada das bandas NIR e Red do Sentinel 2 A e os valores de NDVI medidos pelo sensor óptico Greenseeker <sup>TM</sup>.

A correlação das bandas RGB do SISANT, foi significativa com a relação às bandas Azul, Verde, Vermelho e NDVI do Sentinel 2 A. Com relação ao NIR, por se tratar de um espectro magnético não capturado pelo sensor RGB, as correlações foram menores em relação às demais bandas. Na faixa espectral do NIR, as plantas tendem a refletir energia eletromagnética em maior proporção do que as demais bandas, neste sentido com a presença de um maior enfolhamento da planta de café, haverá maior

refletância do NIR, porém o sensor RGB mantém o mesmo tom de cor e, portanto, resulta em uma baixa correlação entre a banda do NIR do satélite Sentinel 2 A.

A correlação entre o sensor RGB do SISANT e o NDVI do sensor óptico Greenseeker™ foi significativa e com valores mais elevados em relação ao satélite Sentinel 2 A. Devido ao Greenseeker™ capturar a refletância a uma pequena distância do alvo, ele tende a representar informações com menor mistura espectral, mantendo assim um valor mais preciso do comportamento espectral do alvo. A resolução espacial do pixel de 60 cm da imagem fornecido pelo sensor RGB do SISANT nesta análise, detalhou uma área com apenas folhas de café e, portanto, pode ter contribuído para a correlação entre o sensor RGB ser maior em relação ao sensor óptico Greenseeker™ do que o satélite Sentinel 2 A.

Em estudos realizados na cultura de tomate (ENCISO et al., 2019), nenhuma correlação ( $P > 0,05$ ) foi observada entre o sensor óptico Greenseeker™ e o NDVI estimado com o SISANT equipado com câmera multi-espectral, com altura de voo de 30 metros, pois a maneira como foi calculada o NDVI resultou em baixa correlação porque as medições do Greenseeker™ foram coletadas apontando para o dossel, enquanto o SISANT calculou a média do NDVI de toda a área vegetative resultando em um R menor que 0,45.

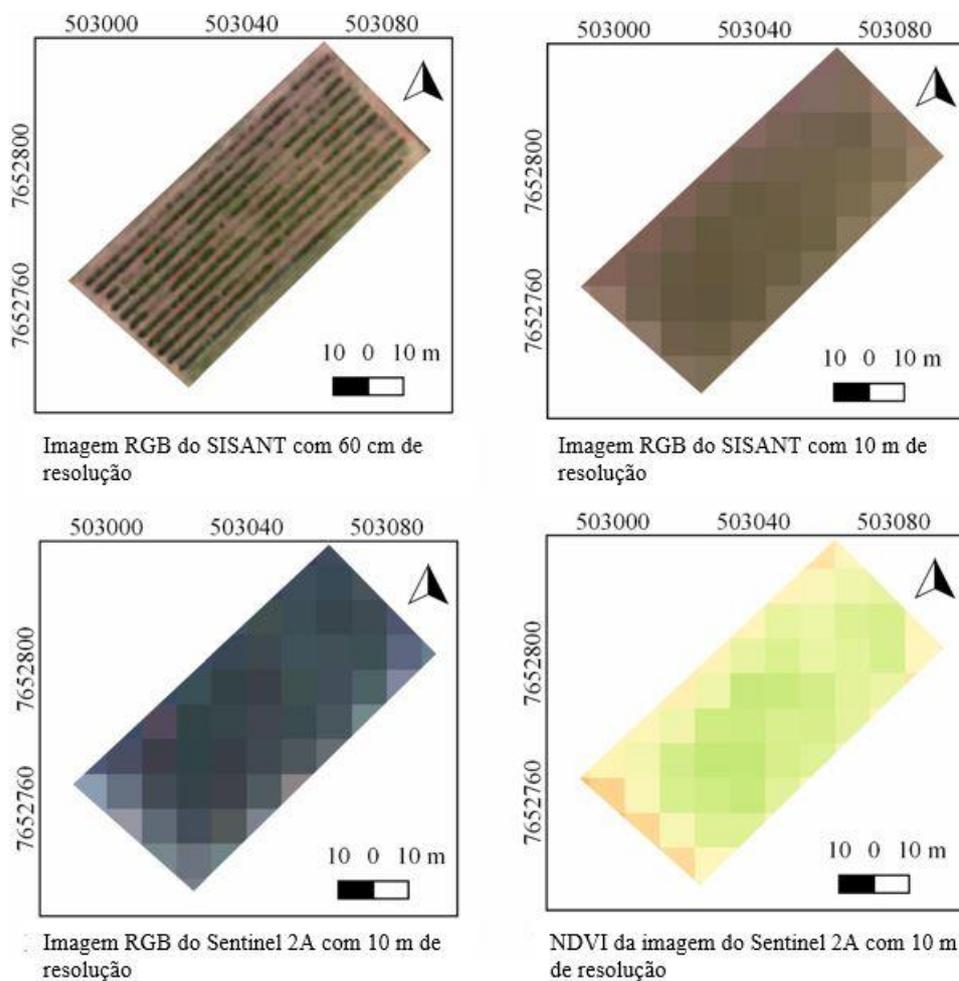
**Tabela 1.** Correlação de Pearson do NDVI proveniente do Greenseeker™ e Sentinel 2A em relação às bandas Vermelha, Azul, Verde e a relação normalizada entre as bandas do sensor RGB do SISANT.

RGB Sensor	Sentinel 2A				Greenseeker	
	Blue	Green	Red	NIR	NDVI	NDVI
Red	0.54**	0.72**	0.69**	-0.37 <sup>NS</sup>	-0.59**	-0.74**
Green	0.59**	0.75**	0.70**	-0.31 <sup>NS</sup>	-0.58**	-0.78**
Blue	0.61**	0.72**	0.75**	-0.43*	-0.66**	-0.70**
NPGR	0.09 <sup>NS</sup>	0.32 <sup>NS</sup>	0.35 <sup>NS</sup>	-0.50*	-0.45*	-0.16 <sup>NS</sup>
NPGB	-0.54**	-0.59**	-0.70**	0.57**	0.70**	-0.76**
NPRB	-0.66**	-0.61**	-0.74**	0.50*	0.69**	0.59**

\* Significante a 5%; \*\* Significante a 1%; <sup>NS</sup> Não significante para o teste t

A imagem do sensor RGB captura o sinal eletromagnético na região do visível, porém são valores de imagem digital e não refletância em si. As imagens Sentinel 2 A referem-se ao valor de refletância que é captado pelo sensor, o princípio de

funcionamento é medir a energia eletromagnética que é emitida em uma determinada área, que neste caso era de 100 m<sup>2</sup>, e a imagem do sensor RGB capturada a energia em uma área de 1 cm<sup>2</sup>. Nesse sentido, para o sensor RGB, grande parte do pixel de 10 m mais abrangia a presença de solo exposto, e por estar em outro nível orbital, o Sentinel 2 A captou um sinal predominante das plantas, o que resultou em uma imagem com tons diferentes ao comparar as imagens do sensor RGB do SISANT e do Sentinel 2 A com resolução espacial de 10 m (Figura 6).



**Figura 6.** Imagem composta em cores reais para o sensor RGB do SISANT em resolução espacial de 0,6 e 10 m e imagem composta em cores Sentinel 2A NDVI RGB 432.

A banda verde juntamente com a NPGB do sensor RGB, foram as variáveis que mais contribuíram para a diminuição do erro de predição do algoritmo *Random Forest* na

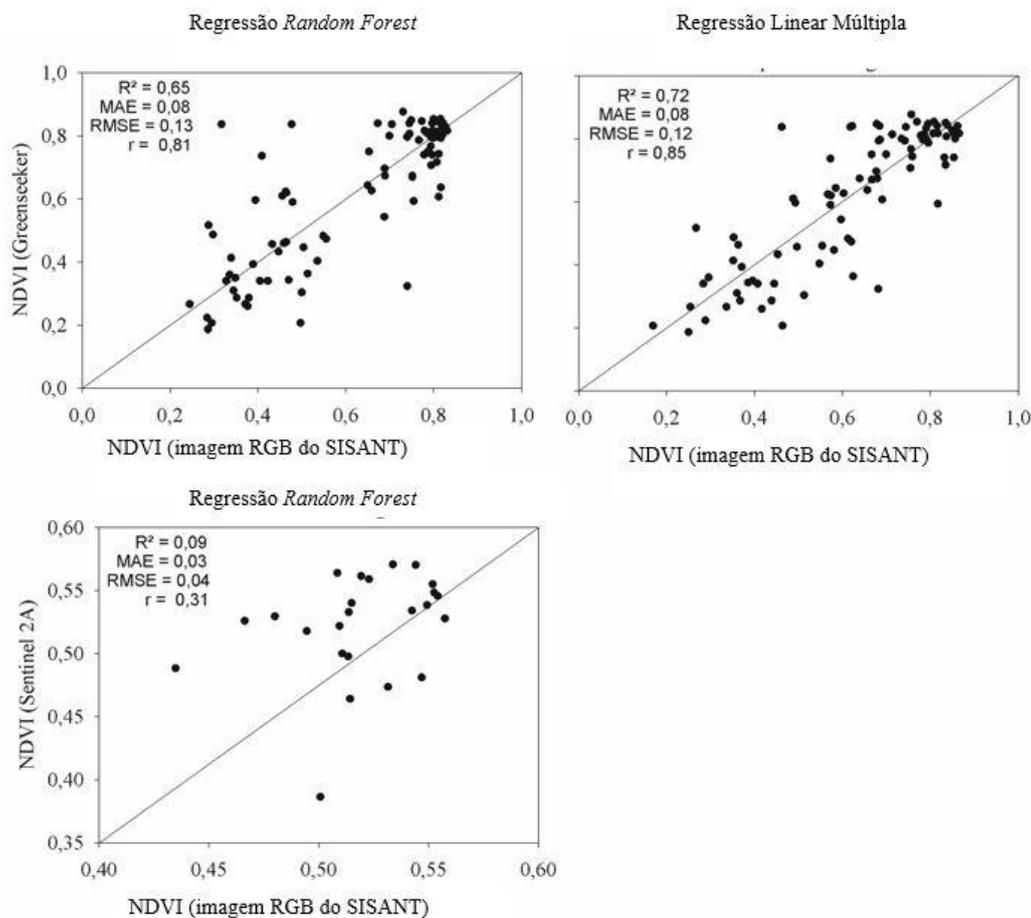
estimativa do NDVI do sensor óptico Greenseeker <sup>TM</sup>. Quanto à regressão múltipla, apenas a faixa azul não apresentou valor p significativo na predição do NDVI do sensor óptico Greenseeker <sup>TM</sup> (Tabela 2). Na estimação do NDVI do satélite Sentinel 2 A pelo sensor RGB do SISANT em geral, não houve banda proeminente para a diminuição do erro médio absoluto (MAE) e os valores de p da regressão múltipla não foram significativos.

**Tabela 2.** Importância das bandas do sensor RGB para diminuir o erro absoluto médio (MAE) e o valor de p para a estimativa de NDVI do Greenseeker <sup>TM</sup>.

Sensor RGB Bandas	Decréscimo MAE por RF		p valor por regressão múltipla	
	Greenseeker	Sentinel 2A	Greenseeker	Sentinel 2A
Red	0.097	0.131	2.1E-12	0.974
Green	0.277	0.122	6.8E-10	0.98
Blue	0.062	0.137	1.5E-01	0.995
NPGR	0.098	0.233	1.5E-04	0.997
NPGB	0.397	0.184	3.7E-05	0.998
NPRB	0.070	0.192	8.0E-05	0.999

A modelagem das bandas do sensor RGB para estimar o NDVI foi mais promissora com o uso do sensor óptico Greenseeker <sup>TM</sup> e a regressão linear múltipla (Equação 4) obteve o melhor ajuste ( $R^2$  0,72). Porém, para o NDVI do satélite Sentinel 2 A, não foi possível um ajuste com  $R^2$  representativo (Figura 7). Muitos fatores podem ter influenciado a divergência entre as imagens do SISANT e satélite Sentinel 2 A, como altura de tomada de dados, tamanho da área avaliada, resolução espacial, efeitos atmosféricos e o sensor óptico ser um sensor ativo enquanto sensor MSI do satélite Sentinel 2A ser um sensor passivo.

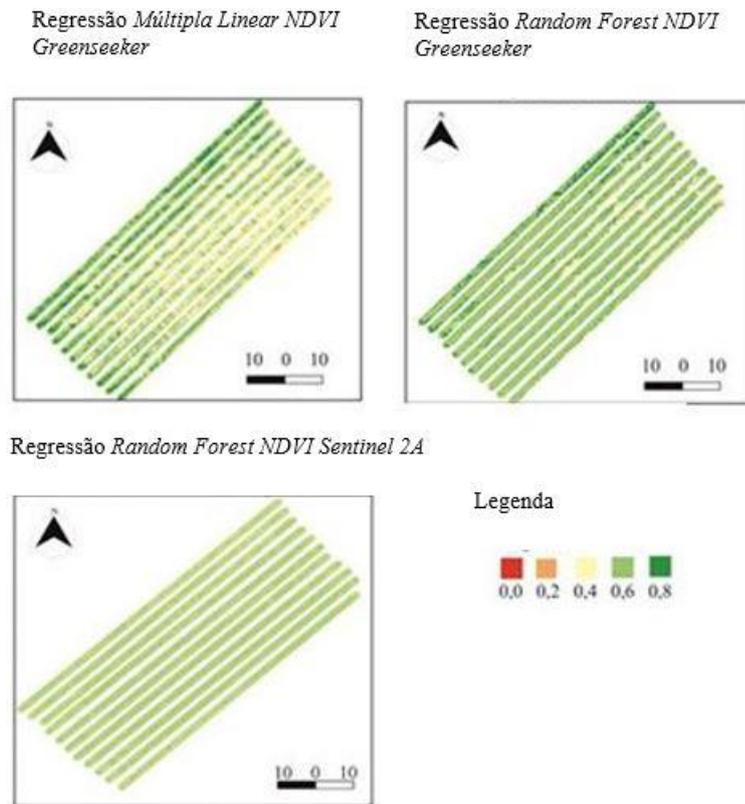
$$NDVI = 0,04Red - 0,03Green - 119,5NPGR + 118,2NPGB + 123,8NPRB + 0,25 \quad (4)$$



**Figura 7.** Valores preditos e esperados na estimativa de NDVI provenientes do sensor óptico Greenseeker<sup>TM</sup> e Sentinel 2 A usando imagem do sensor RGB do SISANT com métodos de *Random Forest* e regressão linear múltipla.

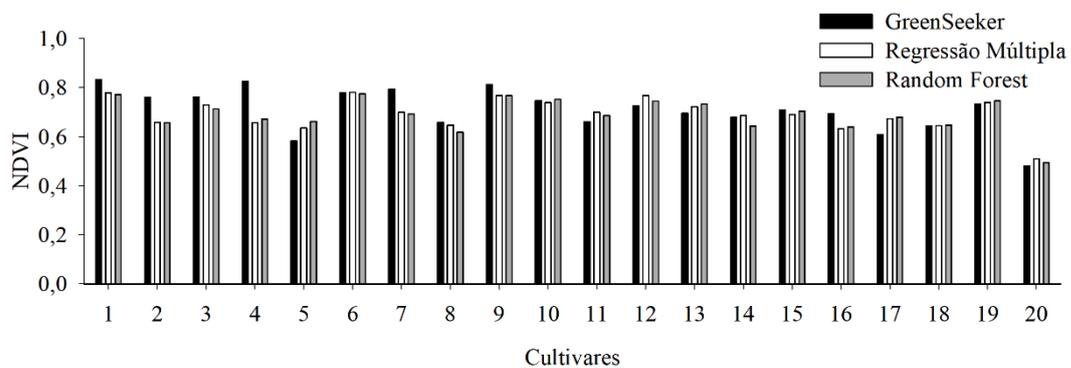
Chemura et al., (2018b), avaliou os níveis de infecção de ferrugem com métodos de aprendizado de máquina simulando dados do sensor MSI do satélite Sentinel-2. Com acertos de 63,5% e 71,4% utilizando bandas espectrais e índices de vegetação para detectar a ferrugem do café, respectivamente.

Portanto, aplicando os modelos gerados na imagem do sensor RGB do SISANT, a distribuição espacial NDVI foi mais consistente com sensor óptico Greenseeker<sup>TM</sup> com aplicação de regressão linear múltipla (Figura 8). Em relação à estimativa de NDVI do Sentinel 2 A, os valores foram pouco distribuídos, com a imagem praticamente da mesma tonalidade, esse reflexo pode ser atribuído pela pouca variação dos valores de NDVI para treinar o algoritmo, portanto não foi possível estimar valores fora a faixa de valores do conjunto de treinamento.



**Figura 8.** NDVI calculado na imagem do sensor RGB do SISANT pelos modelos de regressão múltipla do *Machine Learning* e *Random Forest*.

Considerando a média das estimativas para as cultivares, os erros foram relativamente baixos em comparação ao GreenSeeker™ (Figura 9), o que pode indicar que os principais erros foram os pontos *outlier* que tendem a ser reduzidos pela média dos valores de NDVI do cultivares.



1. Aranãs RV, 2. Araçuaçu MG-1, 3. Catiguá MG-1, 4. Catiguá MG-2, 5. Catiguá MG-3, 6. Pau-Brasil MG-1, 7. Acauã, 8. Acauã Novo, 9. Arara, 10. Clone 224, 11. Clone 312, 12. Guará, 13. Safra II, 14. Siriema, 15. Catucaí Amarelo 2SL, 16. IAPAR 59, 17. IPR 100, 18. IPR 102, 19. IPR 103, 20. Rubi MG-1192.

**Figura 9.** NDVI médio para cultivares observadas com o sensor óptico GreenSeeker™ e estimado por *Random Forest* e regressão linear múltipla.

Na classificação das imagens RGB, sendo a banda verde e o NPGb, obtiveram maior importância para a definição das notas do enfolhamento (Tabela 3). Quanto maior o enfolhamento, maior a cor da imagem em tons verdes e conseqüentemente a relação nesta faixa espectral.

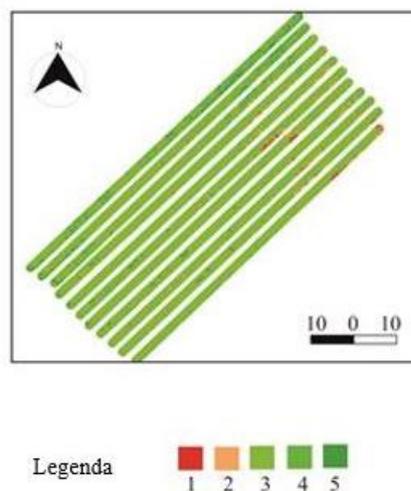
**Tabela 3.** Importância das bandas do sensor RGB para diminuir a entropia na estimativa da nota da folhagem.

Bandas	Decréscimo da Entropia por RF
Red	15.20%
Green	21.17%
Blue	14.71%
NPGR	12.88%
NPGb	21.79%
NPRb	14.24%

A acurácia geral foi de 0,43 e o BAC de 0,45, assim como a acurácia produzida (52,78%) e do usuário (60,64%) que obteve os maiores valores na detecção de plantas com nota 5 de enfolhamento (Tabela 4). A variabilidade espacial da folhagem estimada pelo *Random Forest* foi centrada nas classes 3 e 4 (Figura 10), com a folhagem *in situ* centrada na classe 5 (Figura 3).

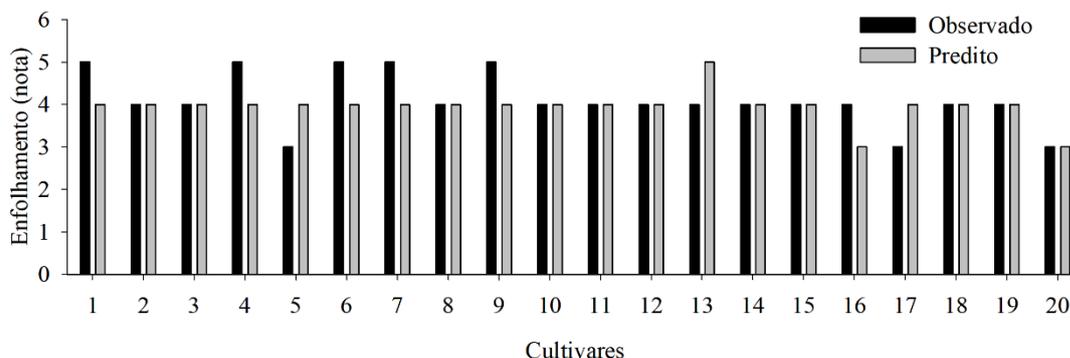
**Tabela 4.** Acurácia produzida e do usuário na classificação das imagens RGB de acordo com a nota de folhagem pelo algoritmo *Random Forest*

Enfolhamento (nota)	Acurácia Produzida	Acurácia do Usuário
1	23.08%	15.79%
2	38.78%	44.19%
3	39.58%	38.78%
4	36.54%	29.23%
5	52.78%	60.64%



**Figura 10.** Classificação do algoritmo *Random Forest* na previsão do enfolhamento utilizando imagem do sensor RGB do SISANT.

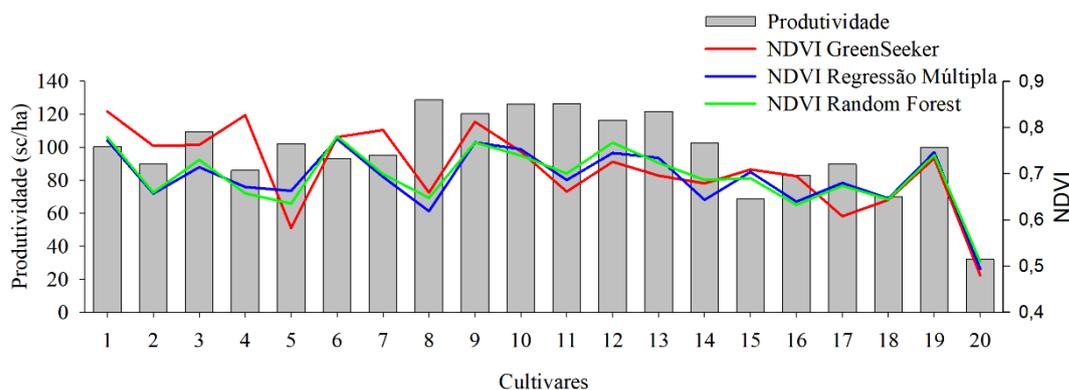
Na média dos valores por cultivar, os erros observados foram da ordem de uma classe (Figura 11). Ressalta-se que este método visual para notas de enfolhamento pode ser subjetivo dependendo do avaliador, portanto, erros de nota acima ou abaixo da previsão são resultados esperados.



**Figura 11.** Pontuação média do enfolhamento para cultivares observadas *in situ* e estimadas por *Random Forest* em imagem de sensor RGB do SISANT.

A produtividade média das cultivares obteve valores que acompanham a tendência do NDVI no qual a baixa produtividade obteve relação direta com o índice. A cultivar

Rubi MG-1192 (Figura 12) apresentou menor produtividade, NDVI e enfolhamento, esta cultivar possui a característica de baixo porte, sendo indicada para o manejo manual da cultura (PEREIRA et al., 2014). No entanto, esta característica pode inferir a respeito do baixo enfolhamento, mas a produtividade abaixo de 30 sc/ha não é comum para cultura o que indica que haja algum problema fitossanitário.

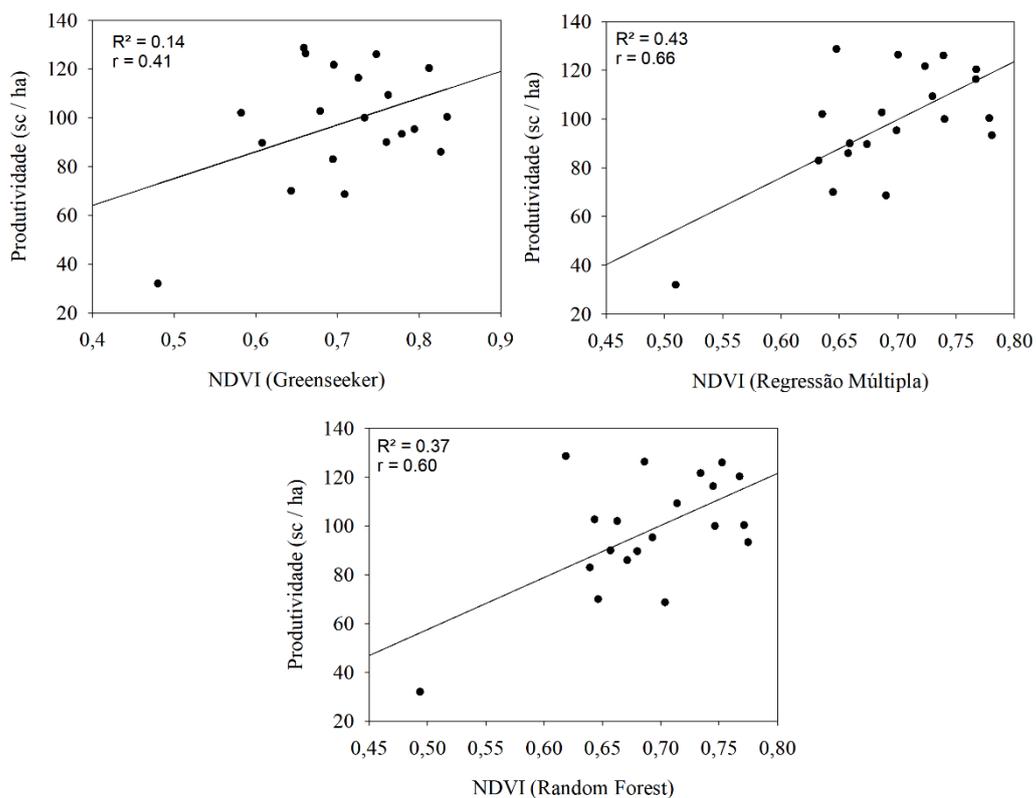


1. Aranãs RV, 2. Araçuaçu MG-1, 3. Catiguá MG-1, 4. Catiguá MG-2, 5. Catiguá MG-3, 6. Pau-Brasil MG-1, 7. Acauã, 8. Acauã Novo, 9. Arara, 10. Clone 224, 11. Clone 312, 12. Guará, 13. Safra II, 14. Siriema, 15. Catucaí Amarelo 2SL, 16. IAPAR 59, 17. IPR 100, 18. IPR 102, 19. IPR 103, 20. Rubi MG-1192.

**Figura 12.** Relação da média da produtividade e NDVI estimado por diferentes métodos de regressão para cada cultivar avaliada.

Por outro lado, a cultivar Acauã Novo, apresentou uma maior divergência entre o NDVI e a produtividade. Estudos comparativos entre cultivares demonstram que a Acauã Novo apresenta um percentual maior de frutos cerejas, seco e verde em relação as demais cultivares tais como Caiá Cerrado-MG 1474; Mundo Novo IAC 379-19; Bourbon Amarelo IAC J10; Catucaí Vermelho IAC 99 (FERNANDES et al., 2020). Esta divergência na maturação indica que a cultivar não produz de modo homogêneo, o que pode ter ocorrido.

Apesar dos dados serem insuficientes para obtenção de um modelo de predição de produtividade para cada cultivar, foi possível observar um padrão para algumas cultivares tais como IPR 100, Catucaí Amarelo 2SL, Aranãs RV nos quais podem ser alvos de estudos mais aprofundados. No entanto, quando estudado todas as cultivares em conjunto pode observar uma correlação entre a produtividade e o NDVI (Figura 13). Destaca-se o NDVI obtido pela regressão múltipla linear com os melhores resultados em relação as demais estimativa do índice.



**Figura 13.** Relação entre o NDVI estimado por diferentes métodos de regressão e a produtividade para todas as cultivares

Estudos com imagem orbitais já observaram uma relação entre o índice e a produtividade. Geralmente são empregues nos modelo agrometeorológicos espectrais sendo o NDVI a componente spectral representante dos aspectos de enfolhamento da cultura (PICINI, 1998; ROSA et al., 2010; SILVA et al., 2011; BERNARDES et al., 2012; ALMEIDA et al., 2017). A equação da regressão múltipla do NDVI obtido por imagens do SISTANT, pode ser empregue em mapeamento de grande escala, possibilitando uma estimativa de produtividade à nível de planta e assim exercer maior acurácia na agricultura de precisão.

## 4 CONCLUSÃO

A metodologia utilizada no tratamento de dados espectrais, e o uso de índices científicos de imagens por um sensor RGB embutido em SISANT, proporcionou detecção simples e direta por NDVI visível. Portanto, a técnica utilizada com o SISANT, pode ser utilizada para uma análise detalhada em nível de planta, compatibilizando técnicas de Sensoriamento Remoto, colaborando na eficiência do controle da safra de café e na tomada de decisões. As imagens do satélite Sentinel-2A, devido à resolução espacial de 10 metros, são recomendadas para áreas de grandes culturas, ou áreas maiores onde a obtenção de imagens com SISANT não é viável.

## Agradecimentos

Os autores agradecem (i) ao Departamento de Engenharia Agrônômica da Universidade Federal de Lavras (UFLA) pela disponibilização de escritórios e infraestrutura para o alcance dos resultados obtidos neste artigo, (ii) à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) (iii) e o INCT do Café.

## REFERENCIAS

- ALI, A. M.; IBRAHIM, S. M. Wheat grain yield and nitrogen uptake prediction using atLeaf and GreenSeeker portable optical sensors at jointing growth stage. **Information Processing in Agriculture**, 2019. Elsevier.
- ALMEIDA, T. S.; SEDIYAMA, G. C.; ALENCAR, L. P. DE. Estimativa Da Produtividade De Cafeeiros Irrigados Pelo Método Zona Agroecológica Espectral. **Revista Engenharia Na Agricultura - Reveng**, v. 25, n. 1, p. 1–11, 2017.
- BARBOSA, S. M.; SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C. DE; et al. Deep furrow and additional liming for coffee cultivation under first year in a naturally dense inceptisol. **Geoderma**, v. 357, p. 113934, 2020. Elsevier.
- BATER, C. W.; COOPS, N. C.; WULDER, M. A.; et al. Using digital time-lapse cameras to monitor species-specific understorey and overstorey phenology in support of wildlife habitat assessment. **Environmental monitoring and assessment**, v. 180, n. 1–4, p. 1–13, 2011. Springer.
- BERNARDES, T.; ALVES MOREIRA, M.; ADAMI, M.; FRIEDRICH THEODOR

RUDORFF, B. Monitoring biennial bearing effect on coffee yield using MODIS remote sensing imagery. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, v. 4, n. 9, p. 3760–3763, 2012. Molecular Diversity Preservation International.

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. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS).

CHEMURA, A.; MUTANGA, O.; SIBANDA, M.; CHIDOKO, P. Machine learning prediction of coffee rust severity on leaves using spectroradiometer data. **Tropical Plant Pathology**, v. 43, n. 2, p. 117–127, 2018. Springer.

CUNHA, J. P. A. R. DA; NETO, S.; MATHEUS, A.; HURTADO, S. Estimating vegetation volume of coffee crops using images from unmanned aerial vehicles. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. SPE, p. 41–47, 2019. SciELO Brasil.

ENCISO, J.; AVILA, C. A.; JUNG, J.; et al. Validation of agronomic UAV and field measurements for tomato varieties. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2019.

FERNANDES, M. I. DOS S.; ASSIS, G. A. DE; NASCIMENTO, L. G. DO; et al. Parâmetros produtivos e de qualidade de cultivares de cafeeiros na região do Alto Paranaíba, Minas Gerais, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e147996681, 2020.

HERWITZ, S. R.; JOHNSON, L. F.; DUNAGAN, S. E.; et al. Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support. **Computers and electronics in agriculture**, v. 44, n. 1, p. 49–61, 2004. Elsevier.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K. V.; LEEUWEN, W. VAN. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote sensing of environment**, v. 59, n. 3, p. 440–451, 1997. Elsevier.

JOHNSON, L. F.; TROUT, T. J. Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. **Remote Sensing**, v. 4, n. 2, p. 439–455, 2012. Molecular Diversity Preservation International.

MARUJO, R. DE F. B.; MOREIRA, M. A.; VOLPATO, M. M. L.; ALVES, H. M. R. Mapeamento da cultura cafeeira por meio de classificação automática utilizando atributos espectrais, texturais e fator de iluminação. , 2017. Editora UFLA.

- MIRANDA, J. DA R.; CARVALHO ALVES, M. DE; POZZA, E. A.; NETO, H. S. Detection of coffee berry necrosis by digital image processing of landsat 8 oli satellite imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 85, p. 101983, 2020. Elsevier.
- MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Spectral and temporal behavior analysis of coffee crop in Landsat images. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 3, p. 223–231, 2004. SciELO Brasil.
- PEREIRA, A. A.; MORAIS, A. R. DE; SCALCO, M. S.; FERNANDES, T. J. Descrição do crescimento vegetativo do cafeeiro cultivar rubi mg 1192, utilizando modelos de regressão. **Coffee Science**, v. 9, n. 2, p. 266–274, 2014. Editora UFPA.
- PICINI, A. G. Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) a partir do monitoramento da disponibilidade hídrica do solo. , 1998. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo.
- RASMUSSEN, J.; NTAKOS, G.; NIELSEN, J.; et al. Are vegetation indices derived from consumer-grade cameras mounted on UAVs sufficiently reliable for assessing experimental plots? **European Journal of Agronomy**, v. 74, p. 75–92, 2016. Elsevier.
- ROSA, V. G. C.; MOREIRA, M. A.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 12, p. 1478–1488, 2010.
- SARTORI, L. R.; GALO, M. DE L. B. T.; IMAI, N. N. Mapeamento de plantas daninhas em cultura de café a partir de imagens multiespectrais de escalas grandes usando redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Cartografia**, , n. 61/2, 2009.
- SILVA, F. M. DA; ALVES, M. DE C. **Cafeicultura de precisão**. 1 ed ed. Editora UFPA, 2013.
- SILVA, S. DE A.; SOUZA LIMA, J. S. DE; OLIVEIRA, R. B. DE. Modelo agrometeorológico na estimativa da produtividade de duas variedades de café arábica considerando a variabilidade espacial. **Irriga**, p. 1–10, 2011.
- ZANZARINI, F. V; PISSARRA, T. C. T.; BRANDÃO, F. J. C.; TEIXEIRA, D. D. B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, p. 608–614, 2013.
- ZERBATO, C.; ROSALEN, D. L.; FURLANI, C. E. A.; DEGHAID, J.; VOLTARELLI,

M. A. Agronomic characteristics associated with the normalized difference vegetation index (NDVI) in the peanut crop. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 5, p. 758, 2016. Southern Cross Publishers.