

CAMILA ISABEL PEREIRA REZENDE

IMAGENS MULTIESPECTRAIS PARA DISCRIMINAR FONTES DE ADUBO NO
CAFEEIRO

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

Orientadora

Prof^a Dr^a Gleice Aparecida de Assis

Coorientador

Prof. Dr. George Deroco Martins

MONTE CARMELO

MINAS GERAIS – BRASIL

2022

CAMILA ISABEL PEREIRA REZENDE

IMAGENS MULTIESPECTRAIS PARA DISCRIMINAR FONTES DE ADUBO NO
CAFEEIRO

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

APROVADA em 24 de fevereiro de 2022

Banca examinadora

Prof^a Dr^a Gleice Aparecida Assis – Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis – Universidade Federal de Uberlândia

Dr. Fábio Janoni Carvalho – Instituto Federal do Triângulo Mineiro – Campus Uberaba

Prof^a Dr^a Gleice Aparecida Assis
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS – ICIAG

MONTE CARMELO
MINAS GERAIS – BRASIL

2022

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

R467
2022 Rezende, Camila Isabel Pereira, 1995-
Imagens multiespectrais para discriminar fontes de
adubo no cafeeiro [recurso eletrônico] / Camila Isabel
Pereira Rezende. - 2022.

Orientadora: Gleice Aparecida de Assis.
Coorientador: George Deroco Martins.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Agricultura e Informações
Geoespaciais.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.140>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Agronomia. I. Assis, Gleice Aparecida de, 1986-,
(Orient.). II. Martins, George Deroco, 1987-,
(Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.
Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais.
IV. Título.

CDU: 631

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



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



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agricultura e Informações Geoespaciais				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico				
Data:	24/02/2022	Hora de início:	8:30	Hora de encerramento:	11:00
Matrícula do Discente:	32012AIG004				
Nome do Discente:	Camila Isabel Pereira Rezende				
Título do Trabalho:	Imagens multiespectrais para discriminar fontes de adubo no cafeeiro				
Área de concentração:	Informações geoespaciais e tecnologias aplicadas à produção agrícola				
Linha de pesquisa:	Sistemas integrados de produção vegetal				

Reuniu-se na sala virtual Google Meet (<https://meet.google.com/iid-xnxs-wxw>) a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais, assim composta: Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis (UFU), Dr. Fabio Janoni Carvalho (Instituto Federal do Triângulo Mineiro - Campus Uberaba), Dra. Gleice Aparecida de Assis (UFU) – orientadora da candidata.

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

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

Aprovado(a).

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

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

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

Documento assinado eletronicamente por **Gleice Aparecida de Assis, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/03/2022, às 13:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º,



§ 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fábio Janoni Carvalho, Usuário Externo**, em 22/03/2022, às 14:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Bezerra de Araujo Gallis, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/03/2022, às 18:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3460777** e o código CRC **82A24314**.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais José Benedito de Rezende e Vilma Pereira de Faria, pelo amor e apoio que sempre me deram ao longo do mestrado, pelas broncas quando eu pensava em desistir e pelas orações em meu nome. Dedico esse trabalho à cada professor que passou ao longo de minha jornada acadêmica, cada um de vocês com certeza fazem parte dessa conquista.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e Nossa Senhora por me iluminar e proteger meus caminhos, por dar forças nos momentos de cansaço e saúde em tempos tão difíceis.

A minha orientadora e amiga Prof^ª. Dra. Gleice Aparecida de Assis, pelo carinho que me acolheu como sua orientanda, por todos os ensinamentos, pela paciência comigo e principalmente por nunca me deixar desistir, sempre me entender e apoiar em cada momento.

Ao meu coorientador Prof. Dr. George Deroco Martins por cada reunião de extrema aprendizagem, pelo empenho em me ajudar a construir esse trabalho e por todos os momentos em que se propôs a me ensinar, criticar e apoiar.

A Professora Dra. Ana Carolina Silva Siquieroli pela disponibilização e auxílio em todas as análises laboratoriais e pelas orientações que recebi.

A toda a equipe técnica da UFU que me orientou em cada processo e se dispuseram a ajudar em todas as avaliações, em especial ao mestre Renato Aurélio que, além do auxílio como técnico, guiou-me na direção que eu deveria seguir com base nos desafios que ele já tinha passado.

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

As minhas queridas e fieis ajudantes Nathalia Oliveira e Maria Olívia! Sem vocês eu jamais conseguiria finalizar este trabalho hoje. Obrigada por tornar cada avaliação mais alegre e me apoiarem em todos os momentos.

Ao meu querido Iago Radamés por toda a paciência ao longo desses dois anos de mestrado, pelas ajudas em campo, pelas avaliações que fez por mim, pelos momentos de debate sobre o trabalho e por nunca ter me deixado, sempre me apoiando e ficando feliz por cada conquista.

A todos meus amigos pelo companheirismo, por entender minha correria e os momentos de estresse, por compartilhar a experiência de vocês com o mestrado e por sempre me apoiar e torcer por essa conquista.

Ao Cafeicultor Laércio Crippa, que infelizmente não está mais entre nós. Ele nos forneceu a área experimental e sempre foi um incentivador da pesquisa e parceiro na Universidade.

A empresa AgroCP e ao Dr. Miguel Franco pela parceria conosco e pelo fornecimento de todos os insumos necessários e auxílio financeiro para as análises laboratoriais.

A empresa Soul Baru e a Diretora Operacional Amanda Brasiel Rocha, por todo o apoio e incentivo, os quais possibilitaram a conciliação da minha carreira profissional com o mestrado.

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

BIOGRAFIA

Camila Isabel Pereira Rezende nasceu em Anápolis – GO em 29 de abril de 1995, filha de Vilma Pereira de Faria e José Benedito de Rezende, ambos trabalhadores rurais. Residiu até os cinco anos de idade em Silvânia – GO, até o momento em que meu pai decidiu voltar para sua cidade natal, Santa Cruz de Goiás - GO, onde toda sua família residia. Desde então passou sua infância morando em fazendas onde seus pais trabalhavam, iniciando os estudos aos cinco anos, no distrito de Santo Antônio da Esperança, se deslocando diariamente no transporte escolar rural. Quando finalizou a 7^o série foi para o Colégio Estadual Senador Antônio de Ramos Caiado – CESARC, em Santa Cruz de Goiás.

Devido sua ambição em se desenvolver profissionalmente, aos 15 anos, quando terminou o 9^o ano, decidiu sair de casa e se mudar para Urutaí – GO, para cursar o ensino médio integrado com o curso de Técnico em Informática no Instituto Federal Goiano Campus Urutaí, onde vislumbrou uma forma de fazer o curso técnico em uma instituição de ensino de qualidade.

Durante o ensino médio, participou do movimento estudantil, congressos e cursos em diversas áreas. No final do segundo ano se tornou residente na instituição, onde passou a conhecer mais pessoas do curso de Agronomia e se interessar pela área. No final de 2013 se formou no ensino médio e concluiu o curso de Técnico em Informática. Em 2014 ingressou no curso de Agronomia na Universidade Federal de Uberlândia - Campus Monte Carmelo.

Durante a graduação atuou no movimento estudantil e no segundo período do curso ingressou em dois grupos de pesquisa: Grupo de Pesquisa e Extensão em Recursos Naturais e Agrícolas - RENAGRI e o Núcleo de Agroecologia do Cerrado Mineiro – NACEM onde permaneceu até o fim da graduação. Desde então passou a focar na pesquisa e atuação em diversos projetos, na área de microbiologia do solo, agroecologia e manejo e conservação do solo. No 4^o período teve a oportunidade de retornar ao IFGoiano de Urutaí para estagiar na Fazenda Agroecológica. No 6^o período da graduação ingressou na Empresa Júnior do curso de Agronomia – Concampo Jr, atuando como Diretora de Marketing e Desenvolvimento. No 8^o período foi aprovada para o estágio da Embrapa Gado de Corte em Campo Grande, onde trabalhou com manejo e conservação de pastagem. Durante a graduação atuou em várias áreas, além de monitorias, organização de eventos, congressos e publicações de artigos. Em agosto de 2019 concluiu o curso de Agronomia já com a decisão de ingressar no mestrado.

No dia 20 de março de 2020 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais da Universidade Federal de Uberlândia – Campus Monte Carmelo, onde foi orientada pela Prof. Dra. Gleice Aparecida Assis, especialista na cultura do cafeeiro. Desenvolveu sua pesquisa com fertilidade do cafeeiro utilizando fontes e doses de adubação mineral e organomineral, avaliando o comportamento vegetativo e produtivo do cafeeiro e coletando imagens multiespectrais adquiridas com Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) para analisar como as plantas respondiam aos tratamentos de forma espectral. Em 2020, ingressou no mercado de trabalho, retornando a Goiás para trabalhar com o fruto do cerrado baru (*Dipteryx alata*) e atuar na área de aquisição de matéria-prima e analista de qualidade na empresa Soul Baru. E ao longo de dois anos percorrendo os estados de Goiás e Minas Gerais, no dia 24 de fevereiro de 2022 recebeu o título de “Mestre”.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
INTRODUÇÃO	1
MATERIAL E MÉTODOS	2
RESULTADOS E DISCUSSÃO	7
CONCLUSÕES	18
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18

RESUMO

REZENDE, CAMILA ISABEL PEREIRA. **Imagens multiespectrais para discriminar fontes de adubo no cafeeiro.** 2022, 19 páginas. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Informações Geoespaciais) – Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil¹.

A adubação do cafeeiro é um ponto fundamental para todo o desenvolvimento da planta e deve ser manejada em função do estágio fenológico da cultura. A fonte e a dose de fertilizante a ser utilizada é uma escolha importante, afetando não apenas a produtividade, mas também as propriedades químicas e biológicas do solo. O monitoramento remoto do manejo das lavouras cafeeiras faz-se necessário a uma demanda cada vez mais crescente nas tomadas de decisão, onde o intuito é promover o aumento da produção com base no manejo sustentável. Neste trabalho avaliou-se o potencial de imagens obtidas por sensores de baixo custo na discriminação de fontes de adubo mineral e organomineral em cafeeiro. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com cinco blocos e seis tratamentos, sendo: (T1) 100% do tratamento com organomineral, (T2) 70% do tratamento com organomineral, (T3) 50% do tratamento com organomineral, (T4) 100% da adubação mineral, (T5) 70% da adubação mineral e (T6) tratamento padrão da propriedade. Após o manejo utilizamos a câmera Mapi 3 Survey3W acoplada a uma ARP drone – Phantom4 para tomar imagens do experimento ao longo de período vegetativo de 12 meses. Concomitante a tomada de imagens coletamos parâmetros agronômicos de crescimento do cafeeiro e produtividade por duas safras e concluímos que diferentes doses de adubação não afetaram significativamente as características analisadas. A partir da classificação supervisionada de imagens multiespectrais foi possível discriminar tratamentos com maior grau de acurácia (86,66% de acerto) do que quando analisados parâmetros de crescimento do cafeeiro.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L., manejo de adubação, monitoramento remoto de baixo custo, discriminação de tratamentos.

¹Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Gleice Aparecida de Assis

ABSTRACT

REZENDE, CAMILA ISABEL PEREIRA. **Multispectral images to discriminate sources of fertilizer in coffee trees.** 2022, 18 pages. Dissertation (Master in Agriculture and Geospatial Information), Federal University of Uberlândia, *Campus Monte Carmelo*, Minas Gerais, Brazil.

Coffee fertilization is key for the entire plant development and must be managed according to the phenological stage of the crop. The source and dose of the fertilizer to be used is an important choice, as it affects not only productivity but also the chemical and biological properties of the soil. Remote monitoring of the management of coffee crops is necessary as the demand in decision-making, where the aim is to rise production based on sustainable management is in a constant growth. In this work, we evaluated the potential of images obtained by low-cost sensors in the discrimination of sources of mineral and organomineral fertilizers in coffee. The experimental design was in randomized blocks, with five blocks and six treatments, as follows: (T1) - 100% of the organomineral treatment; (T2) - 70% of the organomineral treatment; (T3) - 50% of the organomineral treatment; (T4) - 100% of mineral fertilization; (T5) - 70% of mineral fertilization (T6) - standard treatment of the farm. After management, we used the Mapiir 3 Survey3W camera coupled to an ARP drone – Phantom4 to take images of the experiment over a 12-month vegetative period. Combined with image taking, we collected agronomic parameters of coffee growth and productivity for two crops and concluded that different fertilization doses did not significantly affect the analyzed characteristics. Based on the supervised classification of multispectral images, it was possible to discriminate treatments with a higher degree of accuracy (86.66% accuracy) than when analyzing coffee growth parameters.

Keywords: *Coffea arabica* L., fertilization management, low-cost remote monitoring, treatment discrimination

1 INTRODUÇÃO

A adubação do cafeeiro é um ponto fundamental para todo o desenvolvimento da planta e deve ser manejada em função do estágio fenológico da cultura. A fonte e a dose de fertilizante a ser utilizada é uma escolha importante, afetando não apenas a produtividade, mas também as propriedades químicas e biológicas do solo. As fontes de adubo mineral proporcionam rápida disponibilização de nutrientes, entretanto, ao longo do tempo, dependendo da dose aplicada, podem ocasionar acidificação do solo, principalmente no caso do nitrogênio (FRANCIOLI et al., 2016).

Já os fertilizantes organominerais, além de disponibilizarem matéria orgânica, constituem uma forma de reaproveitamento de resíduos orgânicos oriundos de diversos setores do agronegócio (ALMEIDA et al., 2020). A matéria orgânica fornecida pelos adubos organominerais auxilia na qualidade do solo, melhorando as propriedades físicas, físico-químicas, químicas e biológicas, pois o conjunto destes atributos é fundamental para a fertilidade (SOUZA et al., 2018).

Inovações como a agricultura de precisão (AP) coleta informações com confiabilidade que auxiliam no manejo da lavoura, reduzindo entradas em campo e processos manuais, acarretando em melhor aproveitamento do tempo e de recursos financeiros. Tecnologias como aeronaves remotamente pilotadas (ARP) para captura de imagens e a inteligência artificial são capazes de identificar anomalias nas lavouras, podendo discriminar áreas em diversas situações (SANTOS et al., 2018).

Uma das ferramentas utilizadas com certa frequência em diversos setores da agricultura como na seleção de qualidade de frutos em pomares, detecção de doenças em lavouras e identificação de plantas invasoras (LARA et al., 2020) é o Aprendizado de Máquina (AM), o qual é considerado uma inteligência artificial que identifica padrões semelhantes do objeto de estudo, consistindo na automatização da análise de dados, sem a demanda de novas programações contínuas no equipamento ou software (PINHEIRO et al., 2021). O AM é utilizado em conjunto com dados de sensoriamento remoto, o que vem possibilitando a aplicação em novas áreas e metodologias para ambas as ferramentas (SCHEUNDERS et al., 2018).

Inúmeras aplicações do AM na área agrícola têm sido detectadas em várias pesquisas, dentre elas o auxílio na identificação de estresses bióticos e abióticos (LIAKOS et al., 2018) estimativas de produtividade e mapeamento de deficiências nutricionais de plantas (BARBEDO, 2019), o que auxilia na compreensão e formação de zonas de manejo com

diferentes teores de fertilidade realizando aplicações em taxas variadas com auxílio de mapas de fertilidade ou sensores óticos acoplados nos equipamentos.

Diante o exposto, entende-se que há uma necessidade em avaliar a viabilidade de sensores remotos provedores de imagem de acesso a profissionais que atuam no âmbito da cafeicultura no monitoramento de manejos ligados a adubação. Assim, por meio de análises clássicas de campo de monitoramento de parâmetros agronômicos do cafeeiro, avaliou-se o potencial de imagens multiespectrais tomadas por sensores de baixo custo para discriminar fontes de adubo mineral e organomineral em lavoura cafeeira.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa partiu-se da premissa que o monitoramento por imagens só seria usual para a avaliação de distintos tratamentos se as bandas espectrais fossem capazes de discriminar as diferentes condições de manejo com grau de acurácia próximo das técnicas clássicas de avaliação *in situ* de parâmetros de crescimento do cafeeiro.

O experimento foi realizado na Fazenda Araras, localizada em Monte Carmelo, Minas Gerais. As coordenadas geográficas da área experimental são 18° 43' 19,5" S e 47° 32' 16,1" W, situada a 898 m de altitude. O plantio da lavoura foi efetuado em dezembro de 2016, utilizando-se mudas da cultivar MGS Paraíso 2, no espaçamento de 3,8 m entre linhas e 0,6 m entre plantas. A adubação dos sulcos foi realizada mediante a aplicação de 2,5 kg de matéria orgânica, 400 g de gesso, 350 g do formulado 05-37-00 (N – P₂O₅ – K₂O) e 300 g de calcário com 95% de Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) por metro linear. A área cultivada é irrigada por sistema de gotejamento, com espaçamento entre os gotejadores de 0,6 m e vazão de 2,3 L h⁻¹. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Argiloso.

A caracterização química do solo em julho de 2019, antes da diferenciação dos tratamentos, na profundidade de 0-20 cm, apresentou os seguintes resultados: pH H₂O = 6,1; P e K (método Mehlich⁻¹) = 36,2 e 330,0 mg dm⁻³, respectivamente; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ (método KCl 1 mol L⁻¹) = 2,7; 0,8 e 0,0 cmolc dm⁻³, respectivamente; H+Al (Solução Tampão SMP pH 7,5) = 1,7 cmolc dm⁻³, S-SO₄⁻² (Fosfato monobásico Cálcio 0,01 mol L⁻¹) = 9,0 mg dm⁻³, capacidade de troca catiônica potencial = 6,0 cmolc dm⁻³, capacidade de troca catiônica efetiva e soma de bases = 4,3 cmolc dm⁻³, saturação de bases = 72% e matéria orgânica = 2,7 dag kg⁻¹.

As doses de adubação aplicadas em 2019, no momento da diferenciação dos tratamentos, e em 2020 estão descritas na Tabela 1. As recomendações foram baseadas na proposta de Guimarães et al. (1999).

TABELA 1. Doses e fontes de adubação que foram realizadas nos anos de 2019 e 2020

Tratamento	Fontes de adubação	Dose de N, P ₂ O ₅ e K ₂ O (Kg ha ⁻¹)	
		2019	2020
(T1) 100% do tratamento com adubação organomineral	2019: Formulados 25-00-(N-P ₂ O ₅ e K ₂ O) 2020: Formulados 25-00-00, 05-26-00 e 00-00-32 (N-P ₂ O ₅ e K ₂ O)	250 de N	450 de N, 80 de P ₂ O ₅ e 340 de K ₂ O
(T2) 70% do tratamento com adubação organomineral	2019: Formulados 25-00-(N-P ₂ O ₅ e K ₂ O) 2020: Formulados 25-00-00, 05-26-00 e 00-00-32 (N-P ₂ O ₅ e K ₂ O)	175 de N	315 de N, 56 de P ₂ O ₅ e 238 de K ₂ O
(T3) 50% do tratamento com adubação organomineral	2019: Formulados 25-00-(N-P ₂ O ₅ e K ₂ O) 2020: Formulados 25-00-00, 05-26-00 e 00-00-32 (N-P ₂ O ₅ e K ₂ O)	125 de N	225 de N, 40 de P ₂ O ₅ e 170 de K ₂ O
(T4) 100% do tratamento com adubação mineral	2019: Nitrato de amônio (27% de N) 2020: Ureia (45% de N), MAP (10% de N e 52% de P ₂ O ₅) e Cloreto de Potássio (60% de K ₂ O)	250 de N	450 de N, 80 de P ₂ O ₅ e 340 de K ₂ O
(T5) 70% do tratamento com adubação mineral	2019: Nitrato de amônio (27% de N) 2020: Ureia (45% de N), MAP (10% de N e 52% de P ₂ O ₅) e Cloreto de Potássio (60% de K ₂ O)	175 de N	315 de N, 56 de P ₂ O ₅ e 238 de K ₂ O
(T6) Tratamento padrão da propriedade	2019: Ureia (45% de N), MAP (10% de N e 52% de P ₂ O ₅), Cloreto de Potássio (60% de K ₂ O), Formulado 20-05-20 (N-P ₂ O ₅ e K ₂ O) e Composto orgânico.	94 de N, 7 de P ₂ O ₅ e 53 de K ₂ O	190 de N, 55 de P ₂ O ₅ e 310 de K ₂ O

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com cinco blocos e seis tratamentos, sendo eles: (T1) 100% do tratamento com organomineral, (T2) 70% do tratamento com organomineral, (T3) 50% do tratamento com organomineral, (T4) 100% da adubação mineral, (T5) 70% da adubação mineral e (T6) tratamento padrão da propriedade. Cada parcela experimental foi constituída por uma linha com 16 plantas consideradas úteis as oito plantas centrais (Figura 1).

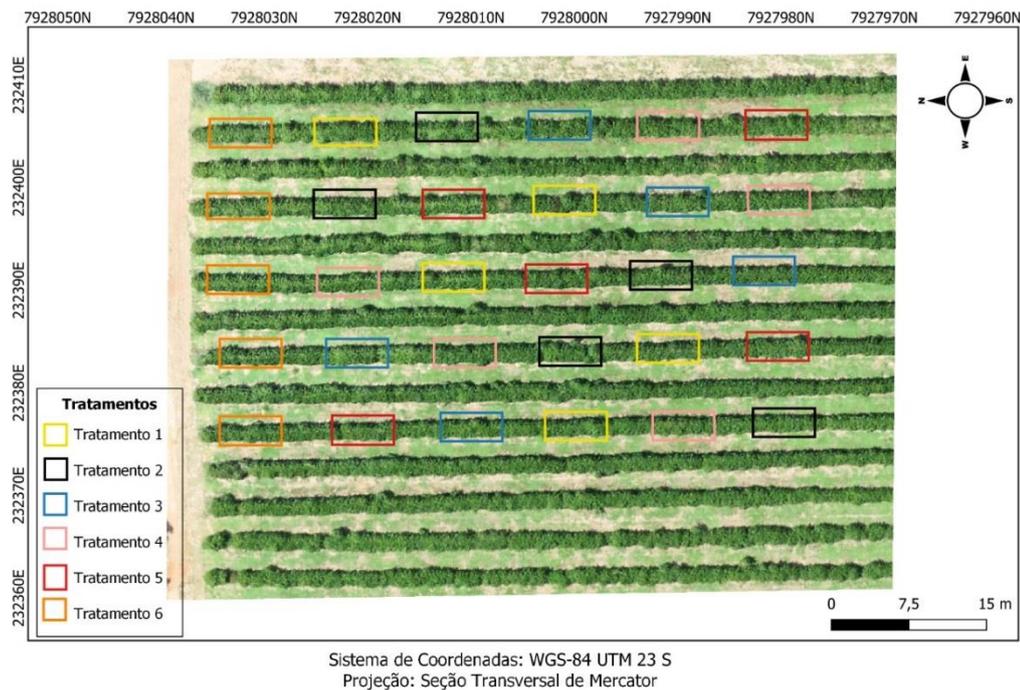


FIGURA 1. Croqui da área experimental e demarcações das respectivas parcelas de cada tratamento.

As avaliações de crescimento, índice de clorofila e captura de imagens por drone foram realizadas bimestralmente de abril de 2020 a maio de 2021, totalizando seis avaliações. Os parâmetros de crescimento avaliados foram diâmetro de copa, altura de planta, comprimento de ramos plagiotrópicos e número de nós por ramo plagiotrópico.

Para a determinação do índice de Clorofila Falker, foi utilizado o medidor eletrônico de teor de clorofila modelo CFL 1030 seguindo o manual de instruções da empresa Falker. Foi realizada a leitura do terceiro ou quarto par de folhas do ramo plagiotrópico localizado no terço médio do cafeeiro do lado superior das linhas de plantio em cada planta da parcela útil. Todas as coletas foram realizadas no período da manhã iniciando às 08:00 horas para ter homogeneidade na amostragem dos dados. Após a coleta, os dados foram transferidos do equipamento para uma planilha e realizada a média dos teores de clorofila das oito plantas de cada tratamento.

As amostras de solo para caracterização química (pH em água, acidez potencial, cálcio, magnésio, potássio, fósforo Mehlich⁻¹, matéria orgânica, soma de bases, capacidade de troca de cátions potencial e saturação por bases) foram coletadas em agosto de 2020 na profundidade de 0 a 20 cm em cada parcela experimental, na região do bulbo molhado. As amostras foram coletadas com auxílio de um trado e posteriormente foram homogeneizadas em balde para compor uma amostra composta de cada unidade experimental.

Para análise foliar, foram coletados um par de folhas localizado no terceiro ou quarto nó de um ramo plagiotrópico localizado no terço médio de cada quadrante das plantas úteis da parcela experimental, totalizando 60 folhas por unidade experimental (GUIMARÃES et al., 1999). Foram determinados os teores dos macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio em janeiro de 2021, quando os frutos estavam no estágio de chumbinho.

Em junho de 2020 e julho de 2021 foi realizada a colheita da área experimental, mediante derrixa no pano dos frutos pertencentes às oito plantas úteis da parcela. A colheita foi iniciada quando o percentual de frutos verdes da área experimental fosse inferior à 20%.

Os parâmetros de fertilidade, crescimento, produtividade e clorofila obtidos foram submetidos à análise de variância com a aplicação do teste F, a 5% de probabilidade, sendo as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Para os dados de parâmetros de crescimento e clorofila foi utilizado o esquema de parcelas subdivididas no tempo após o atendimento das pressuposições de normalidade dos resíduos pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, homocedasticidade pelo teste de Levene, e aditividade de blocos pelo teste de Tukey, todos a 5% de probabilidade. Quando detectadas diferenças significativas, as médias referentes ao fator épocas de avaliação foram ajustadas a modelos de regressão. As análises estatísticas foram realizadas com o software R (versão 3.4.3).

No período de abril de 2020 a maio de 2021 foram capturadas imagens com uma aeronave remotamente pilotada (ARP) nas datas de 23 de abril de 2020, 23 de junho de 2020, 02 de março de 2021 e 04 de maio de 2021. Os voos foram realizados entre 12 a 13 horas, a fim de evitar sombras que atrapalhassem posteriormente o processamento das imagens, e para manter um padrão na coleta dos dados. Os pontos de amostragem foram as 240 plantas da área útil do experimento. A posição dos pontos foi obtida a partir de um levantamento geodésico relativo estático com um par de receptores GNSS Ashtech Promark 220 L1/L2. Para aquisição destas imagens foi utilizada uma câmera de baixo custo Mapir 3 Survey3W acoplada a uma ARP drone – Phantom4 que coleta imagens das bandas RGN, sendo respectivamente verde (550 nm), vermelho (660 nm), e infravermelho próximo (850 nm), sendo realizados voos à 100 metros acima do solo e com um GSD (Ground Sample Distance) de 3 cm, obtendo captura de imagens de boa resolução espacial.

Após a captura das imagens pelo sensor Mapir 3, os mosaicos foram construídos para cada um dos quatro voos, no software Pix4D. Após a geração dos mosaicos foi realizada a normalização radiométrica, conforme equação 1:

$$Ti = mi \times xi + bi \quad (1)$$

$$mi = (Bri - Dri)/(Bsi - Dsi) \quad (2)$$

$$bi = (Dri \times Bsi - Dsi \times Bri)/(Bsi - Dsi) \quad (3)$$

sendo: Ti = Número digital (RGB) e reflectância (RGN) da imagem normalizada; xi = banda espectral a ser normalizada; Bri = média do conjunto de referência clara; Dri = média do conjunto de referência escura; Bsi = média do conjunto claro a ser normalizado; Dsi = média do conjunto escuro a ser normalizado; i = bandas do sensor em estudo.

Para essa aproximação entre os pontos foi utilizado o mosaico do primeiro voo realizado em 23/04/2020, pois este apresentou melhor nitidez radiométrica em relação aos pontos do georreferenciamento. Após a normalização radiométrica foi realizada a conferência da precisão das coordenadas com as imagens normalizadas utilizando o software QGIS3, verificando se o georreferenciamento dos pontos correspondia aos mesmos locais em ambas as imagens, para melhor acompanhar o desenvolvimento da lavoura ao longo do experimento, avaliando-se sempre os mesmos pontos de referência.

Os valores médios dos números digitais (RGN) foram extraídos no software Environment for Visualizing Images – ENVI, com a ferramenta ROI tool a partir de imagens das oito plantas de cafeeiro de cada parcela experimental, os quais foram utilizados para calcular os índices de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation) = $(B850 - B660) / (B850 + B660)$, GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) = $(B850 - B550) / (B850 + B550)$, NGRDI (Normalized Green Red Difference) = $(B550 - B650) / (B550 + B650)$, SR (Simple Ratio) = $B850 / B660$, DVI (Difference Vegetation) = $B850 - B660$, MCARI1 (Modified Chlorophyll Absorption Reflectance) = $1.2 \times [2.5 \times (B850 - B660) - 1.3 \times (B850 - B550)]$, sendo B660: Banda Vermelho; B550: Banda Verde e B850: Banda Infravermelho Próximo (B850) (ROUSE et al., 1973; GITELSON, KAUFMAN e MERZLYAK, 1996).

Para discriminação de classes do cafeeiro foi realizada a classificação supervisionada do tipo Random Forest por meio do software Waikato Environment for Knowledge Analysis - Weka 3.9.4. Os dados foram organizados em três classes, igualmente balanceados, sendo 30 dados para arquivos de treino e 10 para validação. As três classes foram organizadas de acordo a fonte de adubação de cada tratamento, como organomineral, mineral e padrão. A classe organomineral foi composta por três tratamentos, a classe mineral composta de dois tratamentos e a classe padrão foi representada pelo tratamento convencional de adubação da propriedade. Após a organização das classes de parâmetros agronômicos e de imagem para

cada uma das quatro avaliações realizadas ao longo do experimento iniciou-se o processamento, sendo utilizado o classificador Random Forest, com intuito de diferenciar as classes de tratamentos.

Para classificar os tratamentos, foram utilizados os conjuntos de dados de entrada utilizados para cada avaliação, sendo os parâmetros agronômicos, as reflectâncias da banda RGN e os índices de vegetação calculados. Os subconjuntos selecionados para classificação em cada intervalo de avaliação foram: 1- todos os parâmetros agronômicos, 2- altura de plantas, 3 – apenas parâmetros de crescimento de copa, 4- clorofila, 5- RGN e índices de vegetação, 6 – RGN, 7 – Índices de vegetação. As subdivisões foram realizadas para observar quais dados coletados promoveram maiores diferenciações e possibilidades de melhores classificações entre as classes de tratamentos utilizadas. Para analisar o desempenho de cada classificação foram utilizados os seguintes dados: a exatidão global (EG) e o coeficiente Kappa (K), os quais foram calculados pelo software Weka.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises estatísticas dos parâmetros agronômicos apontaram baixa variabilidade entre as diferentes doses de adubação. Para os teores foliares de macronutrientes primários em cafeeiros verificou-se efeito significativo dos tratamentos ao nível de 1% de probabilidade somente para nitrogênio ($p < 0,01$). Na análise nutricional de solo verificou-se diferença significativa entre os tratamentos para magnésio, cálcio, pH H₂O, soma de bases, capacidade de troca de cátions potencial ($p < 0,01$) e para saturação por bases ($p < 0,05$).

TABELA 2. Média dos teores nutricionais foliares de nitrogênio (N) (g.kg^{-1}), fósforo (P) (g.kg^{-1}), potássio (K) (g.kg^{-1}) e média dos teores nutricionais do solo sendo fósforo remanescente (P meh^{-1} mg dm^{-3}), potássio (K) (mg dm^{-3}), magnésio (Mg) ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), cálcio (Ca) ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), pH (pH H_2O), acidez potencial (H+Al) ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) matéria orgânica (MO) (dag kg^{-1}), soma de base (SB) ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), capacidade de troca de cátions potencial (T) ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e saturação por bases (V %) em solos de cafeeiros em função de doses de adubação mineral e organomineral

Médias dos Teores Nutricionais de Folha e Solo							
Tratamento	Médias foliares			Médias de solo			
	N (g.kg^{-1})	P (g.kg^{-1})	K (g.kg^{-1})	P meh^{-1} (mg dm^{-3})	K (mg dm^{-3})	Mg ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	Ca ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)
T1	50,7 a	1,6 a	21,5 a	3,2 a	164,9 a	1,27 abc	3,7 ab
T2	49,2 a	1,8 a	23,7 a	7,8 a	157,3 a	1,46 ab	3,7 ab
T3	37,0 b	1,8 a	24,1 a	3,3 a	159,7 a	1,22 bc	3,2 b
T4	35,7 b	1,6 a	22,9 a	2,9 a	157,7 a	1,17 c	3,1 b
T5	28,2 c	1,8 a	24,4 a	5,1 a	155,3 a	1,46 ab	4,0 a
T6	31,1 bc	1,7 a	22,9 a	3,8 a	159,6 a	1,51 a	3,9 ab
F*	4,92	0,55	2,00	34,40	0,00	0,00	0,03
CV**(%)	8,50	6,55	6,97	66,62	15,04	10,38	11,69
Médias dos Teores Nutricionais do Solo							
Tratamento	Médias de solo						
	pH H_2O	H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	MO (dag kg^{-3})	SB ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	T ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	V (%)	
T1	6,66 b	1,44 a	2,51 a	5,46 abc	6,89 ab	78,9 a	
T2	6,79 ab	1,35 a	2,48 a	5,66 ab	7,01 ab	80,6 a	
T3	6,57 b	1,38 a	2,52 a	4,86 bc	6,24 bc	77,7 a	
T4	6,77ab	1,38 a	2,54 a	4,68 c	6,06 c	77,2 a	
T5	6,97 a	1,29 a	2,47 a	5,95 a	7,23 a	82,0 a	
T6	6,94 a	1,34 a	2,61 a	5,87 a	7,22 a	81,3 a	
F*	10,28	0,34	0,75	0,13	0,78	0,69	
CV**(%)	1,91	8,92	8,16	8,55	5,75	3,26	

*Valor da estatística de F de Snedecor. **Coeficiente de variação (%). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não se diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

(T1) 100% do tratamento com organomineral, (T2) 70% do tratamento com organomineral, (T3) 50% do tratamento com organomineral, (T4) 100% da adubação mineral, (T5) 70% da adubação mineral e (T6) tratamento padrão da propriedade.

Os maiores teores foliares de nitrogênio foram observados nos tratamentos que receberam as doses de 100% e 70% do fertilizante organomineral, os quais apresentaram incremento médio de $16,9 \text{ g kg}^{-1}$ em relação aos demais tratamentos (Tabela 2). Todas as doses de adubação, com exceção do tratamento padrão da propriedade (T6) e 70% da adubação mineral (T5), apresentaram níveis de nitrogênio acima das faixas críticas recomendada para cafeeiros fertirrigados em Minas Gerais para o mês de janeiro e fevereiro, sendo o limite de $32,40 \text{ g kg}^{-1}$ (ASSIS et al., 2015).

Não houve diferença significativa entre os tratamentos para os teores foliares de fósforo e potássio (Tabela 2). Todos os tratamentos apresentaram níveis próximos ou dentro da faixa adequada de teores nutricionais, sendo relatados na literatura os limites de 0,9 a 1,6 g kg⁻¹, para o fósforo, e de 21,3 a 29,4 g kg⁻¹, para o potássio (MARTINEZ et al., 2003). Com isso foi possível deduzir que a menor dose de adubação de organomineral (50%) supriu as necessidades nutricionais do cafeeiro em fósforo e potássio.

Com relação aos atributos de solo, apesar de não ocorrer diferença significativa entre os tratamentos para potássio e saturação por bases (Tabela 2), o potássio se enquadrou na categoria adequada em todos os tratamentos, entre 120 e 200 mg dm⁻³ e a saturação por bases foi superior a 60%, de acordo com as recomendações para adubação de cafeeiros em produção (GUIMARÃES et al., 1999). Para o fósforo, não foram detectadas diferenças significativas entre os tratamentos.

O tratamento padrão (T6) apresentou maior teor de magnésio no solo em relação aos tratamentos 50% organomineral e 100% mineral. Para o cálcio, o maior teor no solo foi observado com o uso da dose de 70% da adubação mineral (T5), sendo superior em relação aos tratamentos com 50% da adubação organomineral (T3) e 100% da adubação mineral (T4) (Tabela 2).

A relação entre o cálcio, magnésio e potássio no solo são extremamente importantes para o desenvolvimento do cafeeiro. Os níveis de cada um destes nutrientes foram classificados como adequados em todos os tratamentos (0,9 a 1,5 cmolc dm⁻³ para Mg e entre 2,4 a 4,0 cmolc dm⁻³ para Ca) (GUIMARÃES et al., 1999). A relação Ca:Mg:K ideal no solo varia de 9:3:1 a 25:5:1, conforme proposto por Malavolta (1981). Os tratamentos com 100% e 70% da adubação organomineral apresentaram relação de 9:3:1, enquanto os tratamentos com 50% da adubação organomineral e 100% da adubação mineral apresentaram relação de 8:3:1 (Tabela 1).

Os valores de pH, em todos os tratamentos, ficaram acima do intervalo de referência para o cultivo do cafeeiro, entre 5,5 a 6,5. Os maiores valores de pH foram observados no tratamento padrão (T6) e com uso de 70% da adubação mineral (T5), sendo significativamente superior em relação aos observados nas doses de 100% (T1) e 50% da adubação organomineral (T3).

A matéria orgânica (MO) obteve valores semelhantes em todos os tratamentos avaliados e se enquadrou nos níveis ideais recomendados para o cafeeiro (2,1 - 4,5 dag kg⁻¹) (GUIMARÃES et al., 1999) (Tabela 2). A acidez potencial considerada adequada para o

cultivo do cafeeiro é inferior a $2,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$. Nota-se que não houve influência dos tratamentos para este atributo, mantendo-se abaixo de $1,44 \text{ cmolc dm}^{-3}$.

A soma de bases enquadrou-se na categoria adequada para o cafeeiro, entre 3,6 a $6,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$ para todos os tratamentos (GUIMARÃES et al., 1999). O tratamento padrão do produtor (T6) e a dose de 70% da adubação mineral (T5) proporcionaram maiores níveis de soma de bases e capacidade de troca de cátions potencial em relação à dose de 50% da adubação organomineral e 100% da adubação mineral.

No que diz respeito aos parâmetros de crescimento para número de nós no ramo plagiotrópico primário houve diferença significativa entre os tratamentos pelo Teste de F ($p < 0,01$), não havendo diferenças para os demais parâmetros avaliados.

A utilização de 50% da dose de adubação organomineral não interferiu no crescimento da planta e na clorofila em relação aos demais tratamentos. É provável que os teores adequados de nutrientes no solo, aliado à saturação por bases acima de 77%, teor de matéria orgânica entre 2,47 a $2,61 \text{ dag kg}^{-1}$ e baixa acidez tenha contribuído para o desenvolvimento satisfatório dos cafeeiros, até mesmo nas doses inferiores de adubação. As plantas apresentaram, em média, 1,99 m de altura; 2,03 m de diâmetro de copa; 0,19 m de comprimento de ramos e índice de clorofila total de 63,44 (Tabela 3). Para o fator épocas de avaliação, houve diferença significativa para todas as características ($p < 0,01$), exceto diâmetro de copa.

TABELA 3. Médias dos parâmetros agrônômicos altura (m), diâmetro de copa (m) número de nós, comprimento de ramos (m) clorofila total (Índice de Clorofila Falker) e produtividade (sacas ha⁻¹) das plantas de cafeeiro em função de doses de adubação mineral e organomineral

Médias dos parâmetros de crescimento				
Tratamento	Altura	Diâmetro de Copa	Número de Nós	Comprimento de Ramos
T1	2,00 a	1,89 a	8,28 ab	0,20 a
T2	1,98 a	1,91 a	8,00 ab	0,19 a
T3	1,98 a	1,87 a	8,19 ab	0,18 a
T4	2,02 a	2,70 a	8,21 ab	0,19 a
T5	2,03 a	1,92 a	7,52 b	0,18 a
T6	1,96 a	1,87 a	8,84 a	0,21 a
CV**	5,62 %	87,71 %	16,00 %	19,50 %
Médias do índice de clorofila e produtividade				
Tratamento	Clorofila Total	Produtividade 2020	Produtividade 2021	Média de Produtividade 20/21
T1	64,15 a	21,92 a	78,92 a	50,40 a
T2	63,11 a	17,44 ab	71,80 a	44,62 a
T3	62,65 a	20,00 ab	72,38 a	46,20 a
T4	62,56 a	17,04 ab	82,22 a	49,62 a
T5	63,08 a	19,84 ab	73,00 a	46,42 a
T6	65,09 a	9,28 b	88,12 a	48,70 a
CV**	9,58 %	32,96 %	12,09 %	11,53 %

*Valor da estatística de F de Snedecor. **Coeficiente de variação (%). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não se diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

(T1) 100% do tratamento com organomineral, (T2) 70% do tratamento com organomineral, (T3) 50% do tratamento com organomineral, (T4) 100% da adubação mineral, (T5) 70% da adubação mineral e (T6) tratamento padrão da propriedade.

Os resultados obtidos corroboram os de Sobreira et al. (2011), os quais verificaram em lavoura cafeeira fertirrigada na fase de formação, que a redução de 30% da adubação com nitrogênio e potássio foi a mais recomendada. Porém, é importante destacar que na fase produtiva, os frutos constituem o dreno de maior atividade na planta e embora não haja prejuízos ao crescimento, a redução na adubação pode provocar a “fome oculta” no cafeeiro, sendo necessário o monitoramento da lavoura por meio da análise foliar e de solo para ajustes na adubação.

A quantidade de nós no ramo plagiotrópico primário é uma característica vegetativa importante que se correlaciona positivamente com a produtividade. Nota-se que no tratamento padrão (T6), os cafeeiros apresentaram um acréscimo de um nó por ramo plagiotrópico primário em relação à utilização de 70% da adubação mineral (T5), o que representa um aumento de 4.386 nós por ramo produtivo em um hectare, considerando o espaçamento da lavoura de 3,8 m entre linhas por 0,6 m entre plantas. Neste caso, possivelmente a redução da

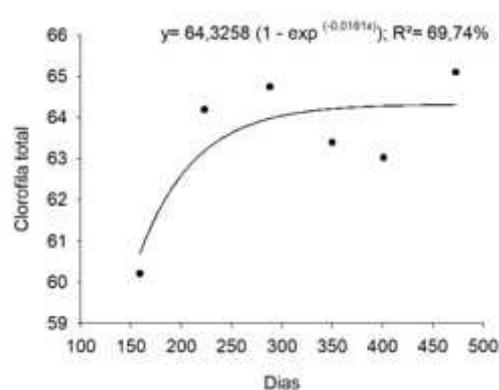
aplicação de nutrientes em 30% com fontes minerais prejudicou a emissão de gemas no cafeeiro.

Para produtividade de café beneficiado, houve diferenças significativas entre os tratamentos para a produtividade no ano de 2020 ($p < 0,05$) pelo Teste F. Para produtividade de 2021 não foram detectadas diferenças entre as doses de adubação mineral e organomineral (Tabela 3).

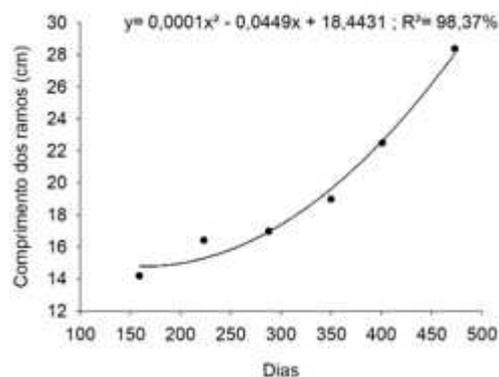
Na safra 2020, a maior produtividade foi obtida com a utilização de 100% da dose de adubação organomineral (T1) em relação ao tratamento padrão (T6), havendo incremento de 12,64 sacas ha^{-1} . No tratamento padrão, as adubações foram realizadas via fertirrigação com a utilização de fontes exclusivamente minerais, o que pode ter ocasionado perdas de nutrientes, principalmente por lixiviação. Cavalcante et al. (2020) verificaram que a utilização de adubo contendo 50% da composição com fontes orgânicas e 50% com fontes minerais proporcionou maior produtividade de cafeeiros em relação à adubação exclusivamente mineral, corroborando os resultados obtidos na presente pesquisa.

A alternância de produtividade entre uma safra e outra conhecida como bienalidade é uma característica do cafeeiro. Esse fator ocorre devido à exaustão que o cafeeiro sofre após uma safra muito alta e assim no ano seguinte sua carga é menor. Nota-se que na safra 2021, considerada de bienalidade positiva, não houve diferenças entre os tratamentos, com média de produtividade de 77,7 sacas ha^{-1} (Tabela 3). Considerando-se a média do biênio, as doses de adubação mineral e organomineral não promoveram diferenças na produtividade de café beneficiado, o que pode estar relacionado aos adequados níveis da maioria dos nutrientes no solo, promovendo satisfatório desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da planta até mesmo com a redução da adubação organomineral em 50% da recomendação padrão.

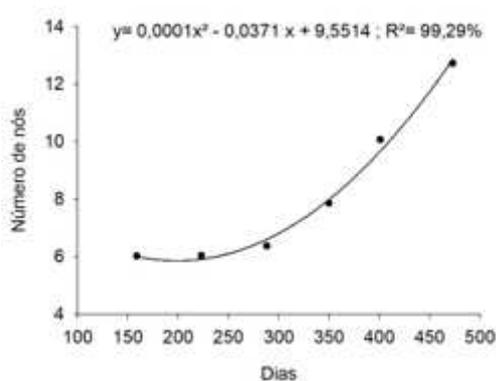
Quanto ao índice de clorofila, não houve diferença significativa entre os tratamentos ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste F. Porém, verificou-se diferença significativa entre as épocas avaliadas e por isso foi realizado o ajuste do modelo exponencial para esta variável resposta em função das épocas de avaliação ($R^2 = 69,74\%$) (Figura 2A).



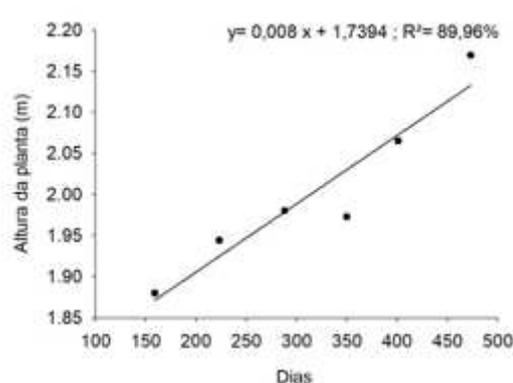
A



B



C



D

FIGURA 2. Índice de clorofila Falker (A), comprimento de ramos (B), número de nós no ramo plagiotrópico primário (C) e altura de plantas (D) de cafeeiros no período de condução do experimento (150 dias a 470 dias após a diferenciação dos tratamentos).

Relacionando o índice de clorofila Falker em cada estágio fenológico do cafeeiro, houve um aumento gradativo na clorofila desde a maturação dos frutos (abril de 2020, aos 150 dias após a diferenciação (DAD) dos tratamentos até a fase de repouso e maturação das gemas florais (agosto de 2020, aos 288 DAD)). A partir deste estágio, houve uma estabilização do índice de clorofila nas plantas (Figura 2A). Durante os estágios de chumbinho (outubro de 2020, aos 350 DAD), expansão dos frutos (dezembro de 2020, aos 400 DAD) e granação (fevereiro de 2021, aos 460 DAD), os cafeeiros apresentaram, em média, índice de clorofila Falker de 64,00 unidades.

Apesar do período reprodutivo ser caracterizado por grande demanda de nitrogênio em função do crescimento dos frutos, verificou-se neste trabalho que os maiores índices foram detectados na fase de granação. Possivelmente isto pode ser explicado em função das adubações serem realizadas em novembro de 2020 e janeiro de 2021, aumentando a disponibilidade de nitrogênio nas plantas. Os resultados desta pesquisa corroboram os de

Godoy et al. (2008), os quais verificaram que a correlação mais forte entre o índice relativo de clorofila nas plantas e a produtividade foi observada no estágio de chumbinho e expansão.

O cafeeiro apresenta um padrão de crescimento sazonal, sendo influenciado principalmente pela temperatura média mensal (AMARAL et al., 2006) e precipitações. Verificou-se ajuste do modelo quadrático em função das épocas de avaliação para as características comprimento de ramos e número de nós por ramo plagiotrópico primário do cafeeiro, com coeficientes de determinação de 98,37% e 99,29%, respectivamente (Figuras 2B e 2C). Para altura de plantas, o modelo matemático que apresentou melhor ajuste ($R^2 = 89,96\%$) foi o linear (Figura 2D).

O crescimento mais expressivo da planta ocorreu entre 400 a 460 DAD para comprimento de ramos, número de nós por ramo plagiotrópico primário e altura, coincidindo com os estádios de expansão e granação dos frutos. Os fatores relacionados à maior taxa de crescimento dos cafeeiros neste período caracterizam-se pela ocorrência de maiores temperaturas médias mensais e precipitações, estimulando o desenvolvimento da planta. Aliado a isto, os maiores índices relativos de clorofila Falker também foram observados nestes estádios, colaborando para o adequado crescimento da planta.

Na Tabela 4 observa-se sete subconjuntos classificados nas quatro avaliações realizadas ao longo do experimento, sendo quatro de parâmetros agronômicos e três para as imagens. Os parâmetros da banda RGN e índices de vegetação resultaram em melhores índices de Exatidão global ao longo das avaliações, ficando próximos de 100%, assim como o coeficiente Kappa que se aproximou de 1.

Em situações de baixa variabilidade na biometria dos cafeeiros, nossos resultados mostraram que a classificação de imagens de baixo custo quando usadas na discriminação dos tratamentos apresentam acurácia superior à classificação a partir de parâmetros agronômicos (Tabela 4).

TABELA 4. Classificação supervisionada das classes de cafeeiro em cada avaliação para os diferentes subconjuntos

Subconjuntos Classificados	1ª Avaliação 150 DAD		2ª Avaliação 210 DAD		6ª Avaliação 460 DAD		7ª Avaliação 560 DAD	
	Random Forest							
	EG	K	EG	K	EG	K	EG	K
Parâmetros Agronômicos	73,33 %	0,60	63,33 %	0,45	70,00 %	0,55	73,33 %	0,60
Altura de planta	50,00 %	0,25	63,33 %	0,45	36,66 %	0,05	56,66 %	0,35
DC, NN, CM	73,33 %	0,60	66,66 %	0,50	70,00 %	0,55	76,66 %	0,65
Clorofila	30,00%	-0,05	63,33 %	0,45	66,66 %	0,50	70,00 %	0,55
RGN e Índices	73,33 %	0,60	70,00 %	0,55	73,33 %	0,60	86,66 %	0,80
RGN	26,66 %	-0,10	66,66 %	0,50	73,33 %	0,60	86,66 %	0,80
Índices	40,00%	0,10	66,66 %	0,50	66,66 %	0,50	73,33 %	0,60

DC: Diâmetro de copa; NN: Número de nós; CM: Comprimento de ramos, K: Índice Kappa, EG: Exatidão Global.

Na primeira avaliação, o conjunto de todos os parâmetros agronômicos e os parâmetros da banda RGN e índices de vegetação obtiveram o mesmo índice de exatidão global. Apesar da primeira avaliação da área ter sido realizada após 150 dias do início das adubações, verificou-se que a classificação supervisionada permitiu discriminar as classes de cafeeiros em até 73,3%, devido à heterogeneidade existente entre plantas que receberam tratamentos distintos. É necessário ressaltar que após o início das adubações (novembro de 2019), devido a ocorrência de chuvas e temperaturas mais elevadas, as plantas estavam metabolicamente ativas e com crescimento mais intenso, havendo maior distinção entre os tratamentos.

É possível observar que na sexta e sétima avaliação (Tabela 4) as bandas RGN e os índices de vegetação, em conjunto, proporcionaram uma classificação mais acurada das plantas em relação apenas aos parâmetros agronômicos avaliados separadamente, em função da sensibilidade dos mesmos às bandas espectrais características das plantas, as quais não foram medidas. Isto ocorre, pois a banda verde é sensível à pigmentação da vegetação, a do vermelho é sensível à clorofila a e b e estágio de senescência, e a banda do infravermelho próximo é sensível à área foliar. O mesmo se aplica para os índices de vegetação, em destaque o NDVI, o qual é sensível à biomassa e estresse hídrico (CARMO et al., 2021).

A Figura 3 apresenta os valores dos índices de vegetação NDVI e GNDVI e a imagem de todos os tratamentos do bloco 1 em RGB. Nota-se que os tratamentos com 50% da adubação organomineral (T3) e 70% da adubação mineral (T5) apresentaram regiões mais escuras no mapa e menor índice NDVI. Quando observado o índice GNDVI nota-se que o

tratamento com 70% da adubação mineral (T5), além de apresentar menor massa foliar, também apresentou menor teor de pigmentação em relação aos demais tratamentos, o que pode justificar a menor quantidade de nós nos ramos plagiotrópicos das plantas com esta dose de adubação em relação ao tratamento padrão da propriedade (T6) observado na Tabela 3.

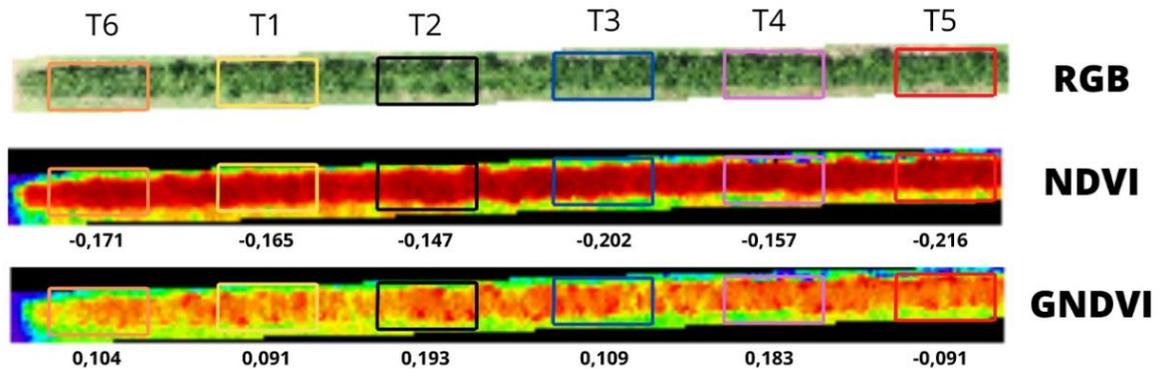


FIGURA 3. Tratamentos do bloco 1. De cima para baixo, foto em RGB e mensuração dos índices NDVI e GNDVI.

Na segunda avaliação, realizada aos 210 dias após a diferenciação dos tratamentos, observou-se que apenas a altura de plantas e clorofila proporcionaram a mesma exatidão global (63,33%) que todos os parâmetros agronômicos em conjunto. Esta avaliação, realizada em junho de 2020, coincidiu com restrição hídrica e temperaturas mais amenas, havendo redução da taxa de crescimento das plantas em relação aos períodos mais chuvosos, o que possivelmente pode explicar a redução da acurácia da classificação.

A classificação com todos os parâmetros de imagem sobressaiu em relação aos parâmetros agronômicos, pois as bandas, em conjunto com os índices, destacaram características da vegetação que mudam com os tratamentos, como o maior crescimento das plantas, se tornando mais responsivas à imagem, além de avaliações como senescência, índice de área foliar e biomassa que influenciam na resposta espectral e não foram avaliadas.

Na sexta avaliação, realizada em fevereiro de 2021 quando os frutos estavam na fase de granação, os resultados se assemelham aos da segunda avaliação. A classificação por imagens na sétima avaliação, aos 560 dias após a diferenciação dos tratamentos, apresentou elevada acurácia, com exatidão global de 86,66% quando utilizados os dados de índices em conjunto com as bandas, e quando observados estes dados separadamente nota-se que os

índices de vegetação obtiveram apenas 73,33% de exatidão global e as bandas RGN de 76,66%.

Neste caso, as bandas por si só já destacam características das plantas, sendo possível a discriminação em classes de tratamento. A refletância das plantas se torna muito responsiva neste momento, evidenciando que as avaliações realizadas em campo não foram suficientes para diferenciar os tratamentos com tanta acurácia como a resposta espectral que as imagens oferecem. A obtenção de maiores valores de índice Kappa significa que os dados de imagens obtiveram melhores resultados de classificação que os parâmetros agronômicos, de acordo com os resultados e a interpretação da tabela de concordância do intervalo Kappa de Landis e Koch (1977).

Em todas as matrizes de confusão, o tratamento padrão (T6) designado como a classe (a) apresentou maior diferenciação, sendo classificadas corretamente o maior número de plantas para os parâmetros agronômicos e de imagem em todas as avaliações realizadas (Tabela 5). Para justificar esse fato é importante destacar que esta classe foi composta por apenas um tratamento, ou seja, pertencente a plantas que seguiam um padrão semelhante. Além disso, ele diferiu significativamente de outros tratamentos em relação ao teor de nitrogênio foliar (Tabela 2), número de nós e produtividade no ano de 2020 (Tabela 3).

TABELA 5. Matriz de confusão computada para os dados de parâmetros agronômicos, RGN e Índices de vegetação

Matriz de confusão da 1º Avaliação (150 DAD)						
CLASSES	Parâmetros Agronômicos			RGN e Índices de Vegetação		
	a	b	c	a	b	c
a	10	0	0	9	1	0
b	1	4	5	3	7	0
c	0	2	8	1	3	6
Matriz de confusão da 2º Avaliação (210 DAD)						
a	9	1	0	9	0	1
b	5	2	3	3	6	1
c	1	1	3	1	3	6
Matriz de confusão da 6º Avaliação (460 DAD)						
a	9	1	0	9	1	0
b	3	5	2	1	6	3
c	3	0	7	0	3	7
Matriz de confusão da 7º Avaliação (560 DAD)						
a	9	1	0	10	0	0
b	2	7	1	0	8	2
c	2	2	6	2	0	8

As classes de tratamento classificadas foram: padrão da propriedade (a), adubação organomineral (b), adubação mineral (c).

O software apresentou maiores dificuldades em classificar a classe organomineral, composta pelos tratamentos T1, T2 e T3, sempre havendo confusão com outras classes, em ambas as análises. Possivelmente isso pode ser explicado pelo agrupamento das classes desses tratamentos, e quando analisados os parâmetros de crescimento, observa-se que ambos não se diferenciaram significativamente entre si, além de também não se diferenciarem dos tratamentos mineral (T4 e T5) agrupados na classe mineral, em nenhum aspecto fitotécnico, gerando maior dificuldade na discriminação.

Os parâmetros de RGN e índices de vegetação conseguiram, em todas as avaliações, diferenciar melhor as plantas da classe organomineral (b) dos tratamentos T1, T2 e T3, devido os dados de reflectância serem mais sensíveis na detecção de alterações em relação aos parâmetros agronômicos medidos em campo.

4 CONCLUSÕES

As fontes e doses de fertilizantes não influenciaram os parâmetros de crescimento, exceto para número de nós. Já com relação aos teores nutricionais, ocorreram diferenças significativas entre o N foliar e para os atributos do solo Mg, Ca, pH em água, soma de bases e capacidade de troca de cátions potencial.

A redução das doses de fertilizante organomineral não influenciou a produtividade do cafeeiro comparado aos tratamentos com aplicação mineral, durante o primeiro ano de avaliação.

Com acurácia superior a análises sobre parâmetros agronômicos, a utilização de imagens multiespectrais para classificação e acompanhamento da lavoura constitui-se em uma opção de baixo custo para monitoramento em larga escala, confiável e constante da lavoura, obtendo-se até 86,66% de exatidão global na classificação dos dados de RGN e índices de vegetação utilizando o algoritmo Random Forest.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F.; ALMEIDA, A. A.; BEGNINI, M. L. Produção de fertilizante organomineral a partir de resíduos orgânicos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 12424-12432, mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-198>. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/7682/6659>. Acesso em: 10 mai. 2021.

AMARAL, J. A. T. D., RENA, A. B., AMARAL, J. F. T. D. Crescimento vegetativo sazonal do cafeeiro e sua relação com fotoperíodo, frutificação, resistência estomática e fotossíntese. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 377-384, mar. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000300002> . Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/ZG85XVvxdq8fn438HKfLSXc/abstract/?lang=pt> Acesso em: 22 jun. 2021.

ASSIS, G. A. D., GUIMARÃES, R. J., COLOMBO, A., SCALCO, M. S., DOMINGHETTI, A. W. Faixas críticas de teores foliares de nitrogênio e potássio para o cafeeiro fertirrigado em fase de produção. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 1, p. 126-134, mar. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902015000100015> . Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/Pg4fmCsHmkGgPjPdZhhH63R/abstract/?lang=pt> Acesso em: 22 jun. 2021.

BARBEDO, J. G. A. A review on the use of unmanned aerial vehicles and imaging sensors for monitoring and assessing plant stresses. **Drones**, Campinas, v. 3, n. 2, p. 40 – 66, abr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones3020040> . Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-446X/3/2/40> . Acesso em: 02 nov. 2021.

CARMO, G. J. D. S., CASTOLDI, R., MARTINS, G. D., JACINTO, A. C. P., TEBALDI, N. D., CHARLO, H. C. D. O., & ZAMPIROLI, R. Detection of Lesions in Lettuce Caused by *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* by Supervised Classification Using Multispectral Images. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 47, n. 6, out. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/07038992.2021.1971960> . Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07038992.2021.1971960> . Acesso em: 05 nov. 2021.

CAVALCANTE, V. S., BORGES, L. S., DE MELO MOURA, W., JACOB, L. L., & DE FREITAS, M. A. S. (2020). Adubação organomineral na nutrição e produtividade de café arábica. **Cadernos de Agroecologia**, Viçosa, v. 15, n. 1, p. 1 -5, mar. 2020. Disponível em: <http://cadernos.aba-agroecologia.org.br/index.php/cadernos/article/view/6285> . Acesso em: 04 nov. 2021.

FRANCIOLI, D., SCHULZ, E., LENTENDU, G., WUBET, T., BUSCOT, F., REITZ, T. Mineral vs. organic amendments: microbial community structure, activity and abundance of agriculturally relevant microbes are driven by long-term fertilization strategies. **Frontiers in microbiology**, Pullman, v. 7, p. 1446, out. 2016. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01446>. Disponível em: <https://internal-journal.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2016.01446/full>. Acesso em: 10 nov. 2021.

GITELSON, A. A., KAUFMAN, Y. J., STARK, R., RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 76-87, abr. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9) . Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425701002899> . Acesso em: 10 out. 2021.

GODOY, L. J. G. D., SANTOS, T. D. S., VILLAS BÔAS, R. L., LEITE JÚNIOR, J. B. Índice relativo de clorofila e o estado nutricional em nitrogênio durante o ciclo do cafeeiro fertirrigado. **Revista brasileira de ciência do solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 217-226, fev. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100021> . Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/xgryqGFKpRXS6pjFkx3zMZN/abstract/?lang=pt> . Acesso em: 02 nov. 2021.

GUIMARÃES, P. T. G., RIBEIRO, C. R., ALVAREZ, V. V., VITOR, H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Viçosa, MG, 1999. 359 p.

LANDIS, J. R., KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **International Biometric Society**, v. 33, n. 1, p. 159-174. mar. 1977. DOI: <https://doi.org/10.2307/2529310>. Disponível em: https://dionysus.psych.wisc.edu/iaml/pdfs/landis_1977_kappa.pdf. Acesso em: 02 nov. 2021. LARA, Lucas Molz et al. Tendências da agricultura de precisão em fruticultura no período de 2016 A 2020. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 43, 2021.

LIAKOS, K. G., BUSATO, P., MOSHOU, D., PEARSON, S., & BOCHTIS, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. **Sensors**, Basel, v. 18, n. 8, p. 2674, ago. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18082674>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/8/2674>. Acesso em: 05 nov. 2021.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 3.ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 594p.

MARTINEZ, H. E. P., MENEZES, J. F. S., SOUZA, R. B. D., ALVAREZ VENEGAS, V. H., GUIMARÃES, P. T. G. Faixas críticas de concentrações de nutrientes e avaliação do estado nutricional de cafeeiros em quatro regiões de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 6, p. 703-713, jun. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000600006> . Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/QDK5VwY43tcNHc5yfDZ4Mgs/?lang=pt>. Acesso em: 03 nov. 2021.

PINHEIRO, R. DE M., GADOTTI, G. I., MONTEIRO, R. D. C. M., BERNARDY, R. (2021). Inteligência artificial na agricultura com aplicabilidade no setor sementeiro. **Diversitas Journal**, Santana do Ipanema, v. 6, n. 3, p. 2996-3012, ago. 2021. DOI: https://doi.org/10.48017/Diversitas_Journal-v6i3-1857. Disponível em: https://doi.org/10.48017/Diversitas_Journal-v6i3-1857. Acesso em: 05 jan. 2022.

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

SANTOS, O. L., PADOLFI, A. S., RAMALDES, G. P. Análise de índice de vegetação através de imagens obtidas por VANT. **Revista Científica FAESA**, Vitória, v. 14, n.1, p. 145-165, nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5008/1809.7367.143> . Disponível em: <http://revista.faesa.br/revista/index.php/Faesa/issue/view/22> . Acesso em: 05 nov. 2021.

SCHEUNDERS, P., TUIA, D., MOSER, G. Contributions of machine learning to remote sensing data analysis. In S. Liang (Ed.). **Data processing and analysis methodology** (pp.). v. 2, p. 199-243, out. 2018 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10343-4>.

Disponível em: <https://research.wur.nl/en/publications/contributions-of-machine-learning-to-remote-sensing-data-analysis>. Acesso em: 05 jan. 2021.

SOBREIRA, F. M., GUIMARÃES, R. J., COLOMBO, A., SCALCO, M. S., CARVALHO, J. G. Adubação nitrogenada e potássica de cafeeiro fertirrigado na fase de formação, em plantio adensado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 1, p. 9-16, jan. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000100002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/MjQYrNfcPMqKtttK6RM57HM/?lang=pt>. Acesso em: 26 mai. 2021.

SOUZA, L. A., SILVA, É. A., DE OLIVEIRA, G. C., BARBOSA, S. M., SILVA, B. M. Análise qualitativa e quantitativa de agregados de solo sob filme plástico associado à fertilização organomineral em área cafeeira. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 19, n. 2, p. 142-153. fev. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v19i2.52826>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/agraria/article/view/52826> . Acesso em: 03 nov. 2021.