



GISLAYNE FARIAS VALENTE

**AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA APLICADA NO
MONITORAMENTO DE CAFEIROS APÓS OCORRÊNCIA
DE GEADA**

**LAVRAS - MG
2024**

GISLAYNE FARIAS VALENTE

**AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA APLICADA NO
MONITORAMENTO DE CAFEZEIROS APÓS A OCORRÊNCIA DE GEADA**

Tese apresentada a Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Mecanização Agrícola para obtenção do título de Doutora.

Prof. Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz

Orientador

Prof. Dr. Fábio Moreira da Silva

Coorientador

Prof. Dr. Felipe Schwerz

Coorientador

**LAVRAS – MG
2024**

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

Valente, Gislayne Farias.

Aeronave remotamente pilotada aplicada nomonitoramento de
cafeeiros após a ocorrência de geada / Gislayne Farias Valente. -
2023.

109 p. : il.

Orientador(a): Gabriel Araújo e Silva Ferraz.

Coorientador(a): Fábio Moreira da Silva, Felipe Schwerz.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Cafeicultura de precisão. 2. Agrometeorologia. 3.
Sensoriamento remoto. I. e Silva Ferraz, Gabriel Araújo. II. da
Silva, Fábio Moreira. III. Schwerz, Felipe. IV. Título.

GISLAYNE FARIAS VALENTE

**AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA APLICADA NO
MONITORAMENTO DE CAFEEIROS APÓS A OCORRÊNCIA DE GEADA**

**REMOTELY PILOTED AIRCRAFT APPLIED IN THE MONITORING OF COFFEE
PLANTS AFTER FROST OCCURRENC**

Tese apresentada a Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Mecanização Agrícola para obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 19 de dezembro de 2023.

Dr. Felipe Augusto Fernandes UFLA
Dr. Felipe Schwerz UFLA
Dr. Murilo Machado de Barros UFRJ
Dra. Luana Mendes dos Santos UFLA

Prof. Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz
Orientador

**LAVRAS – MG
2024**

Dedico esta tese à memória de Rita de Cássia, amiga inestimável que sempre apoiou e se alegrou sinceramente com cada passo desta jornada em direção ao meu doutorado.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha profunda gratidão a Deus, meus pais e família, pela oportunidade de realizar este doutorado.

Aos amigos, agradeço pelos incentivos e apoio contínuo.

Especial reconhecimento ao meu orientador, Gabriel Ferraz, e ao coorientador, Felipe Schwerz, pela orientação valiosa e apoio constante.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFLA (PPGEA) pela oportunidade e ambiente propício ao desenvolvimento deste trabalho.

Muito Obrigada!

RESUMO

A incidência de geadas em plantios cafeeiros afeta a produtividade das lavouras no Brasil devido aos danos causados nos tecidos vegetais. O monitoramento desses plantios por Aeronave Remotamente Pilotada (*Remotely Piloted Aircraft – RPA*) por aeronave remotamente pilotada é uma forma eficaz e rápida de detecção de danos e avaliação dos plantios cafeeiros. Objetivou-se com este estudo, avaliar potencial do sensoriamento remoto suborbital e índices de vegetação na identificação de cafeeiros com danos por geada e na avaliação da resposta produtiva e de crescimento desses cafeeiros em diferentes áreas de risco climático, idades de plantio e faces norte e sul da linha de plantio. O estudo foi realizado em área com plantios de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) localizado no município de Santo Antônio do Amparo, na mesorregião Oeste de Minas Gerais. Foram utilizadas três áreas comerciais com diferentes tempos do plantio cafeeiro (um ano, dois anos e oito anos). Cada área foi dividida em zonas de risco climático: alto risco (terço inferior do terreno) e baixo risco (terço superior do terreno). As três áreas foram avaliadas a partir de três dias após a incidência da geada ao longo de um ano e oito meses, em cada planta foi mensurada a altura da planta, diâmetro do caule, números de ramos plagiotrópicos, números de nós por ramo, número de folhas com danos, número de flores por ramos, número de frutos por ramos, produtividade e danos por geada. Foram coletadas imagens multiespectrais captadas com uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA). Os danos por geada foram correlacionados com índices de vegetação. Nos dados vegetativos foram aplicados teste Tukey. A implementação de RPA como ferramenta para o monitoramento periódico e análise de plantios cafeeiros, pode melhorar significativamente a tomada de decisão de manejo e recuperação do plantio pós geada. A análise de plantios cafeeiros por índices de vegetação permitiu identificar e avaliar danos por geada e a resposta produtiva e de crescimento da cultura do café em áreas de baixo e alto risco climático.

Palavras-chave: Cafeicultura de precisão. Agrometeorologia. Sensoriamento remoto.

ABSTRACT

The incidence of geadas in coffee plants affects the productivity of crops in Brazil due to the damage caused to the vegetable tissues. The monitoring of these plants by Remotely Piloted Aircraft (RPA) by remotely piloted aircraft is an effective and rapid form of damage detection and evaluation of coffee plants. The objective of this study is to evaluate the potential of suborbital remote sensing and vegetation indices for the identification of coffee trees damaged by geadas and to evaluate the productive response and growth of these coffee trees in different climate risk areas, planting ages and northern faces. sul da linha de plantio. The study was carried out in an area with coffee plantations (*Coffea arabica* L.) located in the municipality of Santo Antônio do Amparo, in the Oeste region of Minas Gerais. Foram utilizados três áreas comerciais com diferentes tempos do plantio coffeeeiro (one year, two years and eight years). Each area was divided into climatic risk zones: alto risco (lower third of terrain) and low risk (upper third of terrain). As three areas were evaluated starting from three days after the incidence of geadas over a year and eight months, each plant was measured for plant height, stem diameter, numbers of plagiotropic branches, number of nodes per branch, number de folhas com danos , número de flores por ramos , número de frutos por ramos, productivity e danos por geadas. Multispectral images were collected with a Remotely Piloted Aircraft (RPA). Os danos por geadas were correlated with vegetation indices. Nos dados vegetativos foram aplicados teste Tukey. The implementation of RPA as a tool for periodic monitoring and analysis of coffee plantations can significantly improve the management decision-making and recovery of plantations after planting. The analysis of coffee plantations by vegetation indices allowed to identify and evaluate damage by geadas and the productive response and growth of coffee culture in low and high climate risk areas.

Keywords: Precision coffee. Agrometeorology. Remote sensing.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	9
1	INTRODUÇÃO	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Geadas e a cafeicultura	11
3.2	Danos por geada e recuperação das plantas de café	13
3.3	Cafeicultura de precisão	15
3.4	Sensoriamento Remoto	16
3.4.1	Índices de vegetação	16
3.4.2	Aeronaves remotamente pilotadas	17
	REFERÊNCIAS	18
	SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	22
	ARTIGO 1 – AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA GEADA EM CAFEZEIROS COM DIFERENTES IDADES E ZONAS DE RISCO CLIMÁTICO	22
1	INTRODUÇÃO	23
2	DESENVOLVIMENTO	25
3	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS	48
	ANEXO A – GRÁFICOS DE RESÍDUOS	51
	ARTIGO 2 – RECUPERAÇÃO DE CAFEZEIS APÓS OCORRÊNCIA DE GEADAS: UMA ABORDAGEM UTILIZANDO AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS	52
1	INTRODUÇÃO	53
2	DESENVOLVIMENTO	54
3	CONCLUSÃO	83
	REFERÊNCIAS	84
	ANEXO B – GRÁFICOS DE COMBINAÇÃO	88
	ARTIGO 3 – AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA NA AVALIAÇÃO DA RESPOSTA VEGETATIVA NAS FACES DE EXPOSIÇÃO SOLAR EM CAFEZEIRO APÓS A OCORRÊNCIA DE GEADA	90
1	INTRODUÇÃO	91
2	DESENVOLVIMENTO	92
3	CONCLUSÃO	106
	REFERÊNCIAS	107

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura brasileira destaca-se mundialmente por sua alta produção e exportação. O café é uma commodity importante para o país, sobretudo para o estado de Minas Gerais, que contempla a maior área plantada do Brasil. No entanto, o potencial do sistema produtivo da safra cafeeira vem sendo comprometido em decorrência das adversidades climáticas tais como períodos de geadas, que podem causar danos na cultura, reduzindo diretamente a produtividade do ano, e impactando nos anos seguintes. Por isso, a geada vem sendo um fator climático de forte influência na distribuição global da safra de café.

A geada é um fenômeno natural, que pode ocorrer em frequência variada quando a temperatura do ar cai abaixo do ponto de congelamento de água. O ambiente de cultivo é um fator determinante para a ocorrência desse fenômeno. Sabe-se que em terrenos variados, a topografia é um fator que influencia os padrões de geada, permitindo diferenças de acúmulo de ar frio em um mesmo plantio. Dentre os efeitos da geada nos cafeeiros, o principal é a redução da área foliar, com processos de necrose e senescência das folhas, diminuindo a absorção da radiação solar e a fotossíntese. Dependendo da severidade, a planta sofre desfolha, alteração das funções fisiológicas e do ciclo produtivo, favorece a mortalidade e ocasiona retração de cultivos, desfavorecendo a renovação de plantios e a produção nos anos seguintes.

Diante disso, são necessárias ações de manejo a curto e longo prazo nas lavouras afetadas. Para subsidiar essas decisões, são realizados levantamentos de campo e reconhecimento visual de áreas de maior risco de ocorrência de danos e acompanhamento dos plantios atingidos para avaliar os danos e o potencial de recuperação e produção. No entanto, os métodos usuais de levantamento de campo e estimativas de danos estão sujeitos a erros frequentes e diagnóstico tardio. Nesse contexto, insere-se a cafeicultura de precisão que tem abordado o sensoriamento remoto para estudos na cultura do café.

O sensoriamento remoto tem sido utilizado para obter informações sobre cultivos de forma dinâmica e não destrutiva para diversas aplicações de monitoramento da lavoura. O uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (Remotely Piloted Aircraft - RPA) e modernos sensores embarcados têm sido muito utilizados para aquisição de imagens com maior resolução espacial e temporal resultando em informações detalhadas sobre os padrões espectrais da cultura. A maioria dos estudos relacionados ao uso de imagens RPA utiliza índices de vegetação para

avaliar a resposta espectral da vegetação. Isso torna essa ferramenta um instrumento de grande potencial para monitoramento comportamental da planta no ciclo de cafeeiros após ocorrência da geada.

No entanto, são escassos os estudos acerca da identificação de danos por geada através da resposta espectral considerando as diferentes condições de plantio do cafeeiro, como relevo e idade do plantio. O cafeeiro é sensível à geada, sobretudo nos primeiros anos de plantio, e em áreas íngremes estão sujeitas a maior concentração de massa de ar frio na área mais baixa do terreno, levando a formação de zonas com maior risco climático. Tais fatores tornam o plantio suscetível à diferentes intensidades de danos por geada, ocasionando também uma resposta espectral diferente. Devido a isso a identificação dos danos por índices de vegetação requer um estudo mais detalhado.

Considerando as sucessivas ocorrências de geadas em áreas de plantio de café nos últimos anos, torna-se imprescindível consolidar uma técnica de detecção rápida e monitoramento eficiente em plantios vulneráveis para o estabelecimento da cultura cafeeira após a ocorrência de geadas. Nesse sentido, este estudo avaliou o potencial de índices de vegetação na visualização de danos por geada em cafeeiros com diferentes tempos de plantio em zonas de risco climático, tendo como hipótese que o uso de índices de vegetação, obtidos via imagens por câmera multiespectral em RPA, são eficientes e viáveis para identificar e monitorar os danos da geada sobre a cultura do café, independentemente da idade da planta e da topografia do terreno.

OBJETIVO GERAL

Caracterizar a resposta espectral dos cafeeiros com danos por geada e o potencial do sensoriamento remoto suborbital na identificação de danos e da recuperação das plantas em diferentes condições de plantios.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a porcentagem de danos por geada em plantas de café em áreas de baixo e alto risco climático.
- Quantificar o impacto da geada sobre a resposta produtiva e de crescimento da cultura do café.

- Avaliar a correlação do crescimento do cafeeiro com a intensidade de dano.
- Avaliar o potencial de índices de vegetação, advindos de imagens obtidas por câmera multiespectral embarcada em aeronave remotamente pilotada, na identificação de plantas com danos por geada em diferentes idades de plantio.
- Avaliar a recuperação do café após a ocorrência de geada utilizando ARP no monitoramento e avaliação de plantios de café com diferentes idades e áreas de risco climático.
- Avaliar a intensidade de dano nas plantas de café de acordo com a face de exposição (norte e sul) da linha de plantio.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Geada e a cafeicultura

O cafeeiro da espécie *Coffea arabica* L. é uma planta originária da Etiópia, onde se desenvolveu sob ambiente de sombra moderada, indicando ser uma espécie não tolerante a temperaturas extremas. No Brasil, o cultivo de cafeeiro se desenvolveu extensivamente em ambientes a pleno sol (VALENTINI et al., 2010). Grande parte da produção nacional é oriunda do sul de Minas Gerais, que integra a região centro-sul do país, onde a geada é uma preocupação para os agricultores e historicamente é associada a calamidades de proporções nacionais que afetaram a cafeicultura (BRAGA et al., 2021). Por sua extensão territorial e peculiar variação ambiental, a cafeicultura mineira está localizada entre 800 e 1000 metros de altitude, em terrenos com declives variando de planos a ondulados entre 3 e 20% de declive. A declividade é uma variável altamente relacionada a ocorrência de geada.

A geada é um fenômeno microclimático definido quando a temperatura cai abaixo do ponto de congelamento de água. Seus feitos nocivos em cafeeiros, resultam no congelamento de água em os tecidos celulares, formação de gelo dentro da célula levando ao rompimento das paredes celulares e necrose do tecido vegetal. Outras consequências, são como o prolongamento do período de brotação e floração, mal formação de estruturas reprodutivas das plantas (MALAGI et al., 2015).

Existem dois tipos de formação de geadas, sendo elas, as geadas de radiação e geadas de vento. O primeiro tipo tende a ocorrer sob características meteorológicas de céu claro, sem vento e temperatura do ponto de orvalho baixo, sem depósitos de gelo nas folhas, porém causam

muitos danos internos aos tecidos das plantas de café (LEE et al., 2016). O autor ainda pontua que o segundo tipo normalmente ocorre sob as condições meteorológicas de céu nublado, moderado a ventos fortes com temperatura do ar abaixo de 3°C, sem inversão de temperatura e baixa umidade geralmente originadas em de regiões de altitudes mais elevadas.

As geadas são classificadas em graus de severidade moderada, severa e muito severa, podendo matar o crescimento superior jovem dos cafeeiros, expondo os ramos, e em alguns casos danificar toda a folhagem e rebentos da planta, resultando em enormes reduções de rendimento do café para os 2-3 seguintes anos (CAMARGO; CAMARGO, 2004). Mas a temperatura média favorável ao crescimento do cafeeiro da espécie *Coffea arabica* L. pode situar-se entre 16 e 23°C, com um ótimo de 18 a 21°C e que a oscilação da temperatura mínima favorece o declínio do crescimento de área foliar de ramos plagiotrópicos primários de cafeeiros (ASSAD et al., 2004; AMARAL, 2006). A geada se dá, quando a temperatura é menor que 2°C no abrigo e -2 a -3°C na relva, e a temperatura mínima tolerável sem causar danos às folhas é de 0°C a 1°C (CARAMORI et al., 2001; PINTO et al., 2001).

Os danos causados pela geada, em geral, ocorrem quando as temperaturas ao nível da folha se encontrarem entre -3°C e -4°C (CAMARGO; SALATI, 1966). Temperaturas abaixo de -2°C é considerada como o limite crítico para a folha do cafeeiro, abaixo do qual começam as lesões na maioria espécies suscetíveis (CAMARGO; CAMARGO, 2004; BRICHE et al., 2014). A folha sofre desidratação resultante da formação de gelo extracelular, e quando a temperatura dos tecidos da planta cai, geralmente entre -3°C e -4°C, maiores serão os danos. A temperatura é diretamente proporcional à atividade e eficiência fotossintética, e as folhas em si, tem como função viabilizar a interação com a radiação eletromagnética, e ao sofrerem danos podem ter influência relevante no comportamento espectral (MORAIS et al., 2009).

A interferência no processo de interceptação da radiação solar incidente pelos órgãos fotossintéticos da planta compromete a produção das culturas (ASSAD et al., 2004). Na China, Zhong et al. (2008), relataram que danos no cultivo de trigo ocasionados pela geada geraram a diminuição fotossintética da planta, morte da folha e dano ao caule, resultando na queda de produção. No sul de Queensland, Austrália, as maiores porcentagens de perdas de produção para safras de trigo se deram devido aos danos causados pela geada (M.AL-ISSAWI et al., 2013). A planta de café pode ter diferentes adaptações à interferência das geadas de acordo com a idade de plantio, cultivar e topografia do terreno. Por isso, é necessário estudos sobre a resposta fisiológica de crescimento e desenvolvimento do cafeeiro em diferentes condições após os danos por geada.

3.2 Danos por geada e recuperação das plantas de café

Os danos causados pela geada nas plantas de café podem impactar significativamente na redução da qualidade e produtividade de uma lavoura. Um dos principais efeitos da geada nas plantas é a redução da área foliar que pode ser observada pela redução das clorofilas a e b, bem como pelos processos de necrose e senescência das folhas, diminuindo a absorção de radiação solar e fotossíntese (MARIN, et al., 2021 a). Estudos dos efeitos da geada sobre caracteres agrônômicos comprovam que danos foliares em cultivares de *Coffea. arábica* L., podem ser severos e ocasionar a morte da planta e perda da produção (DUARTE JÚNIOR; MENECHINI, 2021; ROSISCA et al., 2015). O grande stress biótico causado pode afetar a indução floral do cafeeiro, na granação e conseqüentemente a produtividade. Por isso, após a geada o produtor quantifica a magnitude de danos para readequar o plano de manejo e intervenção que pode chegar até mesmo na substituição de plantas nas lavouras ou até mesmo de uma lavoura completa. Convencionalmente, os prejuízos são quantificados através do levantamento da área afetada na propriedade e a classificação da intensidade dos danos são realizadas em função da magnitude da morte dos tecidos nos cafeeiros. No entanto, em alguns casos, espera-se por aproximadamente 30 a 60 dias para ter maior certeza de como e onde atuar, tornando a intervenção tardia (ANDRADE et al., 2021).

Dessa forma, a avaliação de impacto da geada em cafezais ainda se baseia em métodos convencionais, consistindo em intensivo trabalho de levantamento no campo. Esse procedimento, além de caro e subjetivo, é muito demorado e quase sempre leva à especulação do mercado cafeeiro, por falta de uma real dimensão do impacto da geada, associado ao tempo para obter as informações (RAFAELLI; MOREIRA; FARIA, 2006). Sendo assim, é necessário avaliações com mais precisão e rapidez para levantamento de áreas atingidas por geada, para facilitar a tomada de decisões acertadas.

Outro aspecto fundamental da melhoria no monitoramento da área afetada refere-se às necessidades atuais de uso prático das informações para fins de crédito e seguro agrícola regional. Fazer um levantamento da área danificada a fim de tomar a decisão entre acionar o seguro ou não, ou ainda, se vai ou não fazer uma poda drástica nas plantas, ou quais regiões da lavoura vai realizar a poda. Ainda, em casos extremos se vale a pena ou não o replantio da lavoura, na sua totalidade ou apenas parte dela.

São poucos os estudos encontrados na literatura sobre novas ferramentas de avaliação de plantios atingidos por geadas em cafezais. Pinto et al. (2000), estudaram o desenvolvimento

de novas metodologias de levantamento de prejuízos no campo auxiliadas por imagens orbitais para gerar um modelo de estimativa de danos causados por geadas em cafezais. Cunha (2021), utilizaram imagens multiespectrais obtidas por satélites e algoritmos para classificação de danos em cafezais. No entanto, os mapas gerados por imagens orbitais para avaliação de danos em plantios, não detectou com alta precisão os danos causados por geada (KOTIKOT et al., 2018). O uso de imagens de satélite pode ser complexo, pois depende das resoluções espectrais, temporais e espaciais do sensor utilizado. Além disso, os satélites com alta resoluções espaciais e temporais, que são essenciais para o monitoramento de culturas, geralmente são caras e pequenos agricultores não possuem condições financeiras para a compra (MARTINS et al., 2021).

Em estudo recente, Marin et al. (2021a), avaliaram o potencial de uso de imagens multiespectrais obtidas por aéreo remotamente pilotado e índices de vegetação para analisar e identificar danos causados por geadas em plantas de café. Os resultados demonstraram que os índices de vegetação tiveram uma forte relação e alta precisão com os danos causados pela geada. No entanto, estudos do impacto da geada em plantios de café com índices de vegetação baseados em RPA ainda é incipiente. Adicional a isso, estudos realizados sobre o impacto da geada em cafezais, em sua maioria, se dão após o completo desenvolvimento e formação da planta, tendo poucos estudos contrastantes sobre o comportamento morfológico do cafeeiro em estágio inicial de formação ou em diferentes cultivares cafeeiras após o evento da geada (DUARTE JÚNIOR; MENECHINI, 2021).

Diante disso, torna-se necessário aprofundar o estudo e a avaliação dos impactos da geada nos atributos agronômicos da cultura. Isso visa não apenas desenvolver abordagens e metodologias alternativas para a quantificação dos danos, mas também oferecer suporte à gestão agrícola diante de desafios climáticos, como a ocorrência de geadas em plantações de café em diferentes condições de plantios e idades. O impacto da geada na cafeicultura pode variar conforme a idade das plantas, sendo necessário investigar como as plantas reagem a esses eventos. O comportamento de recuperação das plantas pode diferir significativamente entre aquelas recém-plantadas e as mais estabelecidas no campo, destacando a importância de examinar a resposta de recuperação em diferentes fases do desenvolvimento das plantações.

3.3 Cafeicultura de precisão

A cafeicultura de precisão é designada para aplicação tecnológica da Agricultura de Precisão (AP), especificamente para a cultura do café no campo para maximizar os rendimentos e preservar os recursos naturais (FERRAZ et al., 2018). Os avanços tecnológicos relacionados ao cultivo do café têm contribuído para monitoramento da produção no campo com medições precisas e confiáveis (SANTANA et al., 2022; BARBOSA et al., 2021).

Há uma série de tecnologias que auxiliam o monitoramento do plantio cafeeiro, incluindo sistemas de posicionamento global (GPS), mapeamento de rendimentos e imagens coletadas por RPA (SANTANA et al., 2021a). Os dados são gerados, direta e indiretamente por sensores que podem obter informações sobre o dossel do cafeeiro, solo e condições climáticas, permitindo uma melhor compreensão do ambiente e das operações em si, levando a um processo mais rápido, eficiente para tomada de decisão (CADENAS et al., 2020; LIAKOS et al., 2018).

Na cafeicultura de precisão, ferramentas da agricultura de precisão são abordadas de várias maneiras em estudos sobre a geada. Cadenas et al. (2020), utilizaram técnicas de análise inteligente e estimativa de dados para desenvolver o sistema de decisão para previsão antecipada de geada em lavouras cafeeiras. Lee et al. (2016), desenvolveram modelos de previsão de geada usando técnicas de regressão logística e árvore de decisão. Miranda e Meneses (2020), desenvolveram experimentos de controle inteligente da geada com as ferramentas Internet das coisas (IoT) e Rede Neural Artificial (ANN). Marin et al. (2021 a), utilizaram imagens multiespectrais obtidas com RPA em plantio de cafeeiros para verificar danos causados por geada, por meio de diferentes índices de vegetação.

O uso de RPA equipados com sensores multiespectrais oferecem resolução e capacidade operacional sem precedentes, tornando-se bastante eficaz em pesquisas (FRANZINI et al., 2019). Os sensores permitem uma avaliação espacial rápida dos danos causados pela geada por meio dos dados do dossel, limitando as perdas econômicas por meio de decisões de gerenciamento oportunas (NUTTALL et al., 2019). Muitos são os estudos acerca de métodos preventivos à geada na cafeicultura, mas são poucos os trabalhos desenvolvidos com vista ao estabelecimento de métodos que permitam estimar rapidamente prejuízos causados por geadas à cultura cafeeira (PINTO et al., 2014).

3.4 Sensoriamento Remoto

3.4.1 Índices de vegetação

Dentre as principais abordagens para estimar as variáveis da vegetação existe a abordagem empírica-estatística que busca a relação entre a variável da vegetação e a refletância espectral única ou índices de vegetação (XIAO et al., 2014). O índice de vegetação é uma técnica de realce da vegetação, por meio de operações matemáticas, usada no processamento digital de imagens de sensoriamento remoto, com o propósito de analisar diferentes bandas espectrais de uma mesma cena, simultaneamente (HILL; DONALD, 2003).

Os dados de sensoriamento remoto têm sido propostos como uma boa solução para a medição de parâmetros de vegetação (SHAMMI, 2023). Estas informações podem, ser usadas para quantificar, entender e gerenciar lavouras, permitindo a estimativa de variáveis biofísica e bioquímica da vegetação (XIAO et al., 2014). A reflectância do dossel tem sido usada para avaliar o estado de culturas agrícolas, como trigo e milho. Existem muitas pesquisas sobre o uso da reflectância do dossel na cafeicultura, no entanto são poucos estudos específicos sobre danos de geada. O tipo de vegetação e os processos fisiológicos de cada cultura exerce influência sobre a absorção da radiação eletromagnética (MARTINS; GALO, 2015).

Por isso, muitos índices de vegetação foram projetados para estimar variáveis de vegetação. Por exemplo, Índice de Clorofila Terrestre Meris (MTCI), Absorção de Clorofila Modificada em Reflectância (MCARI), índice de vegetação ajustado do solo (SAVI), SAVI otimizado (OSAVI) foram desenvolvidos para estimar pigmentos de plantas; o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) tem sido usado em muitas aplicações, incluindo a estimativa do rendimento das culturas e biomassa; Índice de Água de Diferença Normalizada (NDWI) utilizado para monitoramento do status da água do dossel da planta do espaço (GAO, 1996). Além dos índices Proporção Simples Modificada (MSR), Borda Vermelha da Diferença Normalizada (NDRE), índice de vegetação de diferença normalizada verde (GNDVI) e índice de Cobertura Verde (GCI).

Dentre os estudos sobre índices de vegetação em áreas cafeeiras, Volpato et al. (2013), estudaram a eficácia de valores do NDVI na indicação de deficiência hídrica de cafeeiros. Rafaelli, Moreira e Faria (2006), utilizaram que o índice de vegetação NDVI, para detectar a abrangência da área de geada. Na pesquisa de Putra e Soni (2018), vários índices de vegetação foram testados para avaliar nível crítico de nitrogênio das plantas de café Robusta, dentre os

índices de vegetação estavam o NDRE, NDVI, SAVI e OSAVI. Chemura et al. (2017), testou o GNDVI para discriminação de níveis de infecção da ferrugem da folha do café. Santos et al., (2022), estudou a aplicação de índices de vegetação MCARI1, MCARI2, MSR, OSAVI, no mapeamento do Índice de Clorofila de Plantas de café. Marin et al. (2021a), estudaram a correlação entre os índices de vegetação NDVI, SAVI, GNDVI, MTCI, NDRE e MCARI1 e os danos por geada em diferentes extratos da planta de café.

3.4.2 Aeronaves remotamente pilotadas

Aeronave remotamente pilotada (RPA), é uma nomenclatura oriunda do inglês Remotely Piloted Aircraft, popularmente conhecidas como Drones ou Veículos Aéreos Não Tripulado (VANT), oriunda do termo Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Em referência a Aeronave e componentes associados destinados à operação sem piloto, a International Civil Aviation Organization (ICAO) adotou a nomenclatura RPAS (Remotely Piloted Aircraft System), termo utilizado no Brasil pela ANAC, (ANAC, 2012). Em português, o conceito pode ser expresso por SISVANT, como referência a Aeronave e componentes associados destinados à operação sem piloto a bordo (DECEA, 2010; ANAC, 2012).

De acordo com Franzini et al. (2019), a utilização de RPA equipados com sensores multiespectrais tornaram-se bastante populares devido aos sistemas com capacidade de georreferenciamento direto, permitindo voos em áreas remotas onde o acesso pode ser difícil ou impossível, e reduzindo o tempo e os custos da missão. As aplicações potenciais das RPA incluem sistema de informação geográfica, fotografia aérea, imagem em tempo real (LAN et al., 2017). Isso permite que dados de campo sejam adquiridos com mais precisão e aplicados ao estudo, mapeamento e monitoramento de lavouras (SARRI et al, 2017). O sensoriamento remoto por meio de plataformas aéreas vem sendo evidenciado em diferentes aplicações dos estudos de cafeeiros, sendo cada vez mais difundidos na literatura no contexto da cafeicultura de precisão (BENTO et al., 2022 a).

Dentre eles, Barbosa et al. (2021) avaliaram a aplicação de Imagens RGB (Red, Green, Blue) obtidas por RPA em cultivo de café. Santana et al. (2021a), utilizaram uma lavoura cafeeira para verificar a influência da altitude de voo e pontos de controle no georreferenciamento de imagens obtidas por RPA. Santana et al. (2021b), avaliaram a qualidade do plantio de café semimecanizado por aeronave remotamente pilotada. Bento et al. (2022a), utilizaram imagens obtidas por RPA para aplicação de índices de vegetação e caracterização de

cultivares de café. Bento et al. (2022b), calcularam a altura e diâmetro da copa de cafeeiros recém-transplantados ao longo de três períodos de desenvolvimento da cultura utilizando imagens obtidas por RPA. Santos et al. (2022), utilizaram imagens multiespectrais suborbitais para analisar a vegetação para diferenciar e detectar áreas infestadas por bicho-mineiro. Marin et al. (2021), utilizaram RPA para avaliar a variabilidade espacial do nitrogênio foliar na cultura do Café. Martins et al. (2021), desenvolveram novo índice de vegetação para monitoramento da maturação do café usando imagens aéreas, demonstrando que o trabalho de campo demorado pode ser substituído por a metodologia baseada em índices de vegetação.

O manejo e a coleta de informações após a ocorrência de geadas em lavouras de café demandam esforços manuais, o que os torna demorados e trabalhosos. No entanto, a aplicação de RPA em conjunto com ferramentas de AP abre novas perspectivas para o monitoramento minucioso das características e do estado das culturas após serem afetadas pela geada.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Instrução Suplementar** - IS N° 21-002 Revisão A, 4 OUT, 2012. Disponível em: <https://pergamum.anac.gov.br/pergamum/vinculos/IS21-002A.pdf>.

AL-ISSAWI, M. et al. Frost hardiness expression and characterization in wheat at ear emergence. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 199, 66–74, 2013.

AMARAL, J. A. T. et al. Crescimento vegetativo sazonal do cafeeiro e sua relação com fotoperíodo, frutificação, resistência estomática e fotossíntese. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 3, p. 377-384. 2006.

ANDRADE, V. T; CARVALHO, G. R; FERREIRA, A. D. Geada do café de 2021 - impactos na cafeicultura e o que o produtor pode fazer. **Site Epamig**, 2022. Acessado em 02 de março de 2022: <https://revistacafeicultura.com.br/?mat=70792>.

ASSAD, E. D. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 11, 1057-1064, 2004.

BARBOSA, B. D. S., et al. Application of RGB images obtained by UAV in coffee farming. **Remote Sensing**, v.13, p.2397, 2021.

BENTO, N. et al. Evaluation of coffee plant attributes by field collection and remotely piloted aircraft system images. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 20, p. 0205, 2022. B.

BENTO, N. L. et al. Estimate and Temporal Monitoring of Height and Diameter of the Canopy of Recently Transplanted Coffee by a Remotely Piloted Aircraft System. **Agri Engineering**, v. 4, p. 207-215, 2022. A.

BRAGA, G. B., et al. Frost Risk and Rural Insurance in Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 4, 703-711, 2021.

BRICHE, E., et al. Critical analysis of simulated daily temperature data from the ARPEGE-climate model: application to climate change in the champagne wine-producing region. **Clim Chang**, n. 123, p. 241–254, 2014.

CADENAS, J. M. et al. Making decisions for frost prediction in agricultural crops in a soft computing framework. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 175, p.105587, 2020.

CAMARGO, A. P.; SALATI, E. Determinación de la temperatura letal para hojas de café en noches de heladas. **Revista Café**, v. 8, n. 3, p. 12-15, 1966.

CAMARGO, P.; CAMARGO, M. B. Frost in Coffee Crops: Frost Characteristics, Damaging Effects on Coffee and Alleviation Options. In *Coffee: Growing, Processing, Sustaining Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders, and Researchers* (**Ebook**: 1 ed., cap 11, p. 355-369, 2004).

CARAMORI, P. H., et al. Zoneamento de riscos climáticos para a cultura de café (*Coffea arabica* L.) no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, p. 486-494. 2001.

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

CUNHA, J. E. F., et al. Dano por geada no café e sua relação com vertentes em Patrocínio, Minas Gerais. **Revista Vitae - Educação, Saúde e Meio Ambiente**, v. 9, p. 238, 2021.

DECEA - Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Circular de Informações Aeronáuticas AIC N 21/10**, 23 SEP, 2010.

FERRAZ, G. A. e S. Plant sampling grid determination in precision agriculture in coffee field. **Coffee Science** – v. 13, n. 1, p. 112–121, 2018.

FRANZINI, M.; RONCHETTI, G.; SONA, G.; CASELLA, V. Geometric and Radiometric Consistency of Parrot Sequoia Multispectral Imagery for Precision Agriculture Applications. **Applied Sciences**, v. 9, p. 5314, 2019.

GAO, B.-C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996.

HILL, M. J.; DONALD, G. E. Estimating spatiotemporal patterns of agricultural productivity in fragmented landscapes using AVHRR NDVI time series. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 367-384. 2003.

JÚNIOR, J. B. D.; MENECHINI, W. Cultivares de *Coffea arabica* L. em diferentes densidades de plantio após implantação e o evento da geada. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 42497–42511, 2021.

KOTIKOT, S. M., et al. Mapping threats to agriculture in East Africa: Performance of MODIS derived LST for frost identification in Kenya's tea plantations. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 72, 131–139, 2018.

LAN, Y.; SHENGDE, C.; FRITZ, B. K. Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 10, n. 3, p. 1-17, 2017.

LEE, H., et al. Prediction of Frost Occurrences Using Statistical Modeling Approaches. **Advances in Meteorology**, v. 2016, p. 9, 2016.

LIAKOS, K. G. et al. Machine Learning in Agriculture: A Review. **Sensors**, v. 18, n. 8 p. 2674, 2018.

MALAGI, G. et al. The comparison of dormancy dynamics in apple trees grown under temperate and mild winter climates imposes a renewal of classical approaches. **Trees**, v. 29, n. 5, p. 1365–1380, 2015.

MARIN, D. B. et al. Mul-sensoriamento remoto espectral na identificação e mapeamento de variáveis bióticas e abióticas do cafeeiro. **Revista Ceres**, v. 66 n. 2, p. 142–153, 2019.

MARIN, D. B. et al. Unmanned aerial vehicle to evaluate frost damage in coffee plants. **Precision Agriculture**, v. 22, p.1845–1860, 2021.

MARIN, D. B., et al. Unmanned aerial vehicle to evaluate frost damage in coffee plants. **Precision Agriculture**, v. 22, p. 1845–1860, 2021. (A)

MARTINS, G. D.; GALO, M. DE L. B. T. Caracterização espectral da cana-de-açúcar infectada por nematoides e *Migdolus fryanus* por espectrorradiometria de campo. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 4, p. 783–796, 2015.

MARTINS, N. et al. A novel vegetation index for coffee ripeness monitoring using aerial imagery. **Remote Sensing**, v. 13, p. 263, 2021.

MIRANDA, A. C.; MENESES, V. M. C. Internet of things for smart farming and frost intelligent control in greenhouses. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 176, p. 105614, 2020.

MORAIS, H. et al. Sombreamento de cafeeiros durante o desenvolvimento das gemas florais e seus efeitos sobre a frutificação e produção. **Ciência Rural**, v. 39, n. 2, p. 400-406, 2009.

NUTTALL, J. G. et al. Frost response in wheat and early detection using proximal sensors. **Journal of Agro Crop Science**, v. 205, p. 220–234, 2019.

PINTO NETO, J. N. Efeito das variáveis ambientais na produção de café em um sistema agroflorestal. **Coffee Science**, v. 9, n. 2, p. 187-195, 2014.

PINTO, H. S., et al. Um modelo para a estimativa de danos causados por geadas em cafezais. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil. Brasília, DF: **Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café - Embrapa**, v. 1, p. 120-122, 2000.

PINTO, H. S., et al. Zoneamento de riscos climáticos para a cafeicultura do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, p. 495-500, 2001.

PUTRA, WIDJAJA, B. T.; SONI, P. Enhanced broadband greenness in assessing Chlorophyll a and b, Carotenoid, and Nitrogen in Robusta coffee plantations using a digital camera.

Precision Agriculture, n. 19, p. 238–256, 2018.

RAFAELLI, D. R., et al. Análise do potencial de dados MODIS para monitorar o impacto de geada em nível estadual e em lavouras de café. **Agricultura em São Paulo**, v. 53, n. 1, p. 5-15, 2006.

SANTANA, L. S. et al. Precision coffee growing: A review. **Coffee Science**, v. 17, p. 172007, 2022 (A).

SANTANA, L. S. et al. Influence of flight altitude and control points in the georeferencing of images obtained by unmanned aerial vehicle. **European Journal of Remote Sensing**, v. 54, n. 1, p. 59–71, 2021.

SANTANA, L. S., et al. Monitoring errors of semi-mechanized coffee planting by remotely piloted aircraft. **Agronomy**, v. 11, p. 1224, 2021.

SANTOS, L. M. DOS. Vegetation indices applied to suborbital multispectral images of healthy coffee and coffee infested with coffee leaf miner. **AgriEngineering**, 4, 311–319, 2022.

SARRI, D.; MARTELLONI, L.; VIERI, M. Development of a prototype of telemetry system for monitoring the spraying operation in vineyards. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 142, p. 248-259, 2017.

SHAMMI, S. et al. A survey of image-based computational learning techniques for frost detection in plants. **Information Processing in Agriculture**, v. 10, n. 2, p. 164-191, 2023.

VALENTINI, L. S. DE P. et al. Temperatura do ar sem sistemas de produção de café arábica em monocultivo e arborizados com seringueira e coqueiro-anão na região de Mococa, SP. **Bragantia**, v. 69, n. 4, p. 1005-1010, 2010.

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

XIAO, Y. et al. Sensitivity Analysis of Vegetation Reflectance to Biochemical and Biophysical Variables at Leaf, Canopy, and Regional Scales. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 7, p. 4014-4024, 2014.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 1 – AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA GEADA EM CAFEEIROS COM DIFERENTES IDADES E ZONAS DE RISCO CLIMÁTICO

RESUMO

Adversidades climáticas, como as geadas, exercem influência significativa na produção da cafeicultura brasileira. Uma avaliação precisa dos danos causados por geadas em plantações de café pode contribuir para o desenvolvimento de práticas agronômicas eficazes no enfrentamento das mudanças climáticas. O uso de aeronaves remotamente pilotadas e a análise de índices de vegetação surgem como ferramentas promissoras para avaliar os impactos causados pelo gelo na produção de café. Nesse contexto, objetivou-se avaliar o impacto das geadas na cultura do café, utilizando índices de vegetação, em plantações de diferentes idades e áreas de riscos climáticos. Avaliou-se duas lavouras de café situadas em Minas Gerais, Brasil, com idade de um e dois anos na data em que ocorreu a geada. Os dados e imagens aéreas (RGB e multispectrais) foram coletados por uma aeronave remotamente pilotada, três dias após a ocorrência da geada em julho de 2021. As diferenças estatísticas dos dados de danos por geada (DG) nas áreas estudadas, foram obtidas com base no teste não paramétrico de comparação. Doze índices de vegetação foram submetidos a análise. A relação entre os danos por geada e esses índices de vegetação foi estimada obtida por meio da correlação de Pearson (r), regressão linear simples e múltipla. Os resultados mostram que os doze índices de vegetação têm eficiências diferentes para evidenciar a variabilidade espacial dos danos por geada. O índice de vegetação MSR e MCARI2 apresentaram melhores resultados para detectar danos por geada em plantios cafeeiros de um ano de idade. Os índices SAVI, MCARI 1 e MCARI2 se destacaram na identificação dos danos por geada em plantio mais enfolhados com dois anos de idade.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca como o maior produtor mundial de café (SANTANA et al., 2022). O café ocupa o segundo lugar nas exportações agrícolas do país e é uma das mais importantes fontes de receita para a economia brasileira (SANTOS et al., 2022). O estado de Minas Gerais é o principal produtor no país, correspondendo a cerca de 70% da área ocupada, com café arábica (CONAB, 2022). No entanto, problemas relacionados ao clima em algumas áreas produtoras, como chuvas abaixo da média e as geadas severas em junho/julho de 2021, afetaram a primeira floração e frutificação do cafeeiro arábica, reduzindo o potencial de produção para a próxima safra de arábica para 2022/23 que deve cair 16% em relação à safra 2020/21 (USDA, 2022).

A produção cafeeira está condicionada às intempéries e condições climáticas adversas, como as geadas que vêm afetando o planejamento dos produtores no direcionamento da safra de café (BRAGA et al., 2021). No Brasil, a geada é uma preocupação para os agricultores da região centro-sul do país onde grande maioria dos produtores de café estão localizados (WREGE et al., 2018). Nessas regiões os eventos de geada estão associados principalmente a fatores climáticos como latitude, altitude, continentalidade e relevo (ALVARES et al., 2018). A maior parte das áreas cafeeiras da região de Minas Gerais encontram-se implantadas em classe de relevo predominante ondulado e altitudes elevadas entre 900 e 1100 metros (Alves et al., 2019; Borém et al., 2019), onde a geada está mais sujeita a ocorrer (CAMARGO; CAMARGO, 2004).

A geada em áreas de cultivo de café é um fenômeno microclimático definido quando a temperatura cai abaixo do ponto de congelamento de água, que em condições de terrenos inclinados, o ar frio que se acumula na superfície tende a fluir para baixo e acumular na parte inferior da encosta em depressões ou vales, com isso as geadas tem um efeito muito maior nessa localidade (CAMARGO; CAMARGO, 2004). Por isso, o impacto da topografia do terreno é um fator importante que pode gerar variabilidade climática, gerando áreas com diferentes riscos climático no plantio (KUMHÁLOVÁ; MOUDRÝ, 2014).

A exposição de plantas a baixas temperaturas pode resultar no congelamento da água dos tecidos celulares, rompendo as paredes celulares causando dano, o que dá um aspecto de queimado na planta (BRAGA et al., 2021). Com isso, o crescimento e a floração das plantas são afetados, os grãos de café ficam pretos e sua qualidade se deteriora em proporção direta à gravidade dos danos causados pela geada (SHAMMI et al., 2022). Os danos à planta ocasionam

diminuição da fotossíntese, morte da folha ou dano ao caule (AL-ISSAWI et al., 2013), ocasionando redução na produção.

As lavouras de cafeeiros necessitam de avaliações de suas condições por meio de monitoramento e detecção de danos após a ocorrência da geada. Isso é crucial para quantificar o estresse e os prejuízos causados por esse evento, fornecendo informações essenciais para apoiar a tomada de decisões, como a necessidade de podar as plantas danificadas e aplicar fertilizantes para preservar as folhas que não foram afetadas (MARIN et al., 2021). Atualmente, os cafeicultores e pesquisadores investigam manualmente os danos nas áreas afetadas, tornando um grande desafio a obtenção de dados precisos de danos às lavouras, em geral, os danos para a safra de café relatados são muito limitados (USDA, 2022). No entanto, implementações recentes de sistemas baseados em imagens térmicas e espectral oferecem um método não destrutivo para detectar danos por geada em plantas, tornando-se funcional e essencial para a detecção precoce, permitindo o gerenciamento de risco da geada (SHAMMI et al., 2022).

É possível encontrar poucos estudos que utilizaram dados de resposta espectral de plantas de café com danos por geada. Marin et al. (2021), estudaram o potencial de uso de imagens multiespectrais obtidas por aeronaves remotamente pilotadas (RPA) para analisar e identificar os danos causados pela geada nas plantas de café de oito anos de idade em diferentes favorabilidades climáticas e demonstraram que os índices de vegetação apresentaram forte relação e alta precisão com os danos da geada nas plantas de café. A utilização de RPA, têm mostrado uma visão diferenciada dos campos de cultivo, facilitando a disseminação dessa tecnologia no campo (SANTOS et al., 2022).

O sistema de aeronaves remotamente pilotadas representa uma aplicação típica de plataforma suborbital, equipada com sensores a bordo, que viabiliza a aquisição de produtos em diversas resoluções. Isso possibilita a obtenção de informações capazes de antecipar e prever as tendências de comportamento das plantas em resposta a influências de diversos fatores agronômicos e ambientais (TSOUROS et al., 2019). Aplicar esse conhecimento na cafeicultura pode permitir ao cafeicultor no gerenciamento prático de campo, como avaliar os danos em cafeeiros causados pelo gelo, proporcionando informações agrícolas oportunas para os produtores (MARIN et al., 2021).

Existem poucas informações detalhadas na literatura sobre como a geada afeta as plantas de café nas diferentes idades, bem como essa relação com as áreas de risco climático. Nesse contexto, este estudo ganha importância ao analisar os danos por meio da resposta espectral das plantas em diversos estágios de crescimento, levando em consideração as áreas sujeitas a riscos

climáticos. Essas descobertas podem contribuir para a implementação de técnicas viáveis que otimizem a tomada de decisões e intervenções por parte dos cafeicultores. A presença de ferramentas de gestão de risco rural é necessária, a fim de garantir a renda do agricultor e permanência em suas atividades quando ocorrem eventos climáticos extremos (BRAGA et al., 2021).

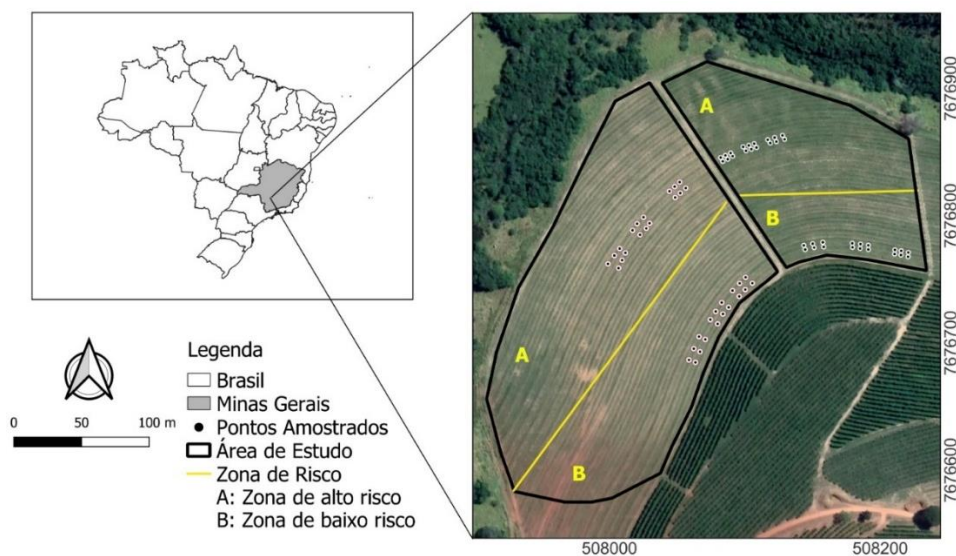
A hipótese deste estudo é de que o uso de índices de vegetação, obtidos por meio de imagens capturadas por câmera multiespectral embarcada em aeronave remotamente pilotada, é uma abordagem eficaz para identificar e monitorar os danos causados pela geada nas plantações de café, independentemente da idade da planta e das características topográficas do terreno. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o impacto das geadas na cultura do café utilizando índices de vegetação, em plantações com diferentes idades e áreas de risco climático.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Descrição da área

O estudo foi realizado na Fazenda Bom Jardim, localizada em Santo Antônio do Amparo, na região do Oeste de Minas Gerais, Brasil, nas coordenadas geográficas 21°00'58.9"S e 44°55'24.9"W, altitude de 950m (Figura 1).

Figura 1 – Localização geográfica da área de estudo. Os pontos amostrais estão destacados em pontos pretos, as zonas de favorabilidade climática estão separadas por linhas amarelas, sendo elas: A: Alto risco e B: Baixo risco.



Fonte: Do autor (2023).

Santo Antônio do Amparo possui maior parte das terras do território nas faixas de altitude entre 900 e 1050 metros, detém maior área de produção de café da região, onde 58% da região é constituída por relevo ondulado seguido pelo relevo suave ondulado com 36,5%. Isto significa que a maior parte das lavouras de café encontra-se em áreas com menos de 20% de declividade (ALVES et al., 2019). Da área total do município com altitude maior que 1050 metros, aproximadamente 46% dela está ocupada pela cafeicultura. As áreas cafeeiras ocupam prevalentemente altitudes maiores que 950 metros (OLIVEIRA et al., 2023). A área de dois anos possui uma altitude de 937 metros, uma inclinação de 60° e abrange 19.959 m². Já a área de um ano tem uma extensão de 24.475m², com uma altitude de 950 metros e uma declividade de 62°.

A classificação climática da região é Cwa, subtropical úmido segundo classificação Köppen-Geiser, com verões quentes e úmidos e invernos frios e secos, com temperaturas média, mínima e máxima de 20°C, 14°C e 26°C. A precipitação total média é de 1400 mm e precipitação total anual média de 1670 mm.

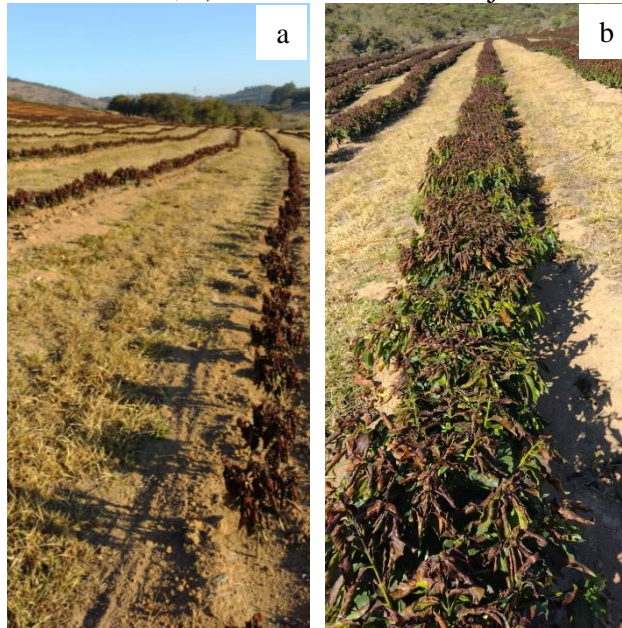
2.2 Delineamento experimental

Foram utilizadas duas áreas experimentais de plantio de café (*Coffea arabica* L.) com diferentes características no que tange à época de plantio e à cultivares plantadas. Nessas áreas, o cultivo inclui tanto o Catuaí quanto o Catucaí e Arara. O Catuaí é um híbrido desenvolvido no Brasil, mais especificamente em Minas Gerais, e resulta da combinação das espécies Caturra e Mundo Novo. Por outro lado, o Catucaí é um híbrido brasileiro que surge do cruzamento entre o Caturra e o Mundo Novo. O café Arara é uma variedade que tem origem no Brasil, é proveniente do cruzamento natural entre as variedades Obatã e Catuaí Amarelo.

Em todas as áreas do plantio o espaçamento era de 0,5m entre plantas e 3,5m na entrelinha, totalizando 5.700 plantas por hectares. A idade das plantas foi determinada de acordo com o tempo entre a data de plantio e a ocorrência da geada, sendo elas: Área de 1 ano e Área de 2 anos, ou seja, as plantas apresentavam no momento da avaliação 1 ano e 2 anos, respectivamente. A área de 1 ano havia cultivo de Catuaí Amarelo, a área de 2 anos foi cultivada com Catucaí e Arara (Figura 2). As áreas foram subdivididas em subáreas de acordo com o risco climático conforme metodologia proposta por Marin et al. (2021a), onde o grau de risco de danos nas plantas é classificado em zona de baixo risco (B) e zona de alto risco (A) (Figura 1). Para avaliação de níveis de danos em cafeeiros, foram delimitados três blocos dentro de cada

subárea de risco climático, cada bloco correspondeu a dez plantas. As plantas avaliadas foram georreferenciadas com auxílio de GPS.

Figura 2 – a) Plantio de um ano, b) Plantio de dois anos já sob efeito da geada.



Fonte: Do autor (2022).

2.2.1. Classificação da área de risco de geada

Antes da análise dos dados, foi realizada a classificação da área de estudo com o objetivo de compreender os impactos das geadas no cultivo de café e recomendar medidas para minimizar possíveis danos causados por esse fenômeno. Seguindo a metodologia proposta por Marin et al. (2021a), procedeu-se à subdivisão da área de estudo em duas regiões distintas, cada uma caracterizada por diferentes níveis de risco climático associado às geadas. Essas regiões foram classificadas como A e B, conforme ilustrado na Figura 1.

Essa classificação foi estabelecida com base em critérios que consideraram a variabilidade da altitude e a topografia do terreno, incluindo variações na inclinação do terreno. A variabilidade da altitude refere-se à diferença nas elevações encontradas dentro de uma área específica. Terrenos com altitudes diversas podem apresentar microclimas distintos e, consequentemente, estar sujeitos a diferentes riscos climáticos, como temperaturas mais baixas. Nesse contexto, as áreas de estudo foram divididas em zonas de risco climático da seguinte maneira:

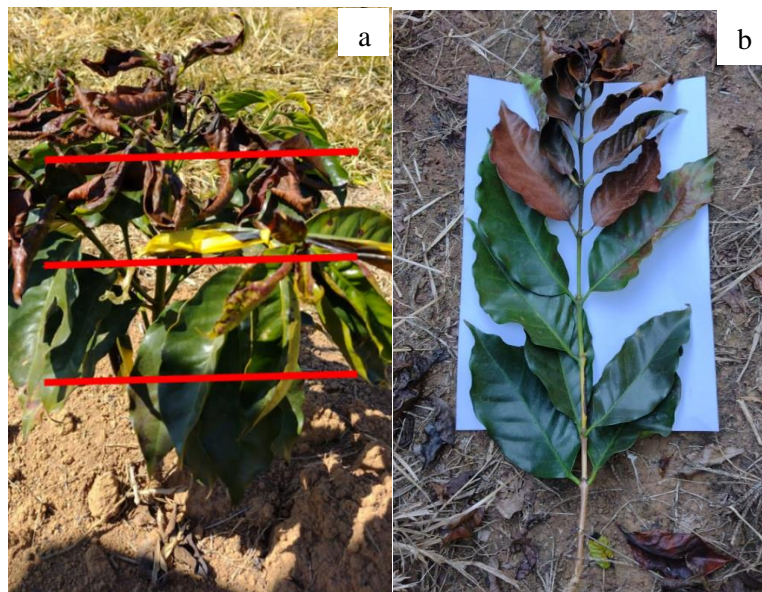
"Alto Risco": abrange a área de baixada, caracterizado por altitudes mais baixas e uma configuração geográfica que torna a área mais suscetível a eventos climáticos adversos, como temperaturas extremamente baixas. "Baixo Risco": compreende a encosta do terreno, onde as

altitudes são mais elevadas e a configuração geográfica tende a reduzir a suscetibilidade a eventos climáticos adversos. Consequentemente, essa área pode ser considerada menos vulnerável e, portanto, apresentar um menor risco climático associado a geadas. Essa abordagem de classificação em zonas de risco climático é fundamental para o planejamento e a implementação de estratégias de manejo e mitigação de geadas, auxiliando na proteção das culturas de café nas regiões de estudo.

2.3 Avaliação de danos

A geada ocorreu no dia 20 de julho de 2021, a temperatura mínima observada em termômetro localizado na área de estudo foi de $-1,7^{\circ}\text{C}$. A avaliação visual de danos causados por geada em cafeeiros foi realizada de acordo com metodologia descrita por Soderholm e Gaskins (1960), Androcioi Filho et al. (1986) e Marin et al. (2021). Neste sistema de avaliação, três avaliadores independentes avaliam visualmente as três porções de cada planta (terço superior, médio e inferior) (Figura 3a), considerando folhas e ramos, atribuem notas de 0 a 10 e obtêm pontuação média para cada planta e transforma para porcentagem. Foram consideradas como danos, as partes da planta que apresentaram coloração marrom e necrose (3b), que são características físicas causadas pela morte da célula por congelamento.

Figura 3 – a) Avaliação de cafeeiro no terço superior, médio e inferior da planta; b) folhas danos de geada.



Fonte: Do autor (2022).

Os valores médios obtidos por cada avaliador, são agrupadas em classes de dano, as notas de um a dez são correspondentes a porcentagem de 0 a 100% de danos conforme tabela descrita no artigo de Marin et al. (2021).

2.4 Avaliação de crescimento e desenvolvimento das plantas

Os cafeeiros foram avaliados por meio da mensuração das seguintes variáveis: números de nós por ramo (NR), número de folhas com dano (FD). Para as avaliações foram utilizadas trena e prancheta. Em cada planta de avaliação foram utilizados dois ramos (superior e inferior) do terço médio da planta para mensuração das variáveis. Na Figura 4 é possível visualizar as avaliações na área de estudo.

Figura 4 – a) Avaliação de cafeeiros de um ano de idade, b) avaliação de cafeeiros de dois anos de idade, C) Ramo do cafeeiro de dois anos.



Fonte: Do autor (2021).

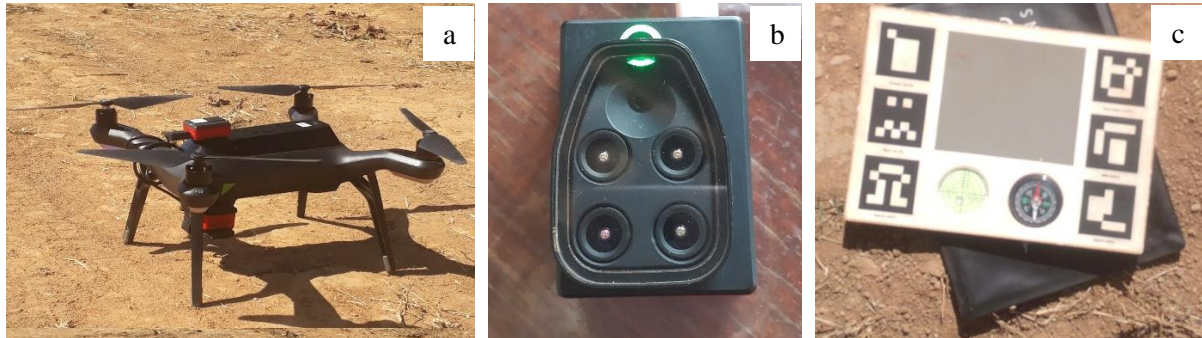
2.5 Coleta e processamento de imagens

A primeira etapa foi gerar o banco de dados contendo imagens no formato digital. As imagens foram obtidas usando uma aeronave remotamente pilotada (RPA) e uma câmera multiespectral acoplada. A RPA utilizada foi a 3DR Solo comercial (3D Robotics, Berkeley, CA, EUA), com quatro motores (quadricóptero) (Figura 5a).

As imagens foram capturadas por uma câmera multiespectral Parrot Sequoia (Figura 5b) que possui um sensor RGB com Resolução de 16 megapixels (4608×3456) e quatro

sensores extras com resolução de 1,5 megapixels (1280×960) nas bandas espectrais de verde com 550 nm e 40 de Largura da Banda (Band Pass – BP), vermelho (660 nm BP 40), borda vermelha (735 nm BP 10) e infravermelho próximo (790 nm BP 40). Para eliminação dos efeitos de interferências da atmosfera, nos voos foram utilizados a placa de correção radiométrica (Figura 5c).

Figura 5 – a) RPA 3DR Solo, b) Câmera multiespectral Parrot Sequoia, C) Placa de correção radiométrica.



Fonte: Do autor (2022)

As imagens foram processadas no software Pix4Dmapper, versão estudante (PIX4D, Lausanne, Suíça), com configurações dos parâmetros no nível mais elevado, onde as imagens foram unificadas, gerando os ortomosaicos para calcular os índices de vegetação. Este software foi desenvolvido especificamente para conjuntos de imagens e dados de levantamentos aéreos de veículos remotamente pilotados. O software Pix4D calcula as posições e orientações das imagens originais de forma automática através da Triangulação Aérea (AAT) e Ajustamento de feixes em Bloco (Bundle Block Adjustment, BBA). Com base em nuvem de pontos 3D obtidos durante a AAT e BBA, é gerado um modelo digital de superfície (MDS) por meio da ligação destes pontos. O ortomosaico é criado a partir da projeção e combinação das imagens originais com o MDS (PIX4D, 2013). Foi utilizado o modelo padrão "Ag Multispectral" do para gerar o ortomosaico a partir de bandas espectrais individuais (verde, vermelho, red edge e infravermelho próximo). O painel de refletância calibrado corrigiu a refletância das imagens. Após a geração dos ortomosaicos, os índices de vegetação foram calculados no Qgis e exportados para a extensão TIFF para posterior análise. A criação do Ortomosaicos é baseada na ortorretificação. A sobreposição de imagens foi de 80%, altitude de vôo de 30 m e velocidade 30 m/s. A sobreposição de imagens é o elo entre as várias fotos sequenciais feitas pela câmera na hora de produzir o mapa.

2.6 Índices de Vegetação

Os índices de vegetação foram escolhidos com base na pesquisa de Marin et al. (2021), o qual avaliou e identificou os índices com capacidade de avaliar a resposta espectral das plantas devido a danos causados pela geada.

Os índices de vegetação foram calculados com base na combinação de bandas espectrais das imagens processadas. Os índices de vegetação das imagens foram calculados usando a ferramenta Raster Calculator disponível no menu Raster do software QGIS 3.4.14-Madeira (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2018). Após a elaboração dos índices de vegetação, foram criados *buffers* associados aos pontos amostrais georreferenciados dos dados coletados em campo. Foram extraídos os valores médios dos *pixels* da imagem condizentes à cada planta individual utilizando a ferramenta Zonal Statistics, o valor médio extraído dos pixels foi no raio de 0,20 m, calculado a partir do centro de cada planta amostrada para comparar matematicamente os valores das imagens com os dados de danos coletados em campo. Os valores de pixel foram exportados em formato XLSX e analisado desempenho dos índices de vegetação na estimativa dos danos causada por geadas em cafeeiros.

Cada índice de vegetação é derivado de diferentes combinações de bandas espectrais, resultando em valores distintos para cada índice. Portanto, para caracterizar danos foliares devido à geada em cafeeiros, foram adotadas algumas abordagens gerais. Essas incluem a identificação de áreas com valores consideravelmente mais baixos nos índices de vegetação pós-geada, a comparação desses valores com padrões normais estabelecidos para a cultura do café e a validação por meio de inspeções de campo para confirmar a extensão dos danos.

Os índices de vegetação estão apresentados na Tabela 1. Após o processamento dos ortomosaicos, as imagens foram cortadas apenas na área de interesse para aplicação de índices vegetativos.

Tabela 1 – Índices de vegetação calculados a partir da reflectância das bandas multispectrais das imagens.

Índices de vegetação	Fórmulas	Referência
NDVI (normalized difference vegetation index)	$(\text{Nir} - \text{Red}) / (\text{Nir} + \text{Red})$	Rouse et al. (1974)
NDRE (normalized difference red edge)	$(\text{Nir} - \text{RedEdge}) / (\text{Nir} + \text{RedEdge})$	Gitelson and Merzlyak (1994)
MTCI (meris terrestrial chlorophyll index)	$(\text{Nir} - \text{RedEdge}) / (\text{RedEdge} - \text{Red})$	Dash and Curran (2004)
MSR (modified simple ratio)	$((\text{Nir}/\text{Red}) - 1) / (\sqrt{((\text{Nir}/\text{Red})) + 1})$	Chen (1996)
GNDVI (green normalized difference vegetation index)	$(\text{Nir} - \text{Green}) / (\text{NIR} + \text{Green})$	Gitelson et al. (1996)
GCI (green coverage index)	$(\text{Nir} / \text{Green}) - 1$	Gitelson et al. (2005)
NDWI (normalized difference water index)	$(\text{Green} - \text{Nir}) / (\text{Green} + \text{Nir})$	Gao (1996)
MCARI1 (first modified chlorophyll absorption ratio index)	$1,2 (2,5 (\text{Nir} - \text{Red}) - 1,3 (\text{Nir} - \text{Green}))$	Haboudane et al. (2004)
MCARI2 (modified chlorophyll)	$1,5 (2,5 (\text{Nir} - \text{Red}) - 1,3 (\text{Nir} - \text{Green})) (\text{Nir} / \text{Red}) / \sqrt{(2\text{Nir} + 1)^2 - (6\text{Nir} - 5\sqrt{\text{Red}}) - 0,5}$	Haboudane et al. (2004)
SAVI (soil adjusted difference vegetation index)	$(1 + 0,5) * ((\text{Nir} - \text{Red}) / (\text{Nir} + \text{Red} + 0,5))$	Huete (1988)
OSAVI (optmized SAVI)	$(\text{Nir} - \text{Red}) / (\text{Nir} + \text{Red} + 0,16)$	Rondeaux et al. (1996)
CIrededge (Chlorophyll IndexRedEdge)	$(\text{Nir} / \text{RedEdge}) - 1$	Ahamed et al. (2011)

Reflectâncias nas faixas: (Nir) infravermelho próximo; (RedEd) entre o vermelho e o infravermelho (vermelho limítrofe); (Red) vermelho; (Green) verde. Fonte: Do Autor (2023).

2.7 Análises estatísticas

Os dados referentes aos danos por geadas (DG) e às respostas vegetativas Número de Nós por Ramos (NR), Folhas com Danos (FD) e os índices de vegetação em estudo foram compilados e exportados para uma planilha no Microsoft Excel. Foi feita análise de variância e teste de média do número de folhas com danos e número de nós por ramos dos cafeeiros para cada zonas de risco climático. Para analisar a relação entre os danos causados e os índices de vegetação, os dados foram submetidos a uma análise de correlação de Pearson (r) com um nível de significância de $p < 0,05$. Os valores médios dos índices de vegetação foram calculados com base na média dos pixels localizados em um raio de 0,20 metros do centro de cada planta.

No intuito de avaliar o desempenho dos índices de vegetação na estimativa dos danos provocados por geadas nos cafeeiros, em diferentes áreas de risco climático, foram empregados modelos preditivos de regressão linear. Nesses modelos, os índices de vegetação atuaram como variáveis independentes, enquanto os valores representativos dos danos nas distintas áreas de risco climático desempenharam o papel de variáveis dependentes.

Foi realizado os ajustes de regressão linear simples considerando cada índice de vegetação com a variável independente. No entanto, foi verificado que os ajustes não estimaram o dano de forma satisfatória, sendo que, em muitos casos foram obtidos parâmetros não significativos para estes modelos. Com isso, fez-se necessário a aplicação da regressão linear múltipla, a qual generaliza o modelo de regressão linear simples, permitindo muitos termos no modelo, em vez de apenas uma interceptação e um declive (DRAPER; SMITH, 1998).

Para a análise dos dados via modelo de regressão linear múltiplo foram consideradas todos aos índices de vegetação apresentados neste estudo (NDVI, NDRE, MTCI, MSR, GNDVI, GCI, NDWI, MCARI1, MCARI2, SAVI, OSAVI, Cirededge). O modelo de regressão múltipla foi ajustado para a explicação do dano, verificando quais variáveis eram significativas, ao nível de 5% de significância, e estimando os valores para os parâmetros.

Para a seleção de variáveis utilizou-se do método computacional stepwise, o qual é um procedimento para seleção ou exclusão de variáveis baseado em um algoritmo que verifica a importância das variáveis, incluindo ou excluindo-as do modelo se baseando em uma regra de decisão. Foi testado também, se há multicolinearidade entre as variáveis, ou seja, se duas ou mais variáveis fornecem a mesma informação, utilizando o Variance Inflation Factor (VIF) e realizado a análise de resíduos dos dados (Anexo A) para verificar se algum pressuposto do

modelo foi violado. Foi verificado que como o VIF é menor do que 10, para todas as variáveis explicativas, nos dois modelos, não foi observado o problema de multicolinearidade.

Foi realizada análise dos resíduos para avaliar a adequação do modelo e homoscedasticidade do modelo, assegurando que a variância seja constante. Foi avaliado simetria da distribuição dos dados. Por fim, analisou-se a normalidade de distribuição dos resíduos. Essas análises forneceram informações da qualidade do modelo e confiabilidade das inferências derivadas dele. Além da análise gráfica, a normalidade foi confirmada pelo teste Shapiro-Wilk, ao nível de 5% de significância. Toda parte computacional foi realizada utilizando-se o software R de acesso livre (R CORE TEAM, 2023).

Verificou-se que a suposição dos erros aleatórios tem distribuição Normal. Foi observado os erros aleatórios têm distribuição Normal. Esta hipótese foi confirmada pelo teste de Normalidade de Shapiro Wilk, portanto os erros seguem a distribuição normal. Os resíduos estudentizados tem variâncias constantes $Var(r_i) = 1$. Por meio destas análises foi confirmado que os resíduos seguem uma distribuição normal, e não violam nenhuma pressuposição do modelo (Arquivos Suplementares).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Danos por geada nas zonas de risco climático

Nas Tabelas 2 e 3 estão apresentados os resultados da análise de variância e teste de média do FD e NR dos cafeeiros avaliados nos plantios de um ano e dois anos. Na comparação de entre as zonas de risco em ambas as áreas de plantios (Tabelas 2 e 3), constatou-se que os cafeeiros apresentaram um maior número de FD nas zonas A. Não houve diferença significativa para o NR (Tabela 2 e 3).

Tabela 2 – Comparação do Número de Folhas com Danos (FD) e Número de Nós por Ramos (NR) entre as diferentes zonas de favorabilidade climática em cafeeiros de um ano.

Zonas de risco climático	FD	NR
Alto risco	9 a	6 a
Baixo risco	4 b	6 a
Valor (F)	0,05	0,66 ^{NS}
DMS	0,99	0,64
CV%	21,68	15,87

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey entre zonas favorabilidade climática para cada área de plantio de café. CV: coeficiente de variação; DMS: diferença mínima significativa. NS: não significativo. Fonte: Do autor (2023).

Tabela 3 – Comparação do Número de Folhas com Danos (FD) e Número de Nós por Ramos (NR) entre as diferentes zonas de favorabilidade climática em cafeeiros de dois anos.

Zonas de risco climático	FD	NR
Alto risco (A)	11 a	11 a
Baixo risco (B)	5 b	12 a
Valor (F)	3,88	0,45 ^{NS}
DMS	1,27	1,05
CV%	22,91	13,61

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey entre zonas favorabilidade climática para cada área de plantio de café. CV: coeficiente de variação; DMS: diferença mínima significativa. Fonte: Do autor (2023).

Nos cafeeiros com um ano de idade, a média de FD na zona A foi de 9, enquanto na zona B foi de 4 (Tabela 2). No caso das plantas de dois anos de idade, as da zona A apresentaram uma média de FD de 11, enquanto as da zona B mantiveram a média de 5 FD (Tabela 3). Esses números indicam que as plantas de dois anos de idade na zona A tiveram uma média de FD 175% superiores àquelas na zona B. Da mesma forma, as plantas de um ano de idade (Tabela 2) na zona de alto risco tiveram uma média de FD 125% superior às da zona de baixo risco. O estudo sugere que a idade das plantas, desempenha um papel determinante na resposta ao risco de geadas. O plantio de um ano parece ser mais suscetível, enquanto o de dois anos mostra maior resistência. A compreensão dessas relações pode ser valiosa para estratégias de manejo, como a escolha adequada do estágio de plantio em diferentes zonas para minimizar os danos causados por geadas.

Os resultados destacam a notável influência da topografia do terreno na delimitação das áreas suscetíveis a danos causados por geadas. Tais danos estão intimamente ligados a fatores específicos do local, como as temperaturas mínimas, o estágio fenológico das plantas e a altitude (ALLEVATO et al., 2019). Tais informações são importantes pois auxiliam os produtores de café na tomada de decisão e no planejamento agrícola (MARIN et al., 2021).

A observação de uma redução de 55% no FD nas áreas B em comparação com as áreas A enfatiza a importância crítica da topografia na cafeicultura, bem como a relação entre o número de folhas ativas que desempenham a fotossíntese, o que pode causar um impacto significativo na produtividade. Essa constatação reforça a ideia de evitar o plantio em locais de baixadas ou áreas de alto risco, uma vez que os danos por geadas desencadeiam processos de necrose e senescência nas folhas, resultando na redução da área foliar e da capacidade de interceptação de luz. A redução na atividade fotossintética tem como consequência uma menor produtividade, traduzindo-se em uma redução na colheita durante a safra de café (RIGHI et al., 2007).

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados da análise de variância para os dados de dano de geada (DG) para as duas áreas de risco climático e áreas com tempos de plantio distintos. Ao observar a dispersão dos dados por meio do desvio padrão (DP) (Tabela 4), nota-se que os dados permaneceram abaixo de 10%. Isso mostra que o conjunto de plantas avaliadas apresentaram níveis de danos semelhantes, com pouca variação em torno da média.

Tabela 4 – Dano por geada (DG) e desvio padrão (DP) em cafeeiros de um ano e dois anos em diferentes zonas de favorabilidade climática nas áreas de estudo.

Idade do Plantio	Zonas de favorabilidade climática			
	Baixo risco		Alto risco	
	DG (%)	DP	DG (%)	DP
Um ano	6 Bb	2,3	88 Aa	7,7
Dois anos	12 Ab	4,85	50 Ba	8,66

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Fonte: Do autor (2023).

Foram observadas diferenças significativas de dano por geada entre as zonas de alto e baixo risco climático, bem como os tempos de plantio (Tabela 4). Os cafeeiros apresentaram DG significativamente superior nas zonas de alto risco em relação às áreas de baixo risco (Tabela 4). Estes resultados mostram que a zona de favorabilidade climática de alto risco formada pela topografia do terreno ocasionou maior intensidade de danos nos plantios cafeeiros, independentemente do tempo de plantio. A curvatura da superfície terrestre (convexidade e concavidade) do terreno desempenha um grande fator na formação de zona do risco de geada (KOTIKOT et al., 2020). Em terrenos inclinados a massa de ar frio, por ser mais densa, escoar e se concentra na região mais baixa do terreno (BURNS; CHEMEL, 2014a; MORRIS; CRITES, 2019). Por esse motivo, as baixas temperaturas e, portanto, as zonas de geada tendem a acumular nos fundos dos vales e nas regiões baixas da paisagem (BIGG et al., 2014; CHUNG et al., 2006). As plantas localizadas nos fundos dos vales ficam expostas por mais tempo às baixas temperaturas e tendem a sofrer mais danos.

No plantio de dois anos, a zona de alto risco e baixo risco apresentaram 50% e 12% de danos por geada, respectivamente. Já para a área de um ano foram observados valores de 88% e 6% nas zonas de alto e baixo risco climático, respectivamente. Em estudo semelhante Marin et al. (2021), observou maior valor de dano por geada em cafeeiros de seis anos de idade, na qual as plantas apresentaram 45% da área foliar danificada. Em geral, plantas de café mais velhas demonstram maior resistência ao dano por geada devido ao desenvolvimento de estruturas mais robustas, como sistemas de raízes extensos e troncos espessos. Essas

características oferecem uma proteção adicional contra condições climáticas adversas. Além disso, o acúmulo de reservas de energia ao longo dos anos contribui para a capacidade das plantas mais antigas se recuperarem após eventos climáticos prejudiciais. No entanto, a resistência ao frio pode variar entre diferentes variedades de café, condições específicas de cultivo e a intensidade da geada, sendo necessário considerar medidas de manejo para proteger as plantas, independentemente da idade.

De acordo com Kotikot et al. (2020), a intensidade da geada determina a extensão da lesão da planta, onde o congelamento leva à formação de gelo dentro das células da planta causando congelamento intracelular e extracelular que, depende da velocidade e extensão da desidratação da planta. Diante disso, a identificação e classificação de zonas de maior ou menor favorabilidade climática são importantes para os produtores, para que realizem o manejo adequado na área de produção, considerando, por exemplo, a topografia e as áreas onde o ar frio se acumula (MARIN et al., 2019). De acordo com Allevato et al. (2019), os danos causados pelas geadas estão fortemente relacionados com as condições específicas do local, o estágio fenológico das árvores, envolvendo tanto a altitude como a exposição.

Deve-se notar também que na presença de obstáculos como árvores, inibem o fluxo de ar frio, permitindo que ele se assente, levando à redução da temperatura e, portanto, à geada (KOTIKOT et al., 2020). No presente estudo, devido ao tempo de plantio dos cafeeiros, as plantas são de porte baixo, dessa maneira o ar frio se move facilmente em direção às regiões baixas da paisagem onde a inversão de temperatura se fortalece, deixando uma camada de ar frio perto da superfície. Com isso, as plantas de porte mais baixo estão sujeitas a ter maior contato com a camada de ar frio. Esse é um ponto a ser considerado, de acordo com Alves et al. (2019), o efeito direto da massa de ar frio que permanece por algumas horas sobre as gemas reprodutivas presentes no ramo, provoca uma forte desidratação e morte dessas gemas, afetando sua capacidade reprodutiva.

Essa informação é fundamental para tomada de decisão na realização do manejo com podas e adubações para manter as folhas que não foram danificadas (Marin et al., 2021). A ocorrência de geadas interfere diretamente nos custos, pois quanto maior o índice de mortalidade no cafezal, maior será o gasto com replantio (ARAÚJO, DOMENES; HELENA, 2016). Segundo Alves et al. (2021) e Camaroni et al. (2021) a decisão de replantio é de acordo com o nível de danos nos tecidos das folhas e tronco.

No presente estudo, a área de alto risco apresentou danos acima de 80% nas lavouras de um ano de idade. Neste caso, a tomada de decisão não está relacionada a poda ou adubação, e

sim, com a sobrevivência das plantas e a necessidade ou não de realizar um replantio. Em virtude da morte de algumas plantas, surge a necessidade de tomar a decisão quanto a realizar o replantio ou manter as plantas e aguardar que rebrote. A porcentagem de danos foliares que justifica o replantio de cafezais após uma geada pode variar dependendo de vários fatores, incluindo a capacidade de recuperação das plantas, as condições locais e os recursos disponíveis para o produtor. Em alguns casos, se uma grande parte das folhas foi danificada, mas as raízes e o caule principal estão saudáveis, as plantas podem se recuperar ao longo do tempo. Em outros casos, se os danos forem muito extensos e as plantas não demonstrarem sinais de recuperação após um período de tempo adequado, o replantio pode ser necessário. Através dos resultados obtidos foi possível identificar a necessidade de realizar o replantio em parte da lavoura nas áreas de alto risco climático na área de um ano.

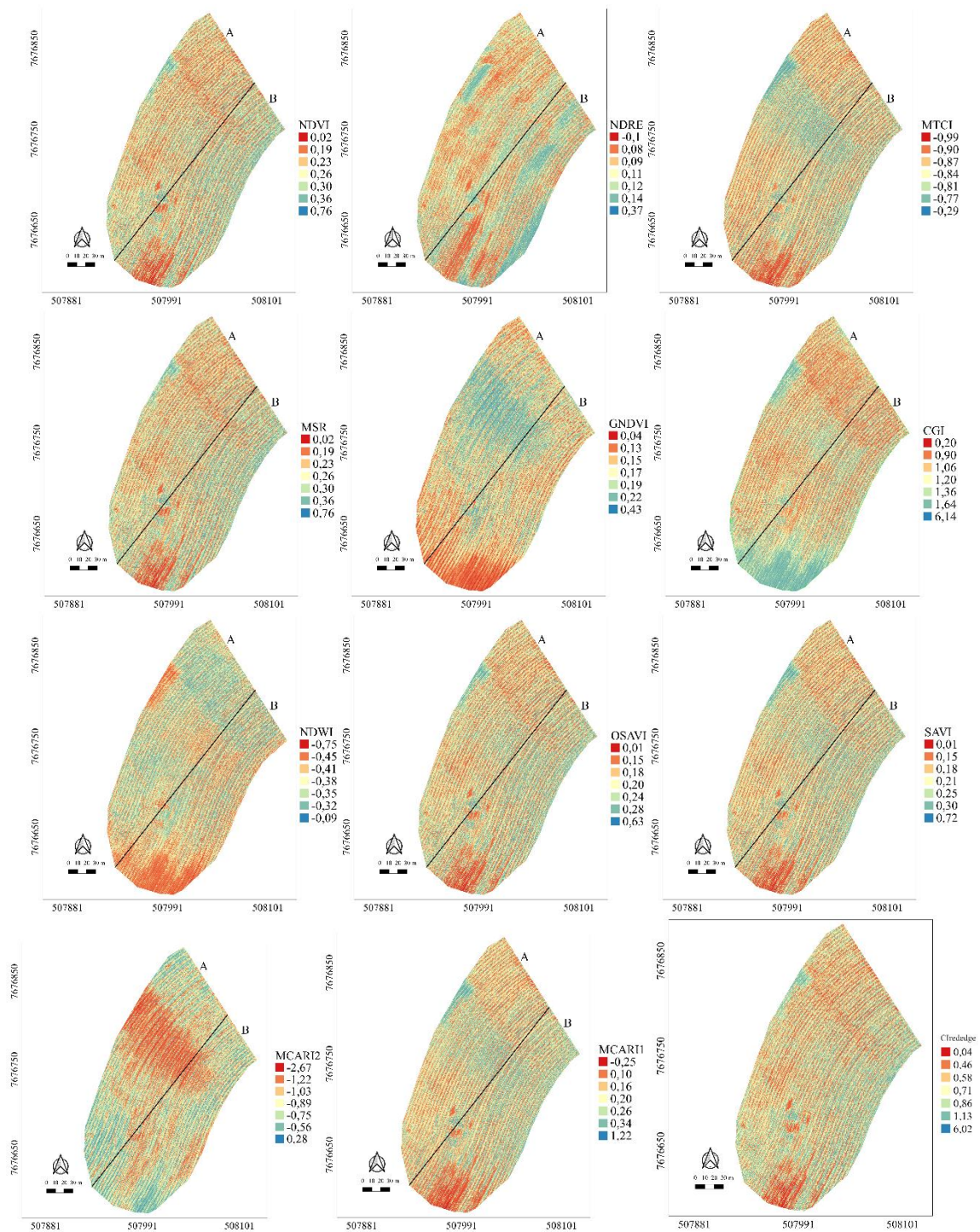
Com os resultados observados torna-se possível inferir que plantios mais jovens, localizados nos fundos dos vales e nas regiões baixas da paisagem, sofrem com o efeito direto da massa de ar frio. Assim, a escolha do local de plantio, evitando áreas mais baixas e propensas a acumulação de ar frio se torna estratégias interessantes para minimizar os riscos. Além disso, implementar medidas de proteção, como a cobertura das plantas durante os períodos de geada, para preservar essas gemas. A pesquisa fornece uma base valiosa para tomar decisões informadas e implementar práticas que visem reduzir os danos causados pelas geadas e, assim, otimizar a produção de café.

3.2 Mapas de índices de vegetação em função da ocorrência da geada

Os mapas de índices de vegetação foram gerados para visualização dos danos causados por geada nas áreas de estudo (Figuras 6 e 7). Os locais onde os índices de vegetação apresentam com menor valor, são representados pelas cores em tons de vermelho e laranja caracterizando a região com menor vigor vegetativo, e, conseqüentemente, maior área danificada por geada e menos favorável ao desenvolvimento e produtividade dos cafeeiros.

No plantio de um ano (Figura 6), os índices de vegetação que evidenciam melhor o efeito dos danos da geada foram o NDVI, MSR, OSAVI, SAVI, MCARI1 e MCARI2. Esses índices apresentaram valores mais altos na zona de baixo risco em relação a zona de alto risco. Os mapas de índices NDRE, MTCI, GNDVI, CGI e NDWI não mostram com clareza as zonas de risco climático.

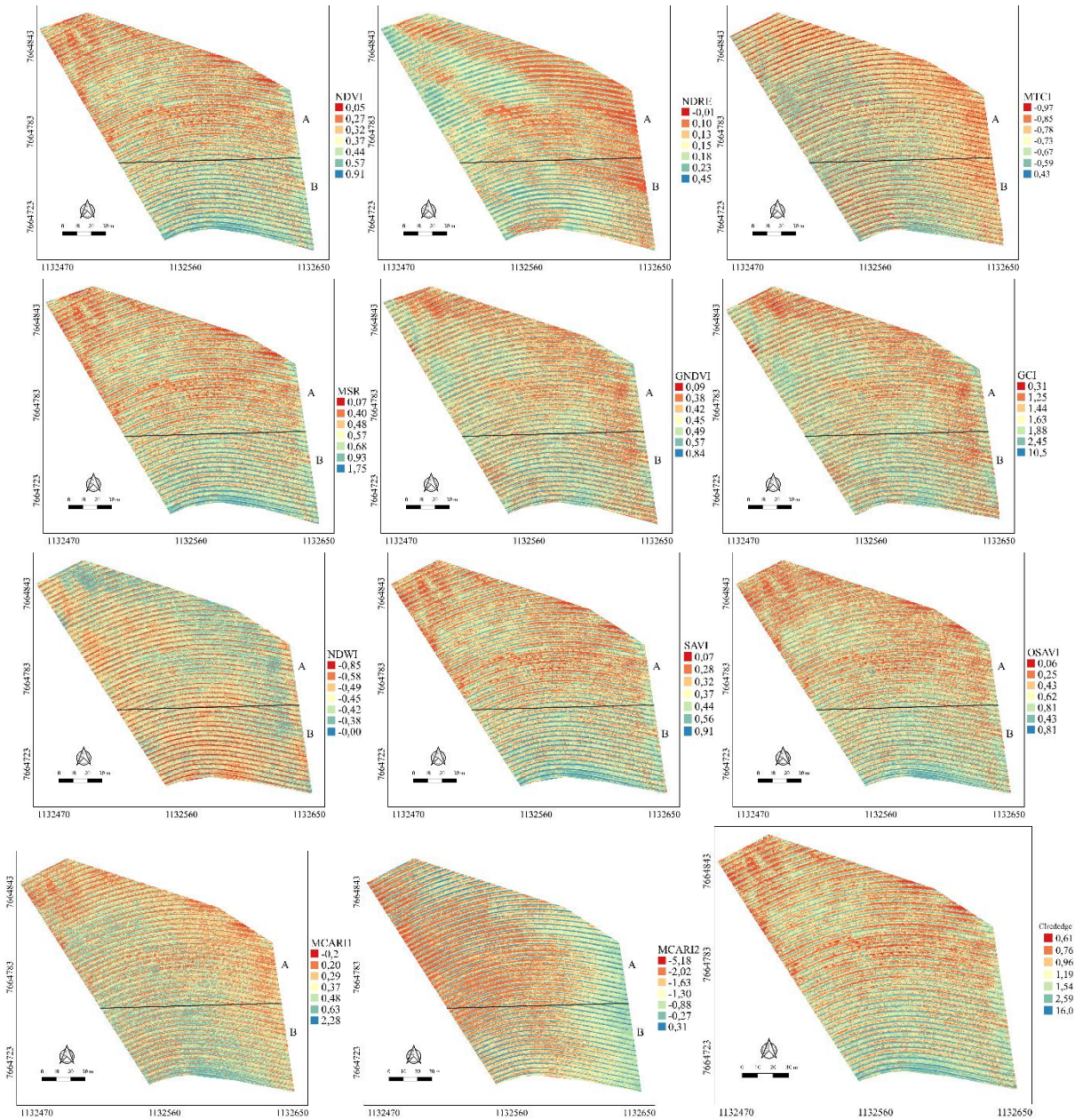
Figura 6 – Mapas de índice vegetativo em área com lavoura de café com um ano de idade após a ocorrência de geada.



Fonte: Do autor (2023).

Na Figura 7, estão os mapas de distribuição espacial dos índices de vegetação no plantio de dois anos. Os índices vegetativos NDVI, MSR, SAVI, OSAVI E MCARI1 apresentaram variações espaciais consideráveis nos valores entre as zonas de alto risco e baixo risco.

Figura 7 – Mapas de índice vegetativo em área com lavoura de café com dois anos de idade após a ocorrência de geada.



Fonte: Do autor (2023).

De acordo com os estudos de Marin et al. (2021), o índice MSR apresenta bom desempenho na estimativa dos danos causados pela geada em cafeeiros, evidenciando que a região espectral do visível está diretamente relacionada com os danos causados pelas geadas nos cafeeiros, podendo estar associado à mudança de cor nas folhas devido ao congelamento.

De acordo com Gao (1996), o índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) usa refletâncias na banda do vermelho e do infravermelho próximo, a banda do vermelho está

localizada na região de absorção de clorofila, enquanto a banda de infravermelho próximo está localizado no plano de alta refletância da copa da vegetação. Por isso o NDVI costuma saturar quando o índice de área foliar é alto. Neste estudo, o NDVI foi eficiente para visualizar os danos por geada nas duas áreas de plantio (Figura 6 e 7), provavelmente beneficiado pelo menor índice de área foliar dos plantios jovens.

Gabrielli et al. (2022), avaliaram a capacidade dos índices de vegetação de identificar danos por geada espacialmente em plantas de cobertura e obtiveram resultados satisfatórios para os índices de vegetação baseados nas regiões vermelha, borda vermelha e infravermelho próximo do espectro de refletância do dossel da cultura, dentre eles, o NDVI foi bem sucedido. Allevato et al. (2019) também obtiveram resultados positivos com NDVI na identificação de dano do dossel pela geada em plantio de faia europeia (*Fagus sylvatica* L.), uma espécie arbórea. Na literatura o NDVI é mais sensível na identificação de danos causados por geadas em comparação com outros índices. Rudorff et al. (2012), verificaram que o NDVI é capaz de detectar os danos causados pela geada na cultura da cana-de-açúcar. Apesar dos resultados promissores deve-se considerar que o estágio de desenvolvimento e o tipo de cultura são diferentes da cultura estudada no presente trabalho.

As variações espectrais evidenciadas no mapa podem contribuir para a identificação de áreas com maior estresse por danos por geada em cafeeiros e direcionar o manejo do plantio para formas de manejo preventivo e curativo nas diferentes áreas de favorabilidade climática. São escassos os estudos com monitoramento de danos por geada por sensoriamento remoto suborbital na cultura do café. Li et al. (2021) e Wang et al. (2021), identificaram danos por geada em plantio com base em dados de satélites. No entanto o uso de imagens de satélite ainda possui limitações causadas pela resolução espacial, temporal e contaminação por nuvens. O uso dessa ferramenta é de grande relevância e pode auxiliar muito no planejamento agrícola e principalmente, quanto à aplicabilidade das informações para fins de financiamento e seguro rural.

3.3 Modelagem do dano de geada gerado por índices de vegetação

3.3.1 Análise estatística

A Tabela 5 apresenta as estimativas dos parâmetros para cada índice de vegetação em cafeeiros de um ano, considerando a regressão linear simples, para descrição dos danos por

geada para cada um deles em diferentes zonas de risco climático. Os resultados obtidos demonstraram que os índices de vegetação tiveram relação com os danos causados pela geada, em alguns casos essa relação foi forte, enquanto em outros, a relação foi fraca.

Tabela 5 – Parâmetros do modelo de regressão linear simples para descrição dos danos por geada (DG) considerando índices de vegetação (IsV) em cafeeiros de um ano em diferentes zonas de risco climático seu respectivo coeficiente de correlação.

IsV	Risco	β_0	β_1	r	R^2
NDVI	Baixo	-5,383	23,1980*	0,53	0,28
	Alto	76,56*	34,79	0,26	0,07
NDRE	Baixo	2,671	21,999	0,24	0,06
	Alto	120,01*	-253,720*	-0,57	0,33
MTCI	Baixo	6,776*	-1,249	-0,04	0,00
	Alto	111,961*	-142,386*	-0,56	0,32
MRS	Baixo	-5,75	23,028	0,38	0,14
	Alto	104,179*	-59,253	-0,38	0,14
GNDVI	Baixo	10,843*	-46,49	-0,31	0,09
	Alto	75,60*	88,02	0,25	0,06
CGI	Baixo	-1,185	2,818	0,37	0,14
	Alto	90,528*	-1,936	-0,06	0,00
NDWI	Baixo	-7,657	-20,257	-0,31	0,09
	Alto	95,31*	19,06	0,09	0,01
CIrededge	Baixo	-2,455	3,378*	0,64	0,41
	Alto	83,71*	5,147	0,14	0,02
SAVI	Baixo	-9,57	38,566*	0,61	0,37
	Alto	86,49*	6,48	0,03	0,00
OSAVI	Baixo	-11,21*	42,084*	0,64	0,41
	Alto	89,178*	-2,438	-0,01	0,00
MACARI1	Baixo	-6,506*	26,071*	0,77	0,60
	Alto	86,512*	6,037	0,04	0,00
MACARI2	Baixo	6,3195*	-4,0808	-0,17	0,03
	Alto	94,594*	21,867	0,41	0,16

*significativo a 5%. Fonte: Do autor (2023).

A análise de correlação (r) (Tabela 5) demonstrou que somente os índices de vegetação MCARI1, CIrededge, SAVI e OSAVI tem forte correlação positiva ($r > 0,60$) com os danos por

geada em na zona de baixo risco climático. O índice de vegetação NDVI tem moderada correlação positiva ($r > 0,50$) com os danos por geada na zona de baixo risco climático. Na zona de alto risco o NDRE obteve correlação negativa moderada de $r = -0,57$, assim como o MTCI ($r = -0,56$). Jełowicki et al. (2020), estimou danos por geada na cultura de inverno de canola usando imagens multiespectrais baseadas em veículo aéreo não tripulado, e os melhores resultados foram alcançados no estudo de detecção de danos usando OSAVI e NDVI.

Ainda, foi empregada a métrica R^2 (coeficiente de determinação) para facilitar a interpretação dos resultados do modelo. Quanto mais os valores de R^2 se aproximam de 1, maior é a confiança na interpretação da relação entre os índices de vegetação e o dano causado por geada. Entre todos os índices de vegetação listados na Tabela 5, apenas o MCARI1 apresentou uma forte correlação ($r = 0,77$) e um coeficiente de determinação mais próximo de 1 ($R^2 = 0,60$) na zona de baixo risco.

A Tabela 6 apresenta as estimativas dos parâmetros para cada índice de vegetação em cafeeiros de dois anos de idade, considerando a regressão linear simples, para descrição dos danos por geada e o coeficiente de correlação de Pearson para cada um deles em diferentes zonas de risco climático.

Tabela 6 – Estimativas dos parâmetros do modelo de regressão linear simples para descrição dos danos por geada (DG) considerando índices de vegetação (IsV) em cafeeiros de dois anos em diferentes zonas de risco climático seu respectivo coeficiente de correlação.

						(Continua)
IsV	Risco	β_0	β_1	r	R^2	
NDVI	Baixo	2,716	11,32	0,08	0,01	
	Alto	99,39*	-70,43	-0,34	0,11	
NDRE	Baixo	29,97	-51,2	-0,14	0,02	
	Alto	26,6	76,48	0,17	0,02	
MTCI	Baixo	6,7	7,162	0,08	0,01	
	Alto	47,139	4,014	0,03	0,00	
MRS	Baixo	-9,407	15,125	0,27	0,07	
	Alto	66,66*	-14,37	-0,2	0,04	
GNDVI	Baixo	4,64	10,08	0,08	0,01	
	Alto	60,93	-16,78	-0,07	0,01	
CGI	Baixo	12,7826	-0,1934	-0,04	0	

Tabela 6 – Estimativas dos parâmetros do modelo de regressão linear simples para descrição dos danos por geada (DG) considerando índices de vegetação (IsV) em cafeeiros de dois anos em diferentes zonas de risco climático seu respectivo coeficiente de correlação.

IsV	Risco	(Conclusão)			
		β_0	β_1	r	R^2
NDWI	Alto	37,196	2,469	0,14	0,02
	Baixo	17,601	8,065	0,07	0,01
CIrededge	Alto	19,03	-42,91	-0,09	0,01
	Baixo	11,3975	0,034	0,01	0
SAVI	Alto	89,572*	-7,776	-0,33	0,11
	Baixo	-12,83	30,99	0,21	0,05
OSAVI	Alto	197,07	-205,66	-0,36	0,13
	Baixo	16,561	-8,052	-0,09	0,01
MACARI1	Alto	4,503	78,872	0,26	0,07
	Baixo	13,702*	-2,574	-0,09	0,01
MACARI2	Alto	34,279*	18,273	0,39	0,15
	Baixo	15,711*	6,253	0,3	0,09
	Alto	38,36*	-21,22	-0,4	0,16

*significativo a 5%. Fonte: Do autor (2023).

Analisando os dados de forma geral (Tabela 5 e Tabela 6), os índices de vegetação tiveram melhor desempenho no plantio de dois anos na zona de alto risco, evidenciando a sensibilidade dos índices em identificar danos em diferentes tempos de plantio e área de risco. Ainda, observou-se que os modelos (Tabela 5 e Tabela 6) com o parâmetro β_1 significativos ao nível de 5% de significância, ocorreu para os casos em que a correlação do índice de vegetação e o dano se deram de forma mais forte. Ademais, viu-se que o modelo de regressão simples não descreve os danos de forma satisfatória. Por isso foi realizada análise de regressão múltipla para analisar melhor a estimativa de danos pelos índices de vegetação.

O sensoriamento remoto suborbital demonstra ter grande potencial como ferramenta para incorporar informações para práticas preventivas e curativas de manejo em plantios cafeeiros localizados em zonas de risco climático. Pois os mapas evidenciaram a variabilidade de danos e evidenciou as zonas de risco climático. Por isso, os resultados deste trabalho são encorajadores na detecção de danos causados pela geada. Novas avaliações devem ser

realizadas combinando índices de vegetação envolvendo análises adicionais para melhorar a qualidade das regressões entre os índices de vegetação e os danos medidos.

3.3.2. Análise de regressão múltipla

Antes de proceder ao ajuste do modelo de regressão, foi realizado o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson (r) entre as variáveis dano de geada e cada índice de vegetação (Tabela 7). Para este ajuste, os índices foram considerados de forma global, desconsiderando as zonas de risco climático. Essa abordagem permite uma avaliação ampla da relação entre os índices de vegetação e os danos causados pela geada, sem a influência da segmentação por áreas específicas.

Tabela 7 – Coeficiente de correlação de Pearson (r) para as variáveis dano de geada (DG) e cada índice de vegetação, para plantas de 1 ano e 2 anos.

Isv	1 ano	2 anos
NDVI	-0,83	-0,75
NDRE	-0,74	0,13 ^{NS}
MTCI	-0,83	-0,39
MSR	-0,95	-0,70
GNDVI	0,79	-0,43
CGI	-0,93	-0,37
NDWI	0,93	0,42
CIrededge	-0,92	-0,74
SAVI	-0,91	-0,79
OSAVI	-0,93	-0,33
MCARI1	-0,87	0,21 ^{NS}
MCARI2	-0,73	0,23 ^{NS}

NS: não significativo. Fonte: Do autor (2023).

Os índices MSR, CGI, NDWI, CIrededge, SAVI e OSAVI revelaram uma correlação muito forte e negativa ($0,9 < r < 1,0$) com os danos causados pela geada na área de um ano. O NDWI apresentou correlação muito forte e forte para o plantio de um ano e dois anos, respectivamente. No plantio de dois anos (Tabela 7), observou-se correlação negativa forte ($0,6 < r < 0,9$) para os índices NDVI, MSR, CIrededge e SAVI. Esses resultados indicam uma associação robusta e inversamente proporcional entre esses índices de vegetação e a ocorrência

de danos por geada, fornecendo informações valiosas para a compreensão dos padrões de resposta das plantações ao fenômeno de geada em diferentes idades de plantios cafeeiros.

O índice de clorofila verde CGI é usado com para uma ampla gama de espécies de plantas, ele é calculado como uma razão da refletância na banda NIR sobre a refletância na banda do verde. O Cired-edge é calculado usando a relação da refletância da entre a banda espectral do vermelho e do infravermelho próximo (NIR). A faixa de borda vermelha é altamente sensível à luz refletida da estrutura celular de uma planta.

Para obter melhores estimativas para o dano de geada considerando os índices de vegetação como variáveis explicativas (independentes) ajustou-se um modelo de Regressão Linear Múltiplo considerando todos os índices. Em seguida utilizou-se o método computacional stepwise, e os modelos selecionados foram os seguintes:

Para as plantas de 1 ano:

$$\text{Dano} = 138,835 - 248,459 * \text{MSR} - 48,580 * \text{MCARI2} \quad (1)$$

$$R^2 = 92,89\%$$

Para as plantas de 2 anos:

$$\text{Dano} = 265,29 - 341,29 * \text{SAVI} + 50,79 * \text{MCARI1} + 32,11 * \text{MCARI2} \quad (2)$$

$$R^2 = 76,44\%$$

No modelo ajustado (1) que foram para as plantas de 1 ano, notou-se que os índices de vegetação mais adequados para descrever o dano por geada foram o MSR e o MCARI2, com um coeficiente de determinação de 92,89%. Já para o modelo ajustado (2) que foram desenvolvidos para as plantas de 2 anos de idade, os índices de vegetação mais adequados para descrever os danos por geada foram o SAVI, MCARI1 e MCARI2 com um coeficiente de determinação que explica 76,44% da variabilidade dos dados.

O MCARI1 e MCARI2 são índices que captam as variações no teor de clorofila nas plantas. São usados para estimativa da característica biofísica índice de área foliar verde fotossinteticamente ativa (NGUY-ROBERTSON, 2013). No caso do MCARI2 foi inserido um fator de suavização da interferência do solo foi desenvolvido para otimizar a sensibilidade do índice (HABOUDANE et al., 2004). Isso explica por que o índice MCARI2 teve melhor desempenho, no plantio de um ano as plantas são menores e com menor área foliar, onde o solo está mais exposto.

Analisando os dados de forma geral, os índices de vegetação tiveram desempenho diferentes, evidenciando a sensibilidade dos índices em identificar danos em diferentes idades

de plantio. Os dados revelam que o MSR e MCARI2 podem ser utilizados na tomada de decisão em plantios mais jovens, enquanto os índices SAVI, MCARI1 e MCARI2 são indicados para plantios com maior idade, e, conseqüentemente, maior área foliar disponível.

3 CONCLUSÃO

O uso de RPA se mostrou uma ferramenta importante para avaliar a variabilidade espacial e os danos por geada na cultura do café por meio dos índices de vegetação. Os índices de vegetação MSR e MCARI2 foram eficientes em avaliar danos em plantios de um ano, enquanto que os índices SAVI, MCARI1 e MCARI2 foram melhores para visualizar os danos de geada em plantios de dois anos. O modelo baseado nos índices de vegetação permitiu estimar o dano causado por geada nas áreas de alto e baixo risco climático.

Foi possível observar variações nos danos por geada em função da idade de plantio e zonas de risco climático. Os plantios de um e dois anos de idade do café apresentaram maior porcentagem de danos da geada na zona de alto risco climático. Para as plantas de um ano, em função dos danos serem superiores a 80% recomenda-se o replantio da área, enquanto que para a área de dois anos de idade.

REFERÊNCIAS

- AL-ISSAWI, M. et al. Frost Hardiness Expression and Characterisation in Wheat at Ear Emergence. **J Agro Crop Sci**, v. 199, p. 66-74, 2013.
- ALLEVATO, E. et al. Canopy damage by spring frost in European beech along the Apennines: effect of latitude, altitude and aspect, **Remote Sensing of Environment**, v. 225, p. 431-440, 2019.
- ALVARES, C. A.; SENTELHAS, P.C.; STAPE, J.L. Modeling monthly meteorological and agronomic frost days, based on minimum air temperature, in Center-Southern Brazil. **Theor Appl Climatol**, v. 134, p. 177–191, 2018.
- ANDROCIOLI FILHO, A. et al. Frost injury and performance of coffee at 23oS in Brazil. **Exp. Agric.**, v. 22, n. 1, p. 71-74, 1986.
- BORÉM, F. M. et al. Meteorological variables and sensorial quality of coffee in the mantiqueira region of Minas Gerais. **Coffee Science**, v. 14, n. 1, p. 38–47, 2019.
- BRAGA, G. B. et al. Frost Risk and Rural Insurance in Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 4, p. 703-711, 2021.
- CHEN, J. M. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 3, p. 229–242, 1996.
- CHEN, Y.; GILLIESON, D. Evaluation of Landsat TM vegetation indices for estimating vegetation cover on semi-arid rangelands - A case study from Australia. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 5, p. 435–446, 2009.
- DASH, J.; CURRAN, P. J. The MERIS terrestrial chlorophyll index, **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 23, p. 5403-5413, 2004.
- DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3^a ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista brasileira de biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.
- GABBRIELLI M, et al. Satellite-Based Frost Damage Detection in Support of Winter Cover Crops Management: A Case Study on White Mustard. **Agronomy**. V. 12, n. 9, p. 2025, 2022.
- Garcia, C. H. Tabelas para classificação do coeficiente de variação. Piracicaba, IPEF. 12p. (**Circular técnica**, 171), 1989.
- GITELSON, A. A. et al. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 8, p. 308-403, 2005.
- GITELSON, A. A. et al. Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction. **Remote Sensing of Environment** v. 80, p. 76–87, 2002.

- GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; Merzlyak, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote sensing of Environment**, p. 58, n. 3, p. 289–298, 1996.
- GITELSON, A.; MERZLYAK, M. N. Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 22, n. 3, p. 247–252, 1994.
- GONSAMO, A., and P. PELLIKKA. The Sensitivity Based Estimation of Leaf Area Index from Spectral Vegetation Indices. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** v. 70, p. 15–25, 2012.
- HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Value of using different vegetative indices to quantify agricultural crop characteristics at different growth stages under varying management practices. **Remote Sensing**, v. 2, n. 2, p. 562–578, 2010.
- HUETE, A. R. Adjusting Vegetation Indices for Soilin fluencies. **International Agrophysics**, v. 4, n. 4, p.367-376, 1988.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295-309. 1988.
- JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M.; V. M. TACHIBANA. Multivariate analysis of combined GPS/GLONASS point positioning performance in Brazilian regions under different ionospheric conditions. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**. v. 187, p. 1-9. 2019.
- JOHNSON, R. A.; D. V. WICHERN. Applied Multivariate Statistical Analysis. 6^a. New Jersey: **Pearson**, 2007.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes, 1928.
- KUMHÁLOVÁ, J.; MOUDRÝ, V. Topographical characteristics for precision agriculture in conditions of the Czech Republic. **Applied Geography**, v. 50, p. 90-98. 2014.
- LIU, J., E. PATTEY, and G. JÉGO. 2012. “Assessment of Vegetation Indices for Regional Crop Green LAI Estimation from Landsat Images over Multiple Growing Seasons.” *Remote Sensing of Environment* 123: 347–358.
- MARIN, D. B. et al. Mul-sensoriamento remoto espectral na identificação e mapeamento de variáveis bióticas e abióticas do cafeeiro. **Revista Ceres**, v. 66 n. 2, p. 142–153, 2019.
- MARIN, D. B. et al. Unmanned aerial vehicle to evaluate frost damage in coffee plants. **Precision Agriculture**, v. 22, p.1845–1860, 2021.
- NGUY-ROBERTSON, A. L. et al. Green Leaf Area Index Estimation in Maize and Soybean: Combining Vegetation Indices to Achieve Maximal Sensitivity. **Agronomy Journal**, v. 104, p. 1336–1347, 2012.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, AT: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: URL <https://www.R-project.org/>.

ROBUSTI, E. A. et al. Café arborizado no estado do paran , brasil: indicadores Financeiros e interferências ambientais, **Agroalimentaria**, v. 23, n. 44, p. 79-91, 2017.

Rondeaux, G., M; Steven, F. Baret. Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, p. 95–107, 1996.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation. **Greenbelt: NASA/GSFC**, Type III, Final Report, 371p. 1974.

SANTOS, L. M. d. et al. Use of RPA Images in the Mapping of the Chlorophyll Index of Coffee Plants. **Sustainability**, v. 14, p. 13118, 2022.

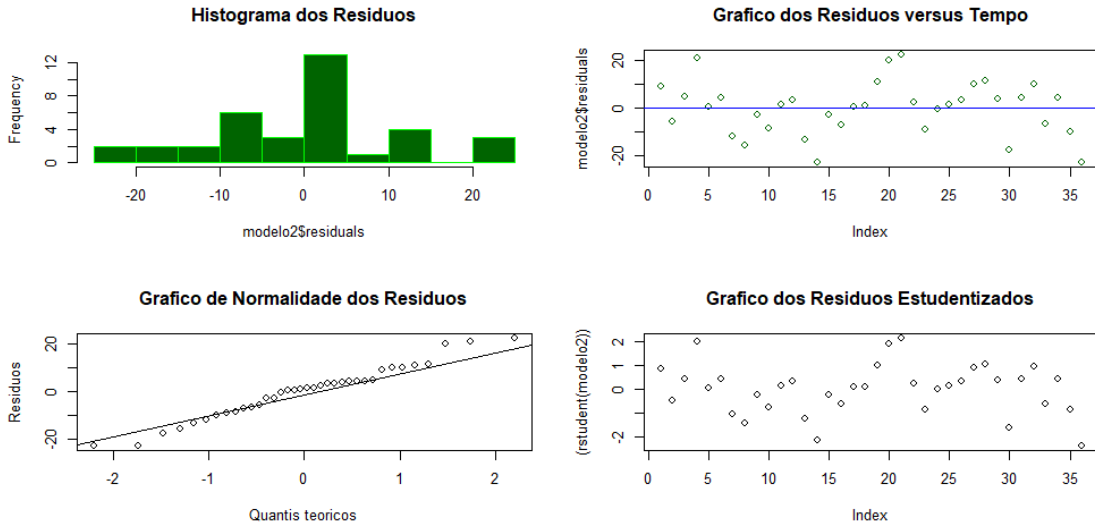
AHAMED, T. L. et al. A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n.7, p.2455-2469, 2011.

TSOUROS, D.C.; BIBI, S.; SARIGIANIDIS, P.G. A review on UAV-based applications for precision agriculture. **Information**, v. 10, p. 349, 2019.

WREGGE, M. S. et al. Risco de ocorrência de geadas na região centro-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, n. 1, p. 524-553, 2018.

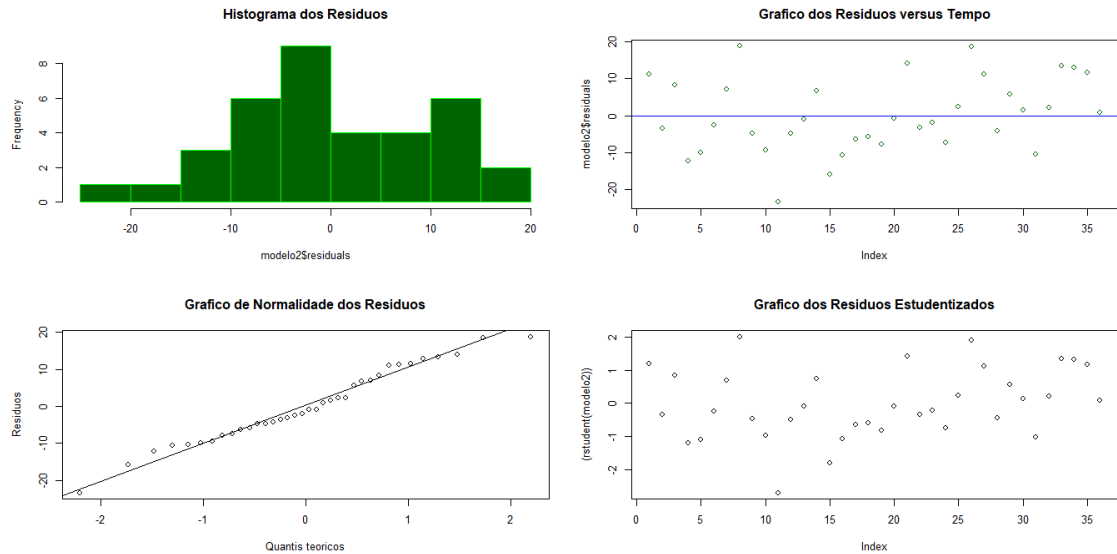
ANEXO A - GRÁFICOS DE RESÍDUOS

Figura 8 – Gráfico de resíduos para o modelo (1).



Fonte: Do autor (2023).

Figura 9 – Gráfico de Resíduos para o modelo (2).



Fonte: Do autor (2023).

ARTIGO 2 – RECUPERAÇÃO DE CAFEZAIS APÓS OCORRÊNCIA DE GEADAS: UMA ABORDAGEM UTILIZANDO AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS

RESUMO

Plantios cafeeiros expostos à geada sofrem danos consideráveis que afetam o ciclo produtivo da planta. O uso de aeronave remotamente pilotada nas avaliações e monitoramento de plantios cafeeiros com danos por geadas pode ser uma alternativa rápida e precisa para gerar informações qualitativas e quantitativas para planejamentos de safra. O objetivo deste estudo foi avaliar a recuperação do café após a ocorrência de geada utilizando aeronave remotamente pilotada no monitoramento e avaliação de plantios de café com diferentes idades e áreas de risco climático. O estudo foi realizado na Fazenda Bom Jardim, localizada em Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, Brasil. Foram utilizadas três áreas experimentais com diferentes tempos de plantio dos cafeeiros (um ano, dois anos e oito anos). Cada área foi dividida em zonas de risco climático de alto (parte inferior do terreno) e baixo risco (parte superior do terreno). As variáveis da planta avaliadas em campo foram: números de nós por ramo (NR), número de folhas com danos (FD), número de flores por ramos (NFL), número de frutos por ramos (NFR), produtividade (P) e danos por geada (DG). Foram realizados voos sobre as áreas avaliadas com uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) para a captura de imagens multiespectrais e geração dos índices vegetativos. As imagens e avaliações de campo foram realizadas simultaneamente, a primeira avaliação ocorreu três dias após a ocorrência da geada e a cada três meses após o evento, abrangendo um período de um ano e oito meses. Os resultados obtidos indicam que é viável utilizar índices de vegetação NDVI, MSR, Cirededge, MCARI1 e MCARI2 para monitorar a recuperação de plantações de café afetadas pela geada, proporcionando a capacidade de mapear sua distribuição espacial. Plantios de dois anos de idade tem melhor capacidade de se recuperar dos danos da geada. Cafezais de oito anos tem mais complexidade na resposta das plantas aos danos da geada.

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura no Brasil enfrenta diversos desafios que desempenham um papel crucial na produtividade do café (FERRAZ et al., 2018). De acordo com o segundo levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023), na safra de 2023, o Brasil produziu 54.742,9 mil sacas de café arábica e conilon, refletindo um aumento de 7,5% em relação às safras 2021/2022, mas com uma redução de aproximadamente 8,76% em comparação com a safra de 2020. A diminuição na produção na safra 2020/2021 está associada a eventos extremos, incluindo o estresse hídrico ao longo de dois anos consecutivos e os danos causados pelas geadas em regiões específicas (CONAB, 2021). Nas áreas cafeeiras de Minas Gerais, geralmente localizadas em terrenos ondulados com altitudes entre 900 e 1100 metros, os riscos de geada são consideráveis (ALVES et al., 2019; BORÉM et al., 2019). A topografia do terreno desempenha um papel crucial na variabilidade climática, influenciando os níveis de risco nas áreas de plantio (KUMHÁLOVÁ; MOUDRÝ, 2014).

A geada pode afetar significativamente o crescimento e a produtividade do café (RAMALHO et al., 2014). Um dos principais fatores condicionantes da relação entre a geada e os danos sobre a cultura do café pode estar relacionada a idade das plantas. Existem poucas informações relacionadas a resposta do café com diferentes idades em função da ocorrência de geada. De modo geral, plantas mais jovens, com um ano de idade, geralmente possuem sistemas radiculares menos desenvolvidos e a composição dos tecidos das plantas ainda estão em formação, o que deixa as plantas mais frágeis, e, assim, suscetíveis a danos causados pela geada (CAMARGO; CAMARGO, 2004). Em contrapartida, plantas mais maduras, com oito anos por exemplo, tendem a possuir sistemas radiculares mais estabelecidos e uma estrutura mais robusta, o que lhes confere uma maior capacidade de resistir e se recuperar após uma geada. Neste sentido, este estudo torna-se importante para avaliar o impacto da geada sobre o café com diferentes idades, bem como a capacidade de recuperação das plantas.

Diante desses desafios, torna-se importante adotar estratégias avançadas de detecção e monitoramento nos campos de cultivo. O Sensoriamento Remoto se destaca como uma ferramenta muito utilizada no cultivo de café, permitindo uma monitorização completa das plantações ao longo de seu ciclo de desenvolvimento (MARTINS; GALO, 2015). No monitoramento específico de plantações cafeeiras, são utilizadas diversas tecnologias, como mapeamento de plantios e aquisição de imagens por meio de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) (SANTANA et al., 2021a). Permitindo, a identificação de variações espectrais relacionadas às mudanças nas condições fisiológicas das plantas e uma avaliação precisa dos

impactos sofridos (MARTINS; GALO, 2015). Essa resposta espectral, por sua vez, é influenciada por uma complexa interação de fatores bioquímicos das plantas, características físicas do dossel e parâmetros agrônômicos (ABDEL-RAHMAN et al., 2008).

Diversos índices de vegetação são frequentemente utilizados para identificar estresses específicos que impactam as culturas (BASSO; CAMMARANO, 2004). Embora haja estudos na área cafeeira que empregam índices de vegetação, como o NDVI, para quantificar danos causados por geadas, até o momento, não foram publicadas pesquisas abordando a avaliação da recuperação de cafeeiros danificados por geada por meio do uso de câmeras embarcadas em RPA.

Este estudo ganha relevância ao investigar danos por meio da resposta espectral das plantas em vários estágios de desenvolvimento, considerando as áreas propensas a riscos climáticos. As descobertas podem ser cruciais para desenvolver técnicas eficazes que aprimorem a tomada de decisões e intervenções dos cafeicultores. A implementação de ferramentas de gestão de risco rural é essencial para garantir a estabilidade financeira dos agricultores diante de eventos climáticos extremos (BRAGA et al., 2021).

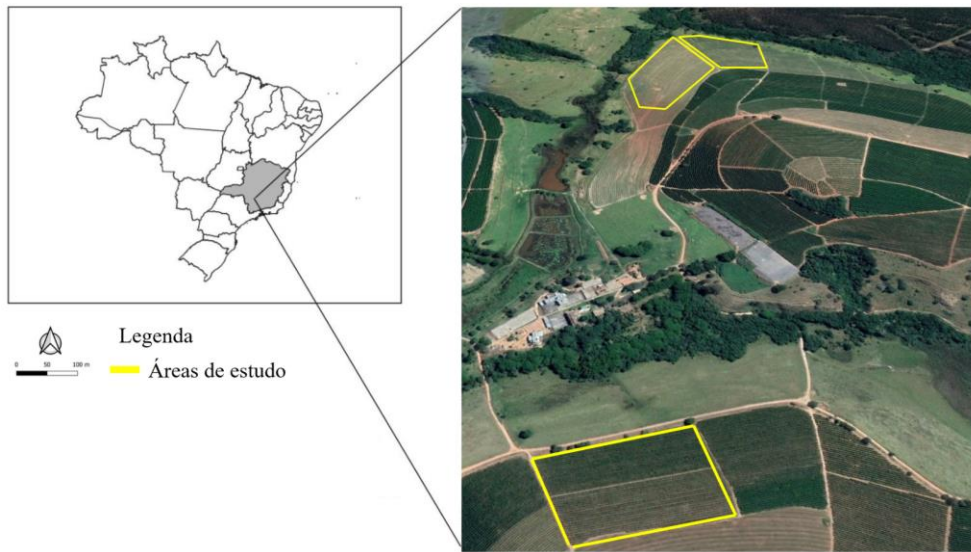
A hipótese deste estudo é que a utilização de índices de vegetação, obtidos por meio de imagens capturadas por câmera multiespectral embarcada em RPA, constitui uma abordagem eficaz e viável para identificar e monitorar os danos causados pela geada nas plantações de café, bem como para avaliar a recuperação das plantas. Essa eficácia é proposta independentemente da idade da planta e das zonas de risco climático. O objetivo deste estudo foi avaliar a recuperação do café após a ocorrência de geada utilizando RPA no monitoramento e avaliação de plantios de café com diferentes idades e áreas de risco climático.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Descrição da área

O estudo foi realizado na Fazenda Bom Jardim (Figura 1), localizada em Santo Antônio do Amparo, na região do Oeste de Minas Gerais, Brasil, nas coordenadas geográficas 21°00'58.9"S e 44°55'24.9"W, altitude de 950m.

Figura 1 – Localização geográfica da área de estudo. As áreas amostrais estão destacadas em linhas amarelas.



Fonte: O autor (2023).

A classificação climática da região é Cwa, subtropical úmido segundo classificação Köppen-Geiser, com verões quentes e úmidos e invernos frios e secos, com temperaturas média, mínima e máxima de 20°C, 14°C e 26°C. A precipitação total média é de 1400 mm e precipitação total anual média de 1670 mm.

2.2 Delineamento experimental

Foram utilizadas três áreas experimentais de plantio de café (*Coffea arabica* L.) com características distintas, abrangendo épocas de plantio e variedades específicas. As áreas foram designadas como Área de 1 ano, Área de 2 anos e Área de 8 anos, determinando a idade das plantas com base no intervalo entre o plantio e a ocorrência da geada. As variedades cultivadas foram: Catucaí Vermelho IAC 144, Catucaí, Catucaí e Arara, com um espaçamento de 0,5m entre plantas e 3,5m na entrelinha. Embora as variedades de cafeeiros avaliadas neste estudo demonstrem características adaptativas e algumas resistências, é importante observar que a efetiva resistência à geada pode variar entre as linhagens e depender de fatores específicos de cada cultivar, bem como das condições locais.

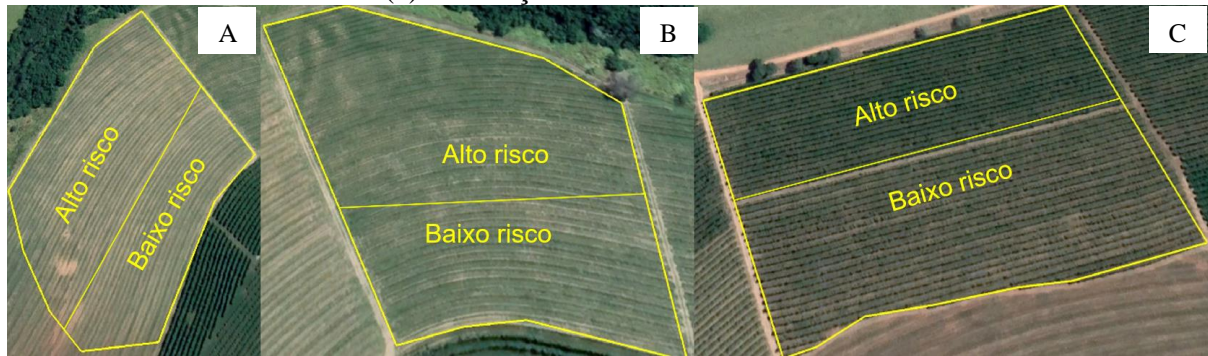
As características de cada área são as seguintes:

- Área de 1 ano: 31.966 m², elevação máxima de 947m, mínima de 929m, inclinação média de 10,7%, cultivada com cafeeiros da cultivar Catucaí e Arara;
- Área de 2 anos: 19.546 m², elevação máxima de 947m, mínima de 931m, inclinação média de 8,4%, cultivada com cafeeiros da cultivar Catucaí;

- Área de 8 anos: 35.176 m², elevação máxima de 942m, mínima de 925m, inclinação média de 8,5%, cultivada com cafeeiros da cultivar Catucaí vermelha IAC 144.

Na Figura 2 é possível observar uma ilustração das diferentes áreas de plantio, proporcionando uma melhor visualização das áreas experimentais.

Figura 2 – Áreas utilizadas no experimento com um ano de idade (a), dois anos de idade (b) e oito anos de idade (c) em função das zonas de risco climáticos.



Fonte: Google Earth (2023).

2.2.1 Classificação da área de risco de geada

Cada área foi subdividida com base na metodologia de Marin et al. (2021a) para classificar o grau de risco de danos nas plantas como baixo (B) ou alto (A). Essa classificação considerou critérios que avaliam a variação de altitude e topografia, levando em conta variações na inclinação do terreno e, principalmente a configuração do terreno. A designação de "Alto Risco" abrange a área de baixada, caracterizado por altitudes mais baixas, enquanto a classificação de "Baixo Risco" compreende a encosta do terreno. Essa categorização busca refletir a influência da topografia na exposição das áreas de riscos específicos à severidade de dano da geada.

2.3 Avaliação de danos

A geada ocorreu no dia 19 de julho de 2021, a temperatura mínima observada em termômetro localizado na área de estudo foi de -1,7°C. A avaliação visual de danos causados por geada em cafeeiros foi realizada de acordo com metodologia descrita por Soderholm e Gaskins (1960); Androcioli Filho et al. (1986) e Marin et al. (2021a). A metodologia consistiu na avaliação visual de três avaliadores independentes das três porções de cada planta (terço superior, médio e inferior), considerando folhas e ramos, atribuição de notas de 0 a 10 e obtenção de uma pontuação média em porcentagem para cada planta. Foram consideradas como

danos, as partes da planta que apresentaram coloração marrom e necrose (Figura 3), que são características físicas causadas pela morte da célula por congelamento.

Figura 3 – Coleta de dados em campo referente avaliação visual de danos causados por geada em plantios cafeeiros após a geada.



Fonte: O autor (2023).

Os valores médios obtidos por cada avaliador foram agrupados em classes de dano, as notas de um a dez correspondeu a porcentagem de 0 a 100% de danos conforme recomendações de Marin et al. (2019).

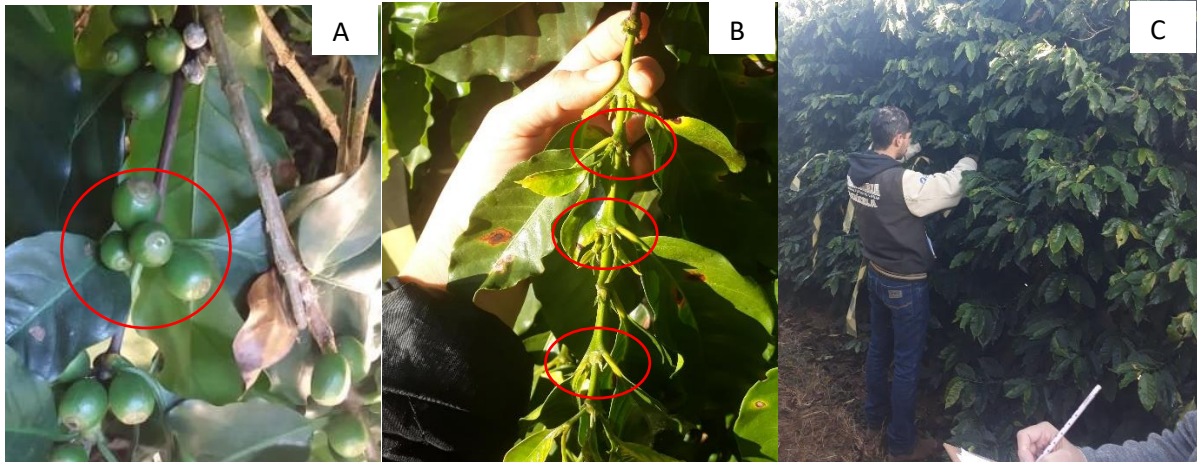
Para a avaliação, foram utilizadas 18 plantas em cada área de risco climático, distribuídas na área de produção, de modo a avaliar a distribuição espacial, totalizando 36 plantas por idade. Assim, resultou em 108 dados de plantas analisadas.

2.4 Avaliação de recuperação e crescimento vegetativo

Os cafeeiros foram avaliados por meio da mensuração das seguintes variáveis: número de folhas (NF), números de nós por ramo (NR), número de flores por ramos (NFL), número de frutos por ramos (NFR), e danos por geada (DG). Para as avaliações foram utilizadas trena e prancheta. Em cada planta de avaliação foram utilizados dois ramos (superior e inferior) do terço médio da planta para mensuração das variáveis. Todas as plantas foram georreferenciadas com auxílio do GPS. Na Figura 2 é possível observar as avaliações na área de estudo. A primeira avaliação foi realizada três dias após a geada (3 DAG), dia 22/07/2021. As demais avaliações foram realizadas durante o ciclo de produção de café, aproximadamente a cada três meses, sendo as seguintes datas: 22/07/21 (3 DAG), 29/10/21 (90 DAG), 04/03/22 (240 DAG), 25/06/22 (330 DAG) e 03/12/22 (510 DAG). Além disso, foi realizado a quantificação da produtividade. A avaliação foi realizada através da colheita do café, colhendo-se todos os frutos

das plantas de avaliação, quando as mesmas se encontravam em estágio de cereja. Após a colheita foi realizado a secagem, beneficiamento e os dados foram convertidos de Kg por planta para sacas ha^{-1} .

Figura 4 – Coleta de dados em campo referente ao número de frutos por ramo (a), número de nós por ramo (b) e número de folhas (c) dos plantios cafeeiros após a geadada.



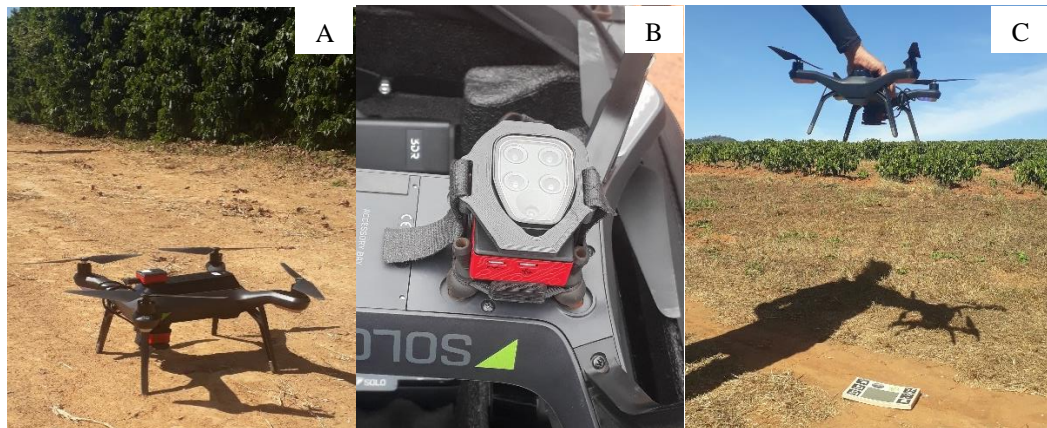
Fonte: Do autor (2023).

2.5 Obtenção de imagens aéreas e processamento de imagens

A primeira etapa foi gerar o banco de dados contendo imagens no formato digital. As imagens foram obtidas usando uma aeronave pilotada remotamente (RPA) e uma câmera multiespectral acoplada. A RPA utilizada foi a 3DR Solo comercial (3D Robotics, Berkeley, CA, EUA), com quatro motores (quadricóptero) (Figura 5a).

As imagens foram capturadas por câmera multiespectral Parrot Sequoia (Figura 5b) que possui um sensor RGB com Resolução de 16 megapixels (4608×3456) e quatro sensores extras com resolução de 1,5 megapixels (1280×960) nas bandas espectrais de verde de 550 nm BP (Band Pass) 40, vermelho (660 nm BP40), borda vermelha (735 nm BP 10) e infravermelho próximo (790 nm BP 40). Para eliminação dos efeitos de interferências da atmosfera, nos voos foram utilizados a placa de correção radiométrica (Figura 5c).

Figura 5 – a) RPA 3DR Solo, b) Câmera multiespectral Parrot Sequoia, C) Placa de correção radiométrica.



Fonte: Do autor (2021).

As imagens georreferenciadas foram processadas no software Pix4Dmapper, versão estudante (PIX4D, Lausanne, Suíça), com configurações dos parâmetros no nível mais elevado, onde as imagens foram unificadas, gerando os ortomosaicos para calcular os índices de vegetação. Este software foi desenvolvido especificamente para conjuntos de imagens e dados de levantamentos aéreos. O software Pix4D calcula as posições e orientações das imagens originais de forma automática através da Triangulação Aérea (AAT) e Ajustamento de feixes em Bloco (Bundle Block Adjustment, BBA).

Com base em nuvem de pontos 3D obtidos durante a AAT e BBA, é gerado um modelo digital de superfície (MDS) por meio da ligação destes pontos. O ortomosaico é criado a partir da projeção e combinação das imagens originais com o MDS (PIX4D, 2013). Foi utilizado o modelo padrão "Ag Multispectral" do para gerar o ortomosaico a partir de bandas espectrais individuais (verde, vermelho, red edge e infravermelho próximo). O painel de refletância calibrado corrigiu a refletância das imagens. Após a geração dos ortomosaicos, os índices de vegetação foram calculados no Qgis e exportados para a extensão TIFF para posterior análise. Considerando o desenvolvimento das plantas durante o período de recuperação, foram conduzidos sobrevoos na área a cada trimestre, totalizando 4 voos nas datas 22/07/21, 29/10/21, 04/03/22, 25/06/22. A sobreposição de imagens foi de 80%, altitude de voo de 30 m e velocidade 30 m/s. A sobreposição de imagens é o elo entre as várias fotos sequenciais feitas pela câmera na hora de produzir o mapa.

6.6 Índices de Vegetação

Os índices de vegetação foram escolhidos com base na pesquisa de Marin et al. (2021), o qual avaliou e identificou os índices com capacidade de avaliar a resposta espectral das plantas devido a danos causados pela geada (TABELA 1). Após o processamento dos ortomosaicos, as imagens foram cortadas apenas na área de interesse para aplicação de índices vegetativos.

Tabela 1 – Índices de vegetação calculados a partir da reflectância das bandas multiespectrais das imagens.

Índices de vegetação	Fórmulas	Referência
NDVI (normalized difference vegetation index)	$(\text{Nir} - \text{Red}) / (\text{Nir} + \text{Red})$	Rouse et al. (1974)
MTCI (meris terrestrial chlorophyll index)	$(\text{Nir} - \text{RedEdge}) / (\text{RedEdge} - \text{Red})$	Dash e Curran (2004)
MSR (modified simple ratio)	$((\text{Nir}/\text{Red}) - 1) / (\sqrt{((\text{Nir}/\text{Red})) + 1})$	Chen (1996)
MCARI1 (first modified chlorophyll absorption ratio index)	$1,2 (2,5 (\text{Nir} - \text{Red}) - 1,3 (\text{Nir} - \text{Green}))$	Haboudane et al. (2004)
MCARI2 (modified chlorophyll)	$1,5 (2,5 (\text{Nir} - \text{Red}) - 1,3 (\text{Nir} - \text{Green})) (\text{Nir} / \text{Red}) / \sqrt{(2\text{Nir}+1)^2 - (6\text{Nir} - 5\sqrt{\text{Red}})-0,5}$	Haboudane et al. (2004)
SAVI (soil adjusted difference vegetation index)	$(1 + 0,5) * ((\text{Nir} - \text{Red}) / (\text{Nir} + \text{Red} + 0,5))$	Huete (1988)
OSAVI (optimized SAVI)	$(\text{Nir} - \text{Red}) / (\text{Nir} + \text{Red} + 0,16)$	Rondeaux et al. (1996)
CIrededge (Chlorophyll IndexRedEdge)	$(\text{Nir} / \text{RedEdge}) - 1$	Ahamed et al. (2011)

Fonte: Do autor (2023).

Os índices de vegetação foram calculados com base na combinação de bandas espectrais das imagens processadas. Os índices de vegetação das imagens foram calculados usando a ferramenta Raster Calculator disponível no menu Raster do software QGIS 3.4.14-Madeira (QGIS Development Team, 2018). Após a elaboração dos índices de vegetação, foram criados *buffers* associados aos pontos amostrais georreferenciados dos dados coletados em campo. No software QGIS 3.4.14-Madeira (QGIS Development Team, 2018) foram extraídos os valores

médios dos *pixels* da imagem condizentes à cada planta individual utilizando a ferramenta Zonal Statistics, o valor médio extraído dos pixels foi no raio de 0,20 m, calculado a partir do centro de cada planta amostrada para comparar matematicamente os valores das imagens com os dados de danos coletados em campo. Os valores de pixel foram exportados em formato XLSX e analisado desempenho dos índices de vegetação na estimativa dos danos causada por geadas em cafeeiros.

2.7 Análises estatísticas

Os dados coletados foram tabulados na Software Excel (2013). Com o intuito de analisar e visualizar de maneira integrada os múltiplos conjuntos de dados, comparando padrões e tendências entre as variáveis, foram elaborados gráficos combinados (Suplementos) com as médias dos índices de vegetação e o número de folhas em cada área de plantio. Essa abordagem visa fornecer uma base sólida para a confecção de mapas de índice de vegetação que melhor evidenciam a recuperação das plantas.

Além disso, para avaliar as diferenças médias nos danos de geada em diferentes idades de plantio e zonas de risco climático, uma análise estatística fatorial 3x2 foi conduzida no programa SISVAR (FERREIRA, 2019). Esta análise, incorporou três níveis de idades de plantio e dois níveis de zonas de risco climático, a fim de compreender as influências conjuntas e interações entre esses fatores.

Afim de avaliar as características da recuperação das variáveis de número de folhas e nós por ramos, foi realizado ajustes de modelos regressão linear simples e quadrática, em que: $NF = \beta_0 + \beta_1 * x$; e $NR = \beta_0 + \beta_1 * x + \beta_2 * x^2$. Sendo NF – Número de folhas, NR – Número de ramos (nós), x – Datas de observações. Também foi calculado o coeficiente de determinação ajustado (R_{aju}^2) para verificar a adequabilidade dos modelos ajustados. Já para as variáveis número de frutos e número de flores foi construído gráficos boxplot para descrever seu comportamento.

A variável número de folhas foi submetida ao teste de normalidade Shapiro-Wilk, no ambiente de software R, com nível de significância $p = 0,05$. Em seguida foi calculada a correlação de ordem de classificação de Spearman (ρ) para avaliar a correlação entre o número de folhas e os índices de vegetação extraídos das imagens obtidas por RPA.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Danos por geada nos plantios de um ano, dois anos e oito anos de idade

Os resultados da análise fatorial para os dados de dano de geada (DG) nas idades de plantio e áreas de risco climático estão apresentados na Tabela 2. Os maiores danos foram observados nas áreas de alto risco climático para as plantas com um ano de idade, com valores próximos a 88% de dano. Já as plantas com dois e oito anos apresentaram valores de 50% e 39%, respectivamente. Para as áreas de baixo risco climático observou-se pouca variação nas diferentes idades, com valores próximos a 10%.

Tabela 2 – Dano por geada (DG) e desvio padrão (DP) em cafeeiros de um ano e dois anos em diferentes zonas de favorabilidade climática nas áreas de estudo.

Idade do Plantio	Zonas de favorabilidade climática			
	Baixo risco		Alto risco	
	DG (%)	DP	DG (%)	DP
Oito anos	4 A a	4	39 A b	11
Dois anos	12 B a	5	50 B b	9
Um ano	6 AB a	2	88 C b	8

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Fonte: Do autor (2023).

Com relação a dispersão dos dados, foi possível observar baixa dispersão dos dados em zonas de baixo risco climático para todas as idades de plantio, com valores próximos de zero. Nas zonas de alto risco, especificamente para o período de oito anos, o desvio padrão (DP) foi de 10, destacando-se como um valor superior em comparação com outras áreas. Isso mostra maior grau de dispersão de dados em relação à média nesta área. Os danos por geada podem ser intensificados em função de vários fatores, sendo que o estágio de desenvolvimento da planta e a configuração do relevo são determinantes na intensidade dos danos observados (Filho; Caramori, 2000; Marin et al., 2021a). Isso explica a diferença de grau de danos nos plantios em estudo.

Em análise comparativa das idades de plantio (Tabela 2), observa-se que os cafeeiros de oito anos apresentaram menor DG em ambas as zonas de risco. Na comparação entre as zonas de risco (Tabela 2), todas as três idades apresentaram um DG maior na zona de alto risco climático. O fato de que os cafeeiros de oito anos de idade têm um menor DG em ambas as zonas de risco sugere uma influência significativa da idade no vigor vegetativo e resistência estrutural da planta, que está relacionada a composição dos tecidos, quando comparado as

plantas mais jovens (TAIZ et al., 2017). Adicionalmente, a observação de um maior DG na zona de alto risco climático destaca a importância das condições climáticas favoráveis e a idade da planta na severidade dos danos causados pela geada nos cafeeiros.

Marin et al. (2021a), avaliaram danos causados por geadas em cafeeiros em diferentes favorabilidades climáticas e observaram diferenças significativas para danos por geada em cafeeiros entre zonas de risco climático. O maior valor de dano por geada foi observado em cafeeiros localizados na zona de alto risco climático para ocorrência de geadas. No estudo realizado por Li et al. (2021), que empregou o monitoramento por sensoriamento remoto para avaliar os danos causados por geadas em plantações de uva, observou-se que o grau de dano era relativamente severo em áreas de terreno baixo (áreas de baixada). Isso ocorre porque o ar frio, mais denso que o ar quente, desce e se acumula em vales ou áreas baixas, resultando em temperatura baixas o que resulta em danos foliares. Essa exposição prolongada ao ar frio é o que leva a danos significativos. A geada pode induzir perda significativa de pigmentos e água nas folhas, causando lesões estruturais e prejudicando a capacidade de captura de luz dos fotossistemas em nível celular (OKSANEN et al., 2005).

Em resumo, a análise destaca a relação entre a idade do plantio, as zonas de risco climático e os sintomas de danos foliares nas lavouras de café. O fato de que os cafeeiros de oito anos de idade apresentarem um menor DG em ambas as zonas de risco sugere uma influência significativa da idade na saúde e desenvolvimento das plantas. Adicionalmente, a observação de um maior DG na zona de alto risco climático destaca a importância das condições climáticas favoráveis e a idade da planta na severidade dos danos causados pela geada nos cafeeiros.

3.2 Análise de regressão

Observa-se na análise das Tabelas 3 e 4 as estimativas para os parâmetros dos modelos de regressão para descrição do número de folhas e nós, respectivamente, para as plantas de um, dois e oito anos localizadas na área de alto risco (A) e de baixo risco (B) e seus respectivos coeficientes de determinação ajustado (R_{aju}^2).

Tabela 3– Estimativas para os parâmetros dos modelos de regressão para descrição do número de folhas para as plantas localizadas na área de alto risco (A) e de baixo risco (B) e seus respectivos coeficientes de determinação ajustado (R_{aju}^2).

Parâmetro	Plantas de um ano		Plantas de dois anos		Plantas de oito anos	
	A	B	A	B	A	B
β_0	26,69	-1,57ns	21,27	3	16,9	6,48
β_1	-19,58	4,51	-14,07	2,92	-9,69	1,93
β_2	3,45	-	3,01	-	1,57	-
R_{aju}^2	0,81	0,61	0,65	0,52	0,15	0,15

ns: não significativo a 5%. Fonte: Do autor (2023).

Tabela 4– Estimativas para os parâmetros dos modelos de regressão para descrição do número de nós para as plantas localizadas na área de alto risco (HR) e de baixo risco (LR) e seus respectivos coeficientes de determinação ajustado (R_{aju}^2).

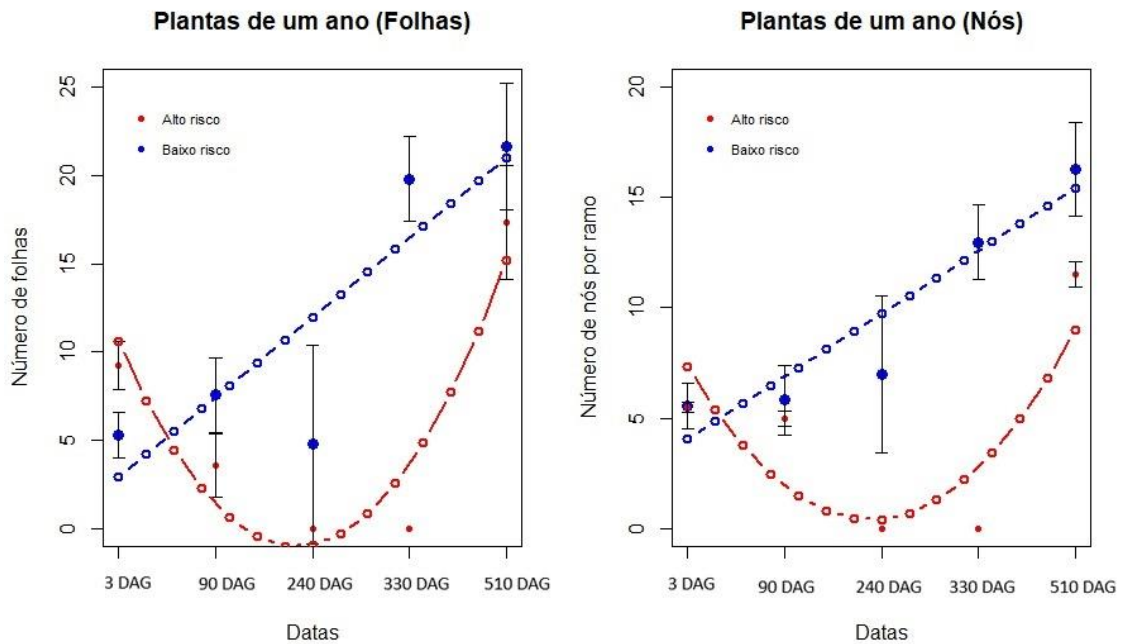
Parâmetro	Plantas de um ano		Plantas de dois anos		Plantas de oito anos	
	HR	LR	HR	LR	HR	LR
β_0	16,57	1,20 ^{ns}	18,72	9,57	22,8	3,94
β_1	-11,2	2,84	-10,67	1,7	-13,07	2,31
β_2	1,94	-	2,08	-	2,09	-
R_{aju}^2	0,6	0,69	0,72	0,34	0,35	0,47

ns: não significativo a 5%. Fonte: Do autor (2023).

Na Figura 4, são apresentados os valores ajustados das modelagens das análises de regressões para o número de folhas (NF) e o número de nós por ramos (NR) na área de um ano de idade durante o ciclo de produção. Foi possível observar uma resposta similar entre o número de folhas e número de nós ao longo do ciclo de produção em função da ocorrência da geada. Isso mostra que os danos ocorreram nas folhas e também nos ramos, reduzindo o número de nós.

Ao avaliar o NF para plantas de um ano nas áreas de alto e baixo risco (Figura 4), nota-se que três dias após a ocorrência das geadas plantas apresentavam ainda folhas e nós, sendo que as plantas na área de alto risco apresentavam valores superiores aos da área de baixo risco.

Figura 4 – Análise de regressão entre o número de folhas e número de nós durante o ciclo de produção do café para as áreas de alto e baixo risco climático em plantas de um ano de idade.



Fonte: Do autor (2023).

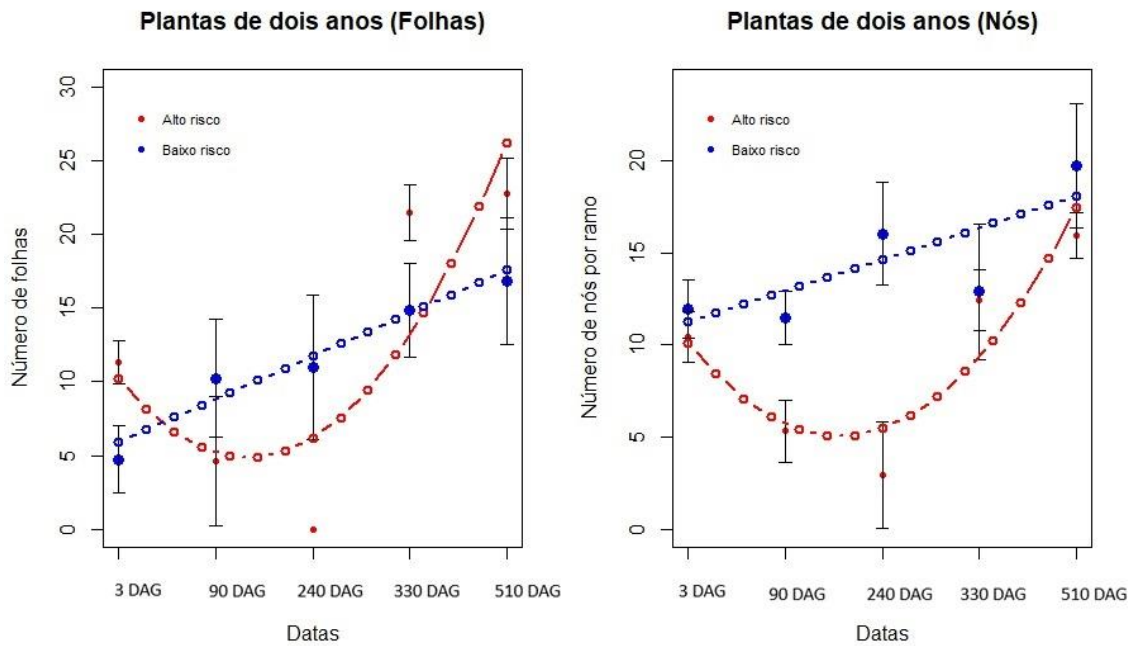
Após 90 dias, as plantas localizadas na área de alto risco apresentaram uma redução no número de folhas e nós, atingindo valores iguais a zero aos 240 dias após a ocorrência da geada, enquanto que a área de baixo risco aumentou linearmente o número de folhas e de nós durante todo o ciclo de produção até os 510 DAG. Essa resposta está associada aos danos observados nas plantas localizadas na área de alto risco climático os quais foram próximos de 80% (Tabela 2). As áreas de alto risco, caracterizadas pela localização em áreas de baixada, onde o ar frio se acumula, o grau de dano da geada é relativamente severo, porque o ar frio é mais pesado que o ar quente e há mais moléculas de água no ar frio, então quando o ar frio desce e se acumula em vales ou áreas baixas, a temperatura reduz drasticamente (LI et al., 2021).

Os resultados apresentados indicaram que a visualização dos reais danos proporcionados pela geada só foram possíveis de mensurar a partir de 90 dias após a ocorrência da geada, e 240 dias após o fenômeno foi possível contabilizar todos os danos, incluindo a senescência de todas as folhas danificadas e a morte dos ramos ou parte dos ramos danificados. Isso indica que a avaliação visual de danos por geada realizada logo após a ocorrência do fenômeno pode levar a falsos resultados, o que indica a necessidade de aguardar um período maior para visualização dos danos e análise da recuperação da planta.

Com relação a recuperação das plantas de um ano de idade nas diferentes áreas de risco climático, foi possível observar que após 330 DAG as plantas que tiveram danos significativos voltaram a emitir novas folhas, juntamente com o aumento do número de nós. Essa resposta ficou mais evidente aos 510 DAG, quando as plantas apresentaram um aumento significativo no número de folhas e nós, mas ainda abaixo das plantas que não sofreram com danos por geadas. Isso mostra o quanto a geadas pode prejudicar as plantas jovens e a necessidade de um tempo longo para recuperação das plantas, o que gera um prejuízo significativo ao produtor.

Para as plantas de dois anos (Figura 5), observa-se uma resposta semelhante aos resultados observados para as plantas de um ano. Para as plantas localizadas na área de baixo risco climático, observou-se uma resposta linear crescente no número de folhas e nós ao longo do ciclo de produção, demonstrando que a geadas não teve impacto significativo nestas plantas.

Figura 5 – Análise de regressão entre o número de folhas e número de nós durante o ciclo de produção do café para as áreas de alto e baixo risco climático em plantas de dois anos de idade.



Fonte: Do autor (2023).

Para as plantas cultivadas na área de alto risco climático observou-se impacto da geadas sobre as variáveis número de folhas e nós, sendo que 3 DAG não foram observadas variações nas áreas de alto e baixo risco climático, com valores muito próximos entre os tratamentos. Após os 90 DAG, as plantas localizadas na área de alto risco reduziram o número de folhas e nós, no entanto, a redução não foi tão drástica quanto as plantas de um ano de idade. A partir de 240 DAG já foi possível observar uma recuperação da planta, com um pequeno aumento do

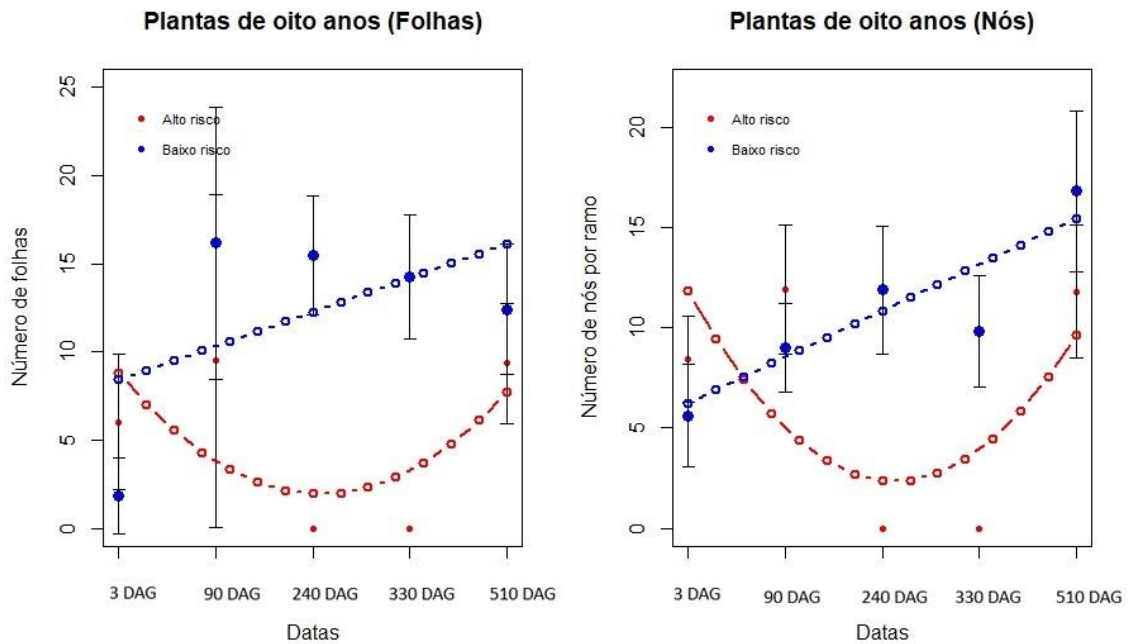
número de folhas e nós, o que se tornou mais evidente aos 330 DAG na qual as plantas que tiveram mais danos por geada igualaram em número de folhas às plantas que não tiveram dano. Ainda, aos 510 DAG as plantas localizadas na área de alto risco climático apresentaram valores superiores do número de folhas e o mesmo número de nós quando comparadas as plantas localizadas nas áreas de baixo risco.

Para o número de nós, apresentou uma queda para as plantas localizadas na área de alto risco, no entanto, há uma boa recuperação, sendo que aos 510 DAG o número de nós é praticamente igual em ambas as áreas. Foi verificado em campo a morte dos nós principalmente na extremidade do ramo, ao passo que os nós saudáveis estavam emitindo folhas novas. O que evidencia a resiliência e a capacidade de regeneração da planta de dois anos de idade. Isso sugere que, mesmo diante de condições adversas, estas plantas são capazes de se adaptar e recuperar, demonstrando uma resposta dinâmica ao ambiente, diferentes das plantas de um ano de idade.

Essas observações fornecem percepções valiosas sobre a fisiologia e a resiliência das plantas diante da geada, contribuindo para uma compreensão mais completa do impacto da geada nas plantas de dois anos nas áreas de alto e baixo risco. Essa capacidade de recuperação pode ser uma característica a ser considerado nas práticas agrícolas, destacando a importância da avaliação não apenas dos danos aparentes, mas também da capacidade de recuperação das plantas ao longo do tempo. Ainda, a própria composição estrutural das plantas é importante na capacidade de recuperação, pois está relacionado as reservas da planta. As reservas energéticas das plantas de um ano são baixas, o que gerou uma recuperação muito lenta, diferente do que ocorreu para as plantas de dois anos. A reserva energética das plantas de dois anos possibilitou a planta uma recuperação mais rápida, principalmente no sentido estrutural, como número de folhas e nós.

A Figura 6 apresenta os valores referentes à área de oito anos. De acordo com os resultados, observa-se que, nas áreas de baixo e alto risco climático, três dias após a geada, o número de folhas são diferentes, no entanto, com estimativas aproximadas uma vez que o modelo capta as observações de todas as avaliações e algumas apresentaram um grande desvio padrão das observações.

Figura 6 – Análise de regressão entre o número de folhas e número de nós durante o ciclo de produção do café para as áreas de alto e baixo risco climático em plantas de oito anos de idade.



Fonte: Do autor (2023).

A resposta das plantas de oito anos de idade à geada foi semelhante as plantas de um ano de idade, principalmente quando relacionado ao tempo de recuperação das plantas. Foi possível observar que as plantas que apresentaram danos por geada, zonas de alto risco climático, apresentaram uma redução no número de folhas e nós até os 240 DAG. Após esse período, as plantas voltaram a emitir novas folhas e nós apresentando uma recuperação nos valores aos 510 DAG, no entanto, os resultados ficaram bem abaixo daqueles observados para as plantas que não tiveram dano por geada. Esse resultado mostra que os impactos da geada em plantas adultas podem perdurar por um longo período, e isso, pode estar associado a dificuldade da planta em direcionar as reservas para a emissão de novas folhas e ramos.

Esses resultados indicam que, após os danos causados pela geada, a planta perde suas folhas e leva aproximadamente doze meses para iniciar um processo de recuperação. Esse padrão de resposta ressalta a impactante influência da geada na área de oito anos e destaca o tempo necessário para que a planta se recupere e retome seu desenvolvimento. Além disso, a área com plantas de oito anos sofreu danos menores de geada em comparação com as áreas de um e dois anos. No entanto, foi a que enfrentou maiores desafios na recuperação dos danos causados pela geada.

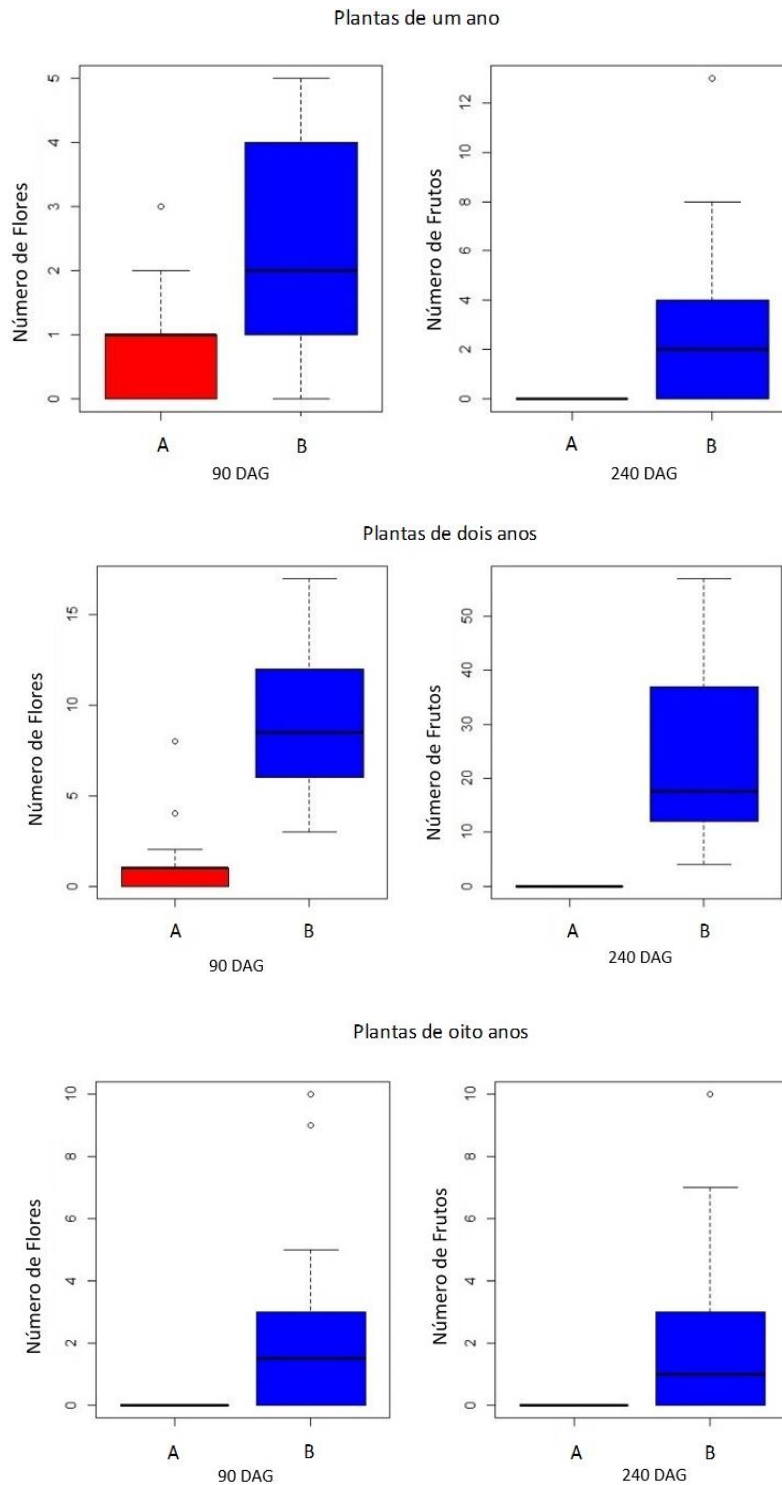
Os resultados revelam uma notável variação na velocidade de recuperação das plantas após a geada, entre as áreas de um, dois e oito anos. Embora as plantas de um e oito anos tenham iniciado o processo de recuperação em um período semelhante, suas respostas foram distintas em termos de capacidade de emitir folhas. Na área de dois anos, destaca-se uma recuperação expressiva, evidenciada pela capacidade de emitir um elevado número de folhas em comparação à primeira avaliação pós-geada. Este resultado sugere maior vigor, reserva energética indicando uma resposta mais rápida à adversidade climática e capacidade de recuperação.

Em contraste, a área de oito anos, apesar de retornar à emissão de folhas, apresentou um número abaixo do considerado adequado para a cultura. Isso pode indicar uma menor capacidade de recuperação ou uma resposta mais gradual a eventos extremos, refletindo talvez uma maior maturidade e adaptação a condições específicas. A área de dois anos se destaca como tendo a maior capacidade de recuperação entre as três. Essa habilidade de se recuperar, superando os cafeeiros mais jovens e os mais antigos, em termos de número de folhas emitidas, ressalta uma resposta robusta e eficiente diante dos danos causados pela geada. Essas observações enfatizam a complexidade das respostas das plantas a eventos climáticos adversos e sugerem que a idade das plantas desempenha um papel crucial na capacidade de recuperação de uma planta após a geada.

A Figura 7 representa o boxplot dos dados do número de flores e frutos das plantas de café com um ano, dois anos e oito anos de idade nas diferentes zonas de risco climático ao longo do ciclo de produção. A quantificação de flores e frutos foi realizada aos 90 DAG e aos 240 DAG. Foi possível observar uma grande variação no número de flores e frutos nas diferentes idades e áreas de risco climático. Para a avaliação de 90 DAG observou-se uma pequena quantidade de flores para as plantas de um e oito anos e uma quantidade significativa de flores para as plantas de dois anos, principalmente na área de baixo risco climático.

Com relação aos dados de 240 DAG, época de frutificação, observa-se que apenas as plantas localizadas na área de baixo risco exibiram um número de frutos diferente de zero. Para as plantas de um e dois anos apesar de ambas as áreas de risco emitirem flores, apenas os cafeeiros na área de baixo risco frutificaram. Adicional a isso, as plantas de dois anos foram as que mais apresentaram flores e frutos (Figura 7). Essas observações sugere uma notável capacidade de florescimento e frutificação nas plantas de dois anos, relacionado principalmente a capacidade de recuperação das plantas aos danos de geada.

Figura 7 – Boxplot para o baixo risco (B) e alto risco (A), para avaliar o número de flores e frutos para plantas de um ano, dois anos e oito anos.



Fonte: Do autor (2023).

Além disso, mostra a disparidade na capacidade de frutificação entre as áreas de alto e baixo risco climático, sugerindo possíveis impactos diferenciados da geada nesse aspecto específico do desenvolvimento das plantas. No caso das plantas de oito anos, foi observada a

produção de flores e frutos (Figura 8) apenas na área de baixo risco, embora em quantidades quase inexistentes. Cabe destacar, que os frutos gerados pelas plantas de oito anos apresentavam coloração escura e má formação, possível resultado dos efeitos da geada (Figura 8a), o que comprometeu a produtividade do café não sendo possível a realização da colheita.

Figura 8 – Danos por geada na cultura do café, visível pela necrose e morte de frutos nos ramos (a), senescência e queda das folhas do terço superior da planta de 8 anos (b) e planta de um ano em fase de recuperação após a ocorrência da geada (c).



Fonte: Do autor (2023).

As plantas localizadas em zonas de alto risco tendem a ficar em contato prolongado com a massa de ar frio resultante da geada. Quando essa massa fria passa pelo ápice dos ramos e permanece ali por algumas horas, ocorre desidratação, queima e, conseqüentemente, a morte da gema apical, resultando na quebra da dominância apical. A dominância apical refere-se ao mecanismo inibitório da gema apical sobre as gemas axilares nos nós mais internos do ramo, inibindo o desenvolvimento de ramificações secundárias (TAIZ et al., 2017). A perda da dominância apical estimula as gemas vegetativas, presentes na porção do ramo que cresceu na estação anterior, a saírem da dormência e a produzirem várias brotações nesse nó (ALVES et al., 2021). No caso da geada ocorrida no mês de julho de 2021, quando essas brotações estavam crescendo e as gemas reprodutivas já estavam presentes nos nós da planta, os danos causados pela geada podem ter afetado essas gemas, tornando-as inviáveis e impedindo seu desenvolvimento para a floração no ano seguinte.

Nesse sentido, o efeito direto da massa de ar frio que permaneceu por algumas horas sobre as gemas reprodutivas presentes no ramo, o que provocou uma forte desidratação e morte dessas gemas e, da mesma forma, interrompeu sua capacidade reprodutiva. Além disso o frio causa deformação nas folhas jovens que se apresentam com as bordas onduladas e de coloração

amarelo-escuro. E no futuro, além de terem sua capacidade fotossintética comprometida, irão prejudicar o crescimento dos ramos e a formação de nós disponíveis para a produção de frutos (ALVES et al., 2021).

Em um contexto geral, observou-se que as plantas de oito anos enfrentaram uma recuperação mais lenta, resultando na ausência de flores e frutos, e conseqüentemente não apresentou produtividade. Já as plantas de um ano, embora tenham se recuperado, não produziram frutos, apesar da presença de flores (área de alto risco). Para as plantas de dois anos na área de baixo risco climático, observou-se a presença de flores e frutos o que resultou em uma produtividade média de 6,3 sacas ha⁻¹ de café beneficiado. Esses padrões de resposta indicam o impacto da geada sobre a dinâmica de crescimento e produção das plantas, destacando a necessidade de medidas adaptativas para mitigar os efeitos adversos e promover a recuperação das plantas.

3.2 Correlação dos índices de vegetação e número de folhas

Como o número de folhas nas plantas avaliadas, pelo teste de Shapiro-Wilk, ao nível de 5% de significância, não seguem distribuição normal, então para avaliar o relacionamento delas com os índices de vegetação, considerou-se a Correlação de Spearman ($\hat{\rho}_s$). A Tabela 5, apresenta correlação de Spearman ($\hat{\rho}_s$) entre as variáveis número de folhas (NF) e com índices de vegetação (IVS) nos plantios de um ano, dois anos e oito anos, considerando as áreas de localização de alto e baixo risco climático.

Na área de oito anos, observou-se as piores correlações dos índices de vegetação com o NF sendo que, apenas os índices NDVI e MSR que apresentaram correlação ($> 0,5$), e apenas na área de baixo risco (Tabela 5). Essa resposta pode estar relacionada a recuperação mais lenta das plantas, quando comparado as demais idades avaliadas.

Com relação a análise do índice CIrededge revelou resultados distintos quando correlacionado com o número de folhas em áreas de baixo e alto risco para plantas de um ano e dois anos de idade, conforme apresentado na Tabela 5. O índice CIrededge revelou uma correlação negativa na área de baixo risco e positiva na área de alto risco com o número de folhas, destacando sua sensibilidade a respostas espectrais associadas a estresse ou condições específicas nas quais o número de folhas é reduzido.

Tabela 5 – Correlação de Spearman ($\hat{\rho}_s$) entre o número de folhas (NF) e índices de vegetação (IV) nos plantios de um ano, dois anos e oito anos, nas áreas de alto e baixo risco.

IV	Plantas de um ano		Plantas de dois anos		Plantas de oito anos	
	Baixo Risco	Alto Risco	Baixo Risco	Alto Risco	Baixo Risco	Alto Risco
	NF		NF		NF	
NDVI	0,51	-0,43	0,55	-0,82	0,54	0,09 ^{ns}
MCARI1	0,54	-0,21 ^{ns}	0,19 ^{ns}	-0,52	0,05 ^{ns}	-0,10 ^{ns}
MCARI2	0,51	-0,49	0,51	-0,84	0,15 ^{ns}	-0,18 ^{ns}
MSR	0,52	-0,71	0,49	-0,86	0,54	0,09 ^{ns}
MTCI	-0,15 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,11 ^{ns}	-0,51	-0,41	0,09 ^{ns}
OSAVI	0,51	-0,51	0,46	-0,84	0,15 ^{ns}	-0,24
SAVI	0,52	-0,44	0,03 ^{ns}	-0,49	0,11 ^{ns}	-0,18 ^{ns}
CIrededge	-0,59	0,54	-0,43	0,37	-0,10 ^{ns}	0,01 ^{ns}

^{ns}não significativo a 5%. Fonte: Do autor (2023).

Em estudos, Cunha (2021), verificou que cafeeiros jovens medianamente danificados respondem como cafeeiros adultos severamente danificados e cafeeiros jovens severamente danificados podem responder como solo exposto. Isso pode explicar a menor correlação entre os índices e o número de folhas na zona de alto risco climático.

O índice CIrededge utiliza as bandas do infravermelho próximo, a qual é sensível à quantidade total de biomassa nas plantas (AHAMED et al., 2011), e a banda do rededge que é sensível às mudanças na concentração de clorofila nas folhas. As plantas da área de alto risco sofreram maior impacto dos danos da geada e por conseguinte apresentaram menor biomassa. E as plantas em condições de estresse tendem a ter menor concentração de clorofila nas folhas (ZHAO et al., 2003; BRATASEVEC et al., 2013 e MARIN et al., 2019). Portanto, a relação NIR e RedEdge é sensível em plantas com um menor número de folhas devido às mudanças associadas à quantidade de biomassa, estrutura foliar e atividade fotossintética, todas as quais afetam a reflectância nessas regiões espectrais.

Esse resultado ressalta a importância do CIrededge como uma métrica promissora para avaliar a quantidade de folhas em plantas de um ano em condições de alto risco, enquanto outros índices podem ser mais indicados para áreas de baixo risco. Em estudos de Chemura et al. (2018), obteve resultados promissores de índices multiespectrais de clorofila em cafeeiros.

As correlações negativas entre os índices de vegetação e o número de folhas, podem estar associados ao vigor vegetativo das plantas que sofreram com maior porcentagem de danos de geada. As plantas em condições de estresse reduzem a concentração de clorofila nas folhas,

apresentam clorose e, conseqüentemente, diminuem a absorção de luz incidente na região espectral do visível (CARTER; KNAPP, 2001; ZHAO et al., 2003; BRATASEVEC et al., 2013). Segundo Ahamed et al. (2011), a quantidade de folhas está diretamente relacionada a reflectância das bandas do visível e infravermelho próximo.

É relevante notar que o índice MTCI mostrou-se menos indicado para investigar a correlação com o número de folhas, especialmente em plantas de um ano. Em comparação com outros índices, o MTCI pode não ser tão sensível ou preciso para capturar variações no número de folhas nessas condições específicas. No contexto de baixo risco, os índices NDVI, MCARI1, MCARI2, MSR, SAVI e OSAVI exibiram correlações positivas com o número de folhas para plantas de um ano (Tabela 5).

O SAVI é uma modificação do índice NDVI (HUETE, 1996). Devido a fator de correção do brilho do solo, o índice SAVI melhora ainda mais o resultado final para a influência do brilho do solo (JEŁOWICKI et al., 2020). Por esse motivo, é utilizado em situações em que grande parte da lavoura não é coberta por vegetação exuberante. Portanto, o SAVI pode ser um índice bom para examinar condição de plantios cafeeiros de um ano de idade. No geral, os resultados destacam a importância de considerar diferentes índices e contextos de risco ao estudar a correlação com o número de folhas em plantas de menor porte.

Os índices MSR, MCARI, MCARI2 e OSAVI são utilizados para estimar o conteúdo de clorofila no dossel vegetal, aproveitando os picos de reflectância das clorofilas nas faixas vermelhas do espectro eletromagnético (WU et al., 2008). Em situações de estresse ou senescência, a redução no conteúdo de clorofila e água leva a alterações na reflectância na banda do vermelho (ROCK et al., 1988; MAIN et al., 2011). Observações de Wang et al. (2020) indicam que danos causados pela geada resultam em valores reduzidos nos índices de vegetação, devido à decomposição dos pigmentos e à diminuição significativa do conteúdo de clorofila nas folhas. Essa mudança no conteúdo de clorofila aumenta levemente a reflexão nos comprimentos de onda vermelhos e diminui a reflexão nos comprimentos de onda verdes, evidenciando variações perceptíveis nos índices de vegetação calculados.

Estudando a correlação entre índices de vegetação e variáveis bióticas e abióticas em cafeeiro, Marin et al. (2019) verificaram que valores dos índices de vegetação tendem a diminuir em plantas com menor vigor vegetativo, pois esses são calculados a partir das diferenças de reflectância entre a banda do infravermelho próximo e as bandas do visível e do infravermelho médio dessa forma, reduzido os valores dos índices de vegetação.

Na área de plantas com dois anos de idade (Tabela 5), observou-se que os índices de vegetação apresentaram uma correlação mais significativa com o número de folhas apenas na área de baixo risco. Entre esses índices, o NDVI, MCARI1, MSR e OSAVI destacaram-se como os mais correlacionados com a variável NF. Em estudos de Barata et al. (2023), constataram alta correlação do NDVI com parâmetros biofísicos de cafeeiros.

O NDVI, que é amplamente utilizado na avaliação da saúde vegetal, mostrou uma correlação positiva de 55% com o número de folhas. Essa relação sugere que, em áreas de baixo risco, o NDVI pode ser um indicador confiável do monitoramento foliar em plantas de dois anos. Da mesma forma, os índices MCARI2, MSR e OSAVI também apresentaram as respectivas correlações positivas de 51%, 49% e 46%, indicando que essas métricas de vegetação estão sensíveis às variações no número de folhas em condições de baixo risco. . No entanto, ao contrário da observação na área de um ano de idade em que o índice CIrededge (Tabela 5) se destacou na área de alto risco, neste caso, este índice não se mostrou informativo na área de baixo risco para plantas de dois anos.

Essas descobertas ressaltam a importância de adaptar a escolha dos índices de vegetação de acordo com o contexto específico do estudo, considerando não apenas a idade das plantas, mas também o nível de dano associado as áreas de risco em função da topografia. Essa abordagem integrada pode proporcionar informações mais precisas sobre o estado de recuperação e desenvolvimento das plantas em diferentes condições ambientais após a ocorrência das geadas.

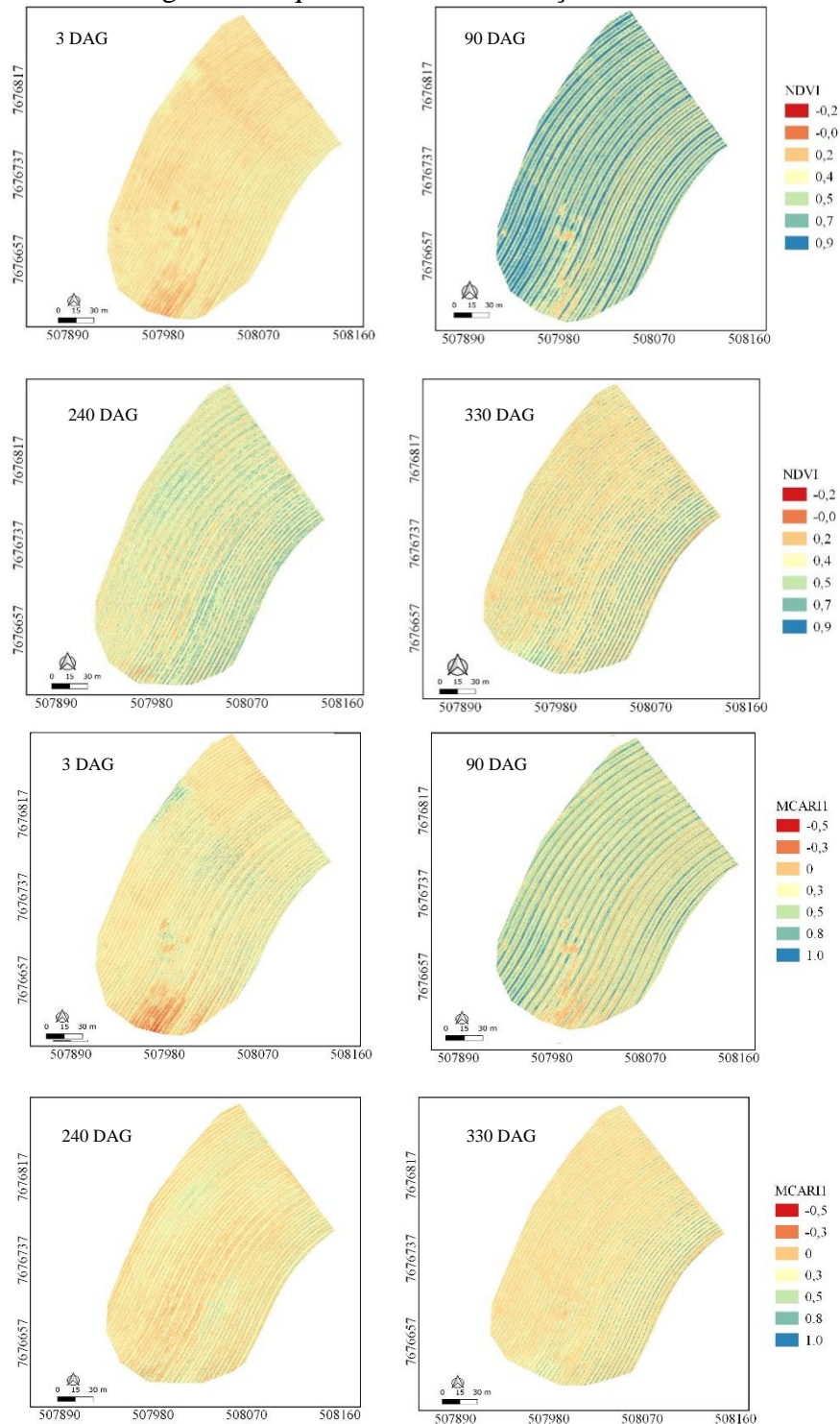
3.3 Mapas de índices de vegetação em função da ocorrência da geada

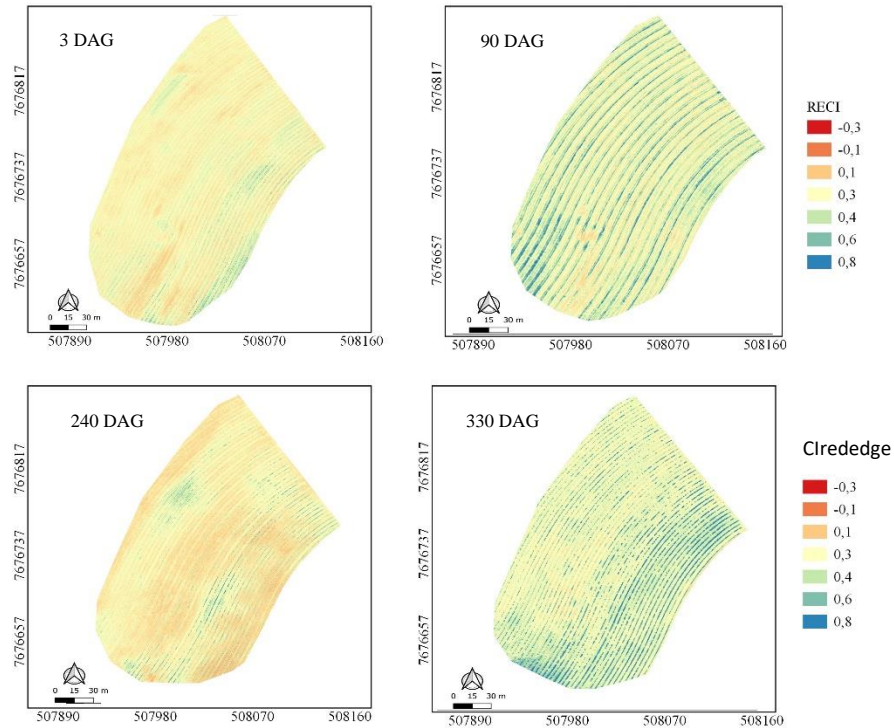
Com base nos resultados da correlação de Spearman, foram escolhidos os índices de vegetação que apresentaram correlações superiores ou iguais a 50% para uma análise temporal considerando os danos por geada e os índices de vegetação. Em seguida, foram desenvolvidos gráficos combinados para analisar a relação entre as médias dos índices de vegetação e o número de folhas, conforme apresentado nos materiais suplementares (Figuras 13, 14 e 15). Com base nesses resultados, foram desenvolvidos mapas de índices de vegetação para cada área de estudo.

Os mapas de índices de vegetação foram gerados para visualização da recuperação das plantas após a geada. Na Figura 9 estão apresentados os mapas dos índices de vegetação NDVI, MCARI1 e CIrededge na área de um ano de idade. As discrepâncias nos valores desses índices

ao longo das linhas de plantio entre as datas evidenciam o processo de recuperação das plantas após a geada. É relevante destacar que, na data correspondente à 90 DAG marca o início do período das chuvas na região, e ainda não havia sido realizado o processo de capina nas entrelinhas, fator que influencia os resultados de vigor vegetativo obtidos.

Figura 9 – Mapas de índice vegetativo em área com lavoura de café com um ano de idade após a ocorrência de geada em quatro datas de avaliação.

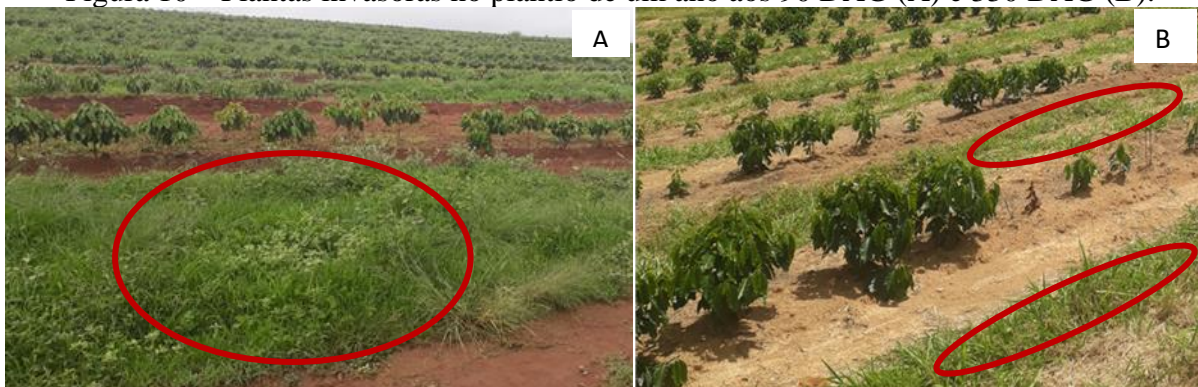




Fonte: Do autor (2023).

Nos mapas de NDVI (Figura 9) observa-se de maneira evidente a variação no vigor vegetativo entre as datas de avaliação, destacando a sensibilidade do índice na avaliação imediatamente após a geada. Nesse período, o mapa revela um baixo vigor vegetativo. Nas datas 90 e 240 DAG, as linhas de plantio e a presença de plantas invasoras se destacam (Figura 10), com uma menor presença de cafeeiros nas linhas em comparação com a primeira avaliação. Por outro lado, no mapa de 4, observa-se uma notável recuperação das plantas, especialmente na zona de baixo risco climático.

Figura 10 – Plantas invasoras no plantio de um ano aos 90 DAG (A) e 330 DAG (B).



Fonte: Do autor (2023).

De fato, o NDVI demonstra ser mais sensível a danos causados por geadas em comparação com outros índices, apresentando uma queda mais acentuada em seus valores após

o dano (GABRIELLI et al., 2022). Esses índices têm sido amplamente utilizados como ferramentas importantes para o monitoramento da vegetação, tanto como um indicador diagnóstico de desenvolvimento fenológico e saúde da planta (ALLEVATO et al., 2019).

Na Figura 9, é possível observar, por meio do mapa do índice de vegetação MCARI1, valores de vigor vegetativo relativamente baixos imediatamente após a ocorrência da geada. Esses valores apresentam um aumento durante o período de chuvas, atribuído à presença de plantas daninhas na entrelinha. O vigor, então, volta a diminuir na terceira visita, mas demonstra uma leve elevação na quarta visita. Notavelmente, nesta última visita, é perceptível a recuperação das plantas, especialmente na zona de baixo risco climático.

Após o congelamento das folhas pela geada, as alterações na refletância espectral são principalmente atribuídas à variação no teor de água da folha, bem como às mudanças subsequentes no conteúdo de pigmentos e na estrutura celular (WEI et al., 2017). Essa explicação destaca a complexidade das respostas do dossel a eventos como a geada. A destruição da estrutura tecidual das folhas do dossel é apontada como uma causa de variação na refletância de comprimentos de onda (WU et al., 2021).

Os índices de vegetação respondem de maneira distinta em cada área de plantio. Segundo Freitas et al. (2023), características genéticas, como as associadas a cultivares de porte reduzido, com altura e diâmetro de copa em torno de 2,0 m e 1,8 m, manifestam valores mais baixos de refletância e, por conseguinte, apresentam máxima absorção no espectro visível. Em resumo, as características genéticas intrínsecas de cada planta, sua resposta ao estresse e a arquitetura da copa influenciam diretamente a refletância e absorção da radiação eletromagnética.

Em comparação com outros índices vegetativos (Figura 9), os mapas de MCARI1 destacam-se ao mostrar uma vegetação mais pronunciada em relação ao solo. O MCARI1 utiliza bandas do espectro visível e infravermelho próximo. Índices que fazem uso da banda verde têm sido empregados em estudos para estimar a biomassa em diversas culturas (BARATA et al., 2023).

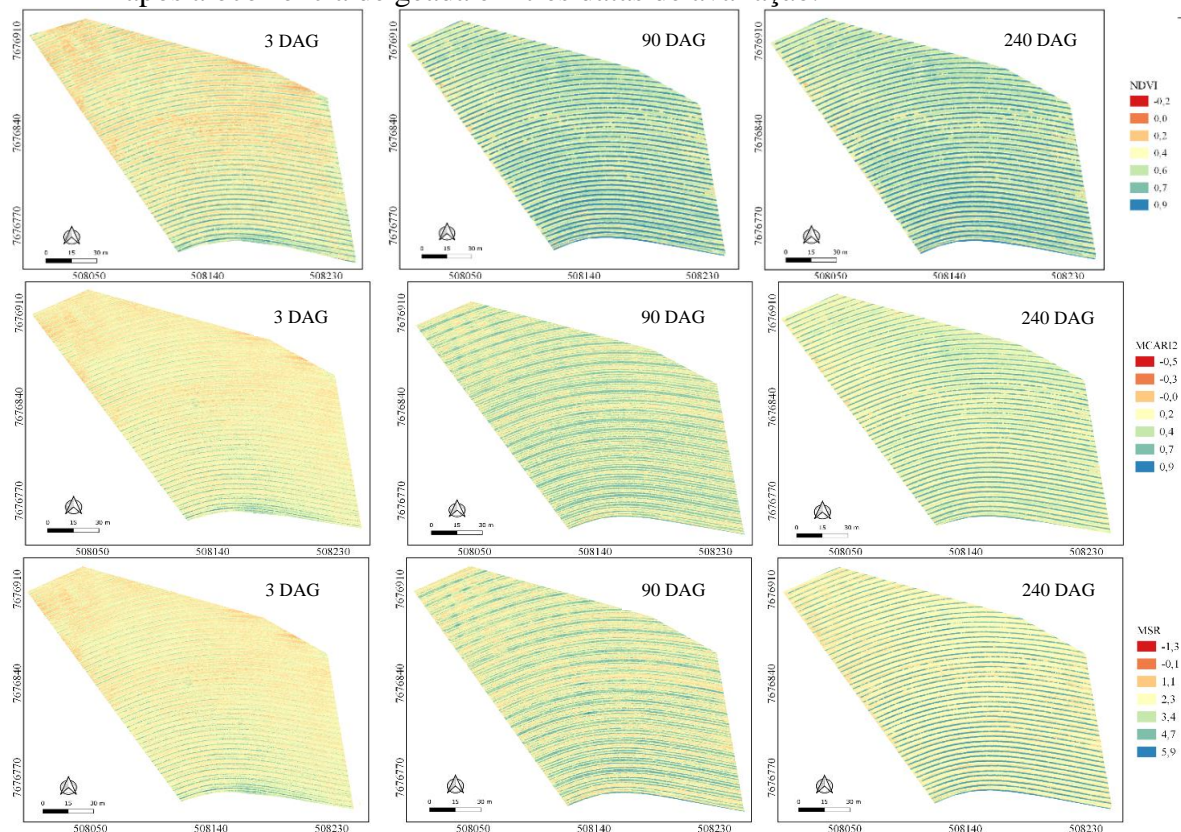
Comprimentos de onda na faixa espectral visível (400–740 nm) são absorvidos por pigmentos fotossintéticos (PONZONI et al., 2012), sendo o pico verde uma característica que distingue o solo das plantas. O solo possui refletância na região do infravermelho próximo, mas em quantidades muito menores em comparação com a refletância das plantas (AHAMED et al., 2011). O vigor vegetativo das plantas influencia diretamente o espectro de reflexão na região

visível. Cafeeiros com vigor vegetativo superior, especialmente após situações estressantes, tendem a ser mais produtivos.

Os mapas do índice vegetativo Cirededge (Figura 9) destacam com menor clareza a recuperação das plantas ao longo de um ano nas datas de avaliação. Este índice parece ser mais sensível em períodos nos quais o cafeeiro apresentava maior número de folhas. O Cirededge utiliza as bandas do infravermelho próximo e da borda vermelha (red edge). Sendo um índice de detecção de clorofila, ele demonstra menor sensibilidade em plantações com menor folhagem. Assim, conseguiu evidenciar com eficiência as linhas de plantio nas datas em que o cultivo estava em processo de recuperação e com a presença de plantas daninhas.

Na Figura 11, encontram-se os mapas de NDVI, MCARI2 e MSR no plantio de dois anos de idade. Ocorreu uma falha inesperada na câmera multiespectral, afetando sua capacidade de registrar dados multiespectrais de maneira precisa e confiável para o quarto voo.

Figura 11 – Mapas de índice vegetativo em área com lavoura de café com dois anos de idade após a ocorrência de geada em três datas de avaliação.



Fonte: Do autor (2023).

A integridade e validade dos resultados não foram comprometidas, uma vez que as informações provenientes dos voos anteriores são representativas da condição geral da área de estudo, além dos dados coletados em campo. Os índices MCARI2 e MSR (Figura 11)

demonstraram sensibilidade à variação no número de folhas, evidenciada pelos mapas que destacam claramente as diferenças entre as diferentes datas de avaliação.

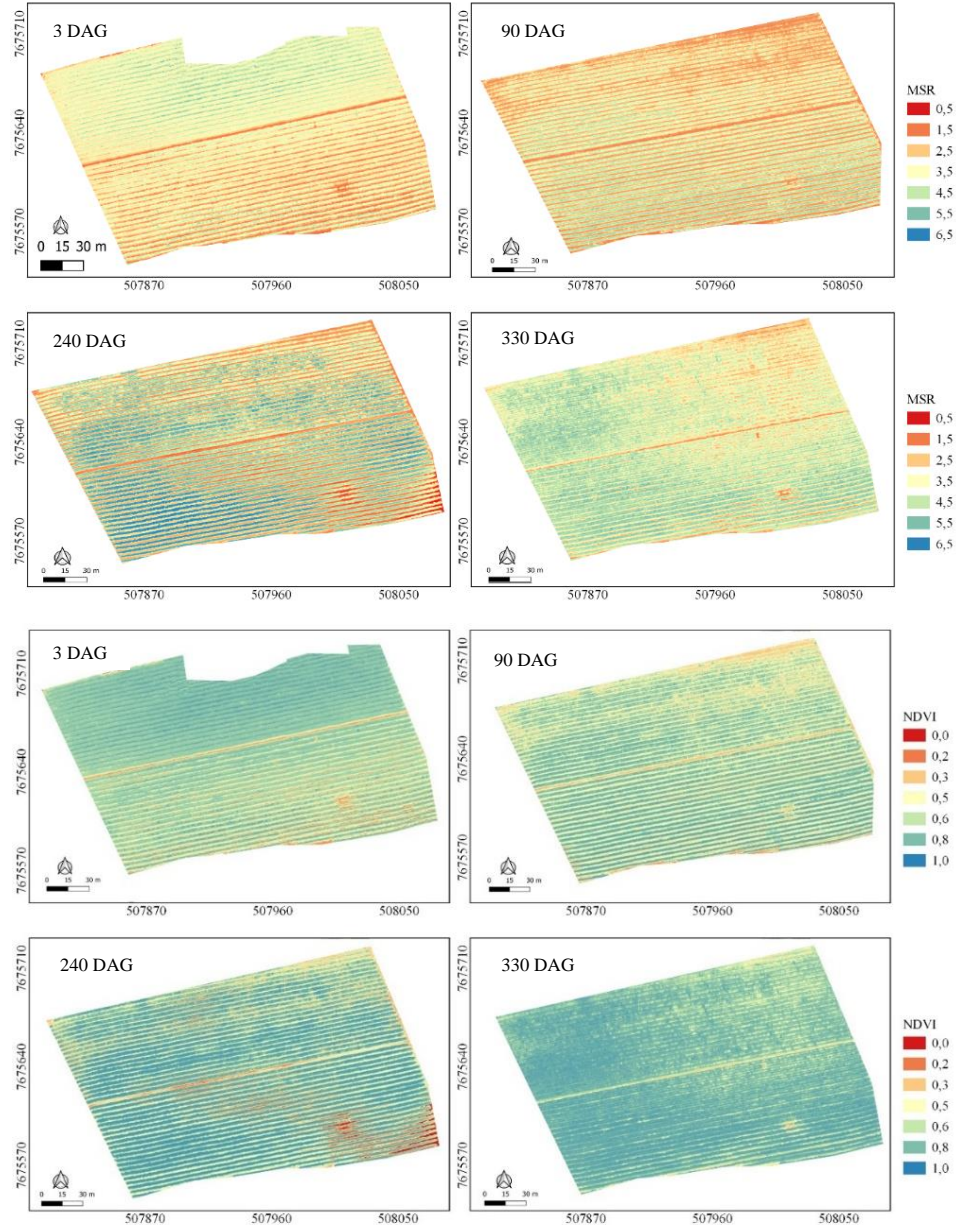
O NDVI revelou ser mais sensível ao evidenciar as diferenças entre as plantas afetadas pelas zonas de alto e baixo risco logo após a geada. Após a geada a refletância na região NIR é reduzida, provavelmente devido à combinação de mudanças na concentração de pigmento e teor de água (DUDDU et al., 2018). Entretanto, 90 DAG e 240 DAG, quando o plantio já apresentava maior folhagem, o NDVI demonstrou uma menor sensibilidade em destacar a recuperação das plantas ao longo do tempo.

O MCARI2 é uma versão do MCARI1, ambos foram desenvolvidos para identificar área foliar fotossinteticamente ativa. Mas no MCARI2 foi inserido um fator de ajuste do solo desenvolvido para otimizar a sensibilidade ao índice de área foliar verde (HABOUDANE et al., 2004). Em estudos, Robertson (2013), concluiu que estudos futuros que examinem vários índices na estimativa de características biofísicas só precisam examinar o MCARI2.

No plantio de oito anos (Figura 12), o padrão espacial do MSR demonstrou consistência com os resultados observados na recuperação pós-geada. Os índices de vegetação diminuíram após a geada e voltaram a aumentar aos 330 DAG, especialmente na área de baixo risco climático.

Na Figura 12, representada pelo mapa MSR, observa-se que imediatamente após a geada, a área de alto risco exibiu maior vigor vegetativo, sendo equivalente aos dados de NF e NR coletados em campo. No entanto, durante a segunda visita (90 DAG), é evidente o declínio do vigor vegetativo em ambas as áreas de risco climático. A partir de 240 DAG e 330 DAG, as plantas iniciaram uma recuperação, manifestando variabilidade na recuperação ao longo do espaço. É relevante ressaltar que esta área já havia experimentado uma geada em 2019, o que significa que já passou por condições de estresse e recuperação ao longo dos últimos anos. Embora seja possível que os danos foliares às plantas examinadas neste estudo tenham contribuído para a redução dos índices de vegetação devido à diminuição da fotossíntese, é notório que a mortalidade das folhas desempenhou um papel significativo nesse declínio (Figura 12).

Figura 12 – Mapas de índice vegetativo MSR e NDVI em área com lavoura de café com oito anos de idade nas quatro datas de avaliação após a ocorrência de geadas.



Fonte: Do autor (2023).

Os mapas de NDVI (Figura 12), revelam um padrão de recuperação semelhante ao observado nos mapas do MSR (Figura 12). Em estudos de monitoramento da variação espacial e temporal de culturas de cobertura após a geadas, Gabrielli et al. (2022), também verificaram que o MSR foi eficiente no monitoramento de plantas com danos causados por geadas. Isso destaca a eficácia desses índices no monitoramento da recuperação dos cafeeiros de oito anos de idade. A literatura destaca que o NDVI é particularmente sensível a danos causados por

geadas, apresentando uma queda mais pronunciada em seus valores após o evento da geada (RUDORFF et al., 2012; BAO et al., 2017; FENG et al., 2009).

A fórmula de cálculo do NDVI e MSR utiliza diferentes regiões do espectro eletromagnético, notadamente no infravermelho próximo e no vermelho. Essa abordagem permite a medição da absorção da luz vermelha pela clorofila presente nas plantas, assim como a reflexão da radiação infravermelha pelas células que contêm água (AHAMED et al., 2011). Dessa maneira, a fenologia, que engloba eventos como a queda de folhas nas plantas de café e danos foliares, se revela como um fator de grande importância que influencia diretamente o NDVI e MSR.

Na faixa do infravermelho próximo, a refletância é alta e aumenta com o aumento do número de folhas devido a múltiplas reflexões da radiação incidente nos espaços intracelulares do mesófilo foliar (PONZONI et al., 2012). Considerando que o plantio de oito anos é mais enfolhado e os índices MSR e NDVI utilizam as bandas do espectro visível vermelho e infravermelho próximo, isso explica a melhor eficiência desses índices em demonstrar a variabilidade do vigor vegetativo ao longo das avaliações.

Estudos anteriores sobre culturas anuais identificaram o NDVI como um indicador valioso para avaliar danos causados por geadas. Trabalhos conduzidos por Duddu et al. (2018) e She et al. (2015) observaram variações no NDVI em culturas anuais, indicando aumento em algumas plantas e diminuição em outras após eventos de geada. Além disso, Cogato et al. (2020) avaliaram o potencial da tecnologia baseada em sensoriamento remoto via satélite para avaliar danos e o tempo de recuperação após eventos de geada em vinhedos. Constataram que tanto o Índice de Vegetação (NDVI) quanto a Razão Simples Modificada (MSR) forneceram informações precisas sobre o tempo total de recuperação.

De modo geral, a variação temporal nos valores dos índices de vegetação avaliados neste estudo foi semelhante aos dados de número de folhas avaliados em campo, indicando o grande potencial do uso de imagens obtidas por RPA. Os índices de vegetação apresentaram diferentes tendências ao longo do tempo e espaço. Devido aos bons resultados na análise de regressão, os índices de vegetação foram usados para identificar a variabilidade espacial e temporal da cobertura vegetal após os danos causados pela geada. Além disso, foi possível observar a diferença de plantas entre as áreas de risco climático nas respectivas idades de plantio de um, dois e oito anos.

3 CONCLUSÃO

O uso de RPA se mostrou uma ferramenta eficaz para avaliar os danos causados pela geada em diferentes idades de plantas de café. Os resultados obtidos indicam que é viável utilizar índices de vegetação para monitorar a recuperação de plantações de café afetadas pela geada, proporcionando a capacidade de mapear sua distribuição espacial. Além disso, com base nas correlações significativas estabelecidas entre os índices de vegetação e os parâmetros agronômicos, especialmente pelo coeficiente de correlação de Spearman, torna-se possível monitorar de maneira efetiva a recuperação dos cafeeiros após o evento de geada por meio desses indicadores vegetativos.

Os danos observados pela geada na cultura do café foram influenciados pela zona de risco climático e pela idade da planta. Os maiores danos foram observados nas áreas de alto risco climático, associado ao relevo próximo de vales e áreas de baixada, enquanto que nas áreas de baixo risco climático, localizado na encosta da montanha, os danos foram menores. Ainda, as plantas de um ano foram as mais afetadas pelos danos da geada, enquanto as de dois anos foram menos impactadas.

Os resultados deste estudo demonstram a relação significativa entre a recuperação de cafeeiros após danos causados por geada e a idade do plantio. Plantios de dois anos demonstraram uma maior capacidade de recuperação em função dos danos por geada. Em contraste, plantas de café com oito anos, embora tenham sofrido menos danos por geada, enfrentaram maiores desafios em sua recuperação, indicando uma complexidade na resposta das plantas à geada ao longo do tempo. Enquanto plantios de um ano, mesmo apresentando os maiores danos por geada, acima de 80% nas áreas de alto risco, conseguiram se recuperar ao longo do período analisado. Essas descobertas são fundamentais para o planejamento e tomada de decisão, pois ressaltam a importância da consideração da idade da planta ao avaliar e entender os efeitos da geada na cafeicultura.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAHMAN, et al. Estimating leaf area index in eastern Canadian forests: a comparison of two indirect methods. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 38, n. 9, p. 2256-2268, 2008.
- AHAMED, T. et al. A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2455-2469, 2011.
- ALLEVATO, E. et al. Canopy damage by spring frost in European beech along the Apennines: effect of latitude, altitude and aspect. **Remote Sensing of Environment**, v. 225, p. 431-440, 2019.
- ALVES, J. D. et al. Danos fisiológicos da geada sobre o cafeeiro nas regiões Sul e Cerrado de Minas Gerais. **Circular técnico**, n. 360, - dezembro 2021.
- ANDROCIOLI, FILHO A; CARAMORI, P. H. Influence of coffee pruning on the severity of frost damage. **Braz arch biol technol**, v. 43, n. 1, 2000.
- ANDROCIOLI FILHO, A. et al. Frost injury and performance of coffee at 23oS in Brazil. **Exp. Agric.**, v. 22, n. 1, p. 71-74, 1986.
- ANTHONY L.; NGUY-ROBERTSON. The mathematical identity of two vegetation indices: MCARI2 and MTVI2, **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 21, p.7504-7507, 2013.
- BAO, S. et al. Assessing and Characterizing Oilseed Rape Freezing Injury Based on MODIS and MERIS Data. **Int. J. Agric. Biol. Eng.**, v. 10, p. 143–157, 2017.
- BARATA, R.A.P. et al. Evaluation of Coffee Plants Transplanted to an Area with Surface and Deep Liming Based on Multispectral Indices Acquired Using Unmanned Aerial Vehicles. **Agronomy**, v. 13, p. 2623, 2023.
- BASSO, B.; CAMMARANO, D. Remotely sensed vegetation indices: Theory and applications for crop management. **Riv. Ital. Agrometeorol.**, v. 1, n. 14, 2004.
- BORÉM, F. M. et al. Meteorological variables and sensorial quality of coffee in the Mantiqueira region of Minas Gerais. **Coffee Science**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 38 - 47, 2019.
- BRAGA, G. B. et al. Frost Risk and Rural Insurance in Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 4, p. 703-711, 2021.
- BRATASEVEC, K.; SIVILOTTI, P.; VODOPIVEC, B. M. Soil and foliar fertilization affects mineral contents in *Vitis vinifera* L. cv. ‘rebula’ leaves. **Journal of soil science and plant nutrition**, 13:650- 663, 2013.
- CAMARGO, P.; CAMARGO, M. B. Frost in Coffee Crops: Frost Characteristics, Damaging Effects on Coffee and Alleviation Options. In *Coffee: Growing, Processing, Sustaining*

Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders, and Researchers (**Ebook**: 1 ed., cap 11, p. 355-369, 2004).

CARTER, G. A.; KNAPP, A. K. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. **American journal of botany**, v. 88, p. 677-684, 2001.

COGATO, A. et al. Medium-Resolution Multispectral Data from Sentinel-2 to Assess the Damage and the Recovery Time of Late Frost on Vineyards. **Remote Sens.**, v. 12, p. 1896, 2020.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de café, v. 10 – Safra 2023, n. 2 - **Segundo levantamento**. Brasília, maio de 2023. p. 1-44.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de café, v. 8 – Safra 2021, n.2 - **Segundo levantamento**, Brasília, p. 1-63, maio 2021.

CUNHA, J. E. F. Dano por geada e sua relação com formatos de vertentes em Patrocínio, Minas Gerais. **Revista Educação, Saúde e Meio Ambiente.**, Patrocínio, v. 1, n. 9, p. 236 - 249, 2021.

DUDDU, H.S.N.; V. PAJIC; S.D. NOBLE; K.K. TANINO; S.J. SHIRTLI_E. "Image-Based Rapid Estimation of Frost Damage in Canola (*Brassica napus* L.). **Can. J. Remote Sens.**, v. 44, p. 169-175, 2018.

FENG, M.; YANG, W.; CAO, L.; DING, G. "Monitoring Winter Wheat Freeze Injury Using Multi-Temporal MODIS Data. **Agric. Sci.**, v. 8, p. 1053-1062, 2009,

FERRAZ, G. A. e S. Plant sampling grid determination in precision agriculture in coffee field. **Coffee Science**, v. 13, n.1, p.112-121., 2018

FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista brasileira de biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

FREITAS, R.A.S. et al. Hyperspectral characterization and estimation models for agronomic parameters of coffee cultivars after pruning. **Precision Agriculture**, v. 24, p. 2374–2394, 2023.

GABBRIELLI, M. et al. Satellite-Based Frost Damage Detection in Support of Winter Cover Crops Management: A Case Study on White Mustard. **Agronomy**, v. 12, p. 2025, 2022.

HABOUDANE, D.; J. R. et al. Caracterização das áreas cafeeiras da região do Campo das Vertentes. **X Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil** – ISSN: 1984-9249 8 a 11 de outubro de 2019.

HABOUDANE, D. et al. Hyperspectral Vegetation Indices and Novel Algorithms for Predicting Green LAI of Crop Canopies: Modeling and Validation in the Context of Precision Agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 3 p. 337–352, 2004.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sens. Environ.** V. 25, p. 295–309, 1988.

RAMALHO, J. C. et al. Cold impact and acclimation response of *Coffea* spp. *Plants. Theor. Exp. Plant Physiol*, v. 26, p. 5–18, 2014.

JEŁOWICKI, Ł., et al. Evaluation of rapeseed winter crop damage using UAV-based multispectral imagery. **Remote Sensing**, v. 12, n. 16, p. 2618, 2020.

KUMHÁLOVÁ, J.; MOUDRÝ, V. Topographical characteristics for precision agriculture in conditions of the Czech Republic. **Applied Geography**, v. 50, p. 90-98. 2014.

LI, W.; HUANG, J.; YANG, L.; CHEN, Y.; FANG, Y.; JIN, H.; SUN, H.; HUANG, R. "A Practical Remote Sensing Monitoring Framework for Late Frost Damage in Wine Grapes Using Multi-Source Satellite Data. **Remote Sensing**, v.13, 3231, 2021.

MAIN, R. et al. An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, p. 751–761, 2011.

MARIN, D. B. et al. Sensoriamento remoto espectral na identificação e mapeamento de variáveis bióticas e abióticas do cafeeiro. **Revista Ceres**, v. 66 n. 2, p. 142–153, 2019.

MARIN, D. B. et al. Unmanned aerial vehicle to evaluate frost damage in coffee plants. **Precision Agriculture**, v. 22, p. 1845–1860, 2021. (A).

MARTINS, G. D.; Galo, M. de L. B. T. Caracterização espectral da cana-de-açúcar infectada por nematoides e *migdolus fryanus* por espectrorradiometria de campo. **Boletim De Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 4, p. 783–796, 2015.

OKSANEN, E. et al. Photosynthesis of birch (*Betula pendula*) is sensitive to springtime frost and ozone. **Can. J. For. Res**, v. 35, n. 3, p. 703-712, 2005.

Pix4dmapper Software Manual Pix4D Support. **Lausanne, Suíça: Pix4D SA**.2013b. Disponível em: <https://support.pix4d.com/forums/22655307-Manual>.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. Remote sensing of Vegetation. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2012.

Qgis Development Team. QGIS Geographic Information System. **Open Source Geospatial Foundation Project: Beaverton, OR, USA**, 2018.

ROCK, B. N.; HOSHIZAKI, T.; MILLER, J. R. Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, n. 1, p. 109–127, 1988.

RUDORFF, B. F. T. Et al. Detecção de danos por geada na cultura da cana-de-açúcar usando imagens MODIS e dados SRTM. **In Proceedings of the 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Munique, Alemanha, 22–27 de julho de 2012; pp. 5709–5712.

SANTANA, L. S. et al. Influence of flight altitude and control points in the georeferencing of images obtained by unmanned aerial vehicle. **European Journal of Remote Sensing**, v. 54, n. 1, p. 59–71, 2021.

SHE B. et al. Assessing winter oilseed rape freeze injury based on Chinese HJ remote sensing data. **J Zhejiang Univ Sci B**. v. 16, n. 2, p. 131-44, 2015.

SODERHOLM, P. K. and GASKINS, M. H. Evaluation of cold resistance in the genus *Coffea*. **Am. Soc. Hort. Sci.**, Caribbean Region, v. 4, p.8-15, 1960.

TAIZ, L. et al. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. **6.ed.** Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

WANG, SHUAI. et al. Response of winter wheat to spring frost from a remote sensing perspective: Damage estimation and influential factors. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 168, 221–235, 2020.

WEI, C. et al. Hyperspectral characterization of freezing injury and its biochemical impacts in oilseed rape leaves. **Remote Sens. Environ.**, v. 195, p. 56–66, 2017.

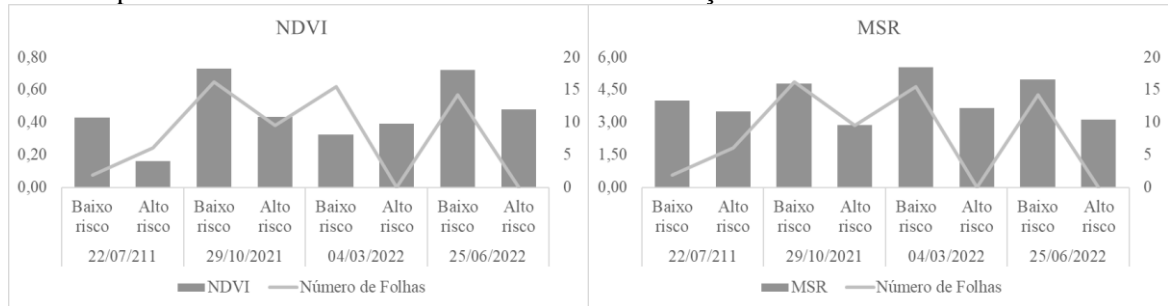
WU, CHAOYANG. et al. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 8–9, p. 1230-1241, 2008.

WU, YONGFENG. et al. Narrow-waveband spectral indices for prediction of yield loss in frost-damaged winter wheat during stem elongation. **European Journal of Agronomy**, n. 124, p.126240, 2021.

ZHAO, D. et al. Corn (*Zea mays* L.) growth, leaf pigment concentration, photosynthesis and leaf hyperspectral reflectance properties as affected by nitrogen supply. **Plant and soil**, v. 257, p. 205-218, 2003.

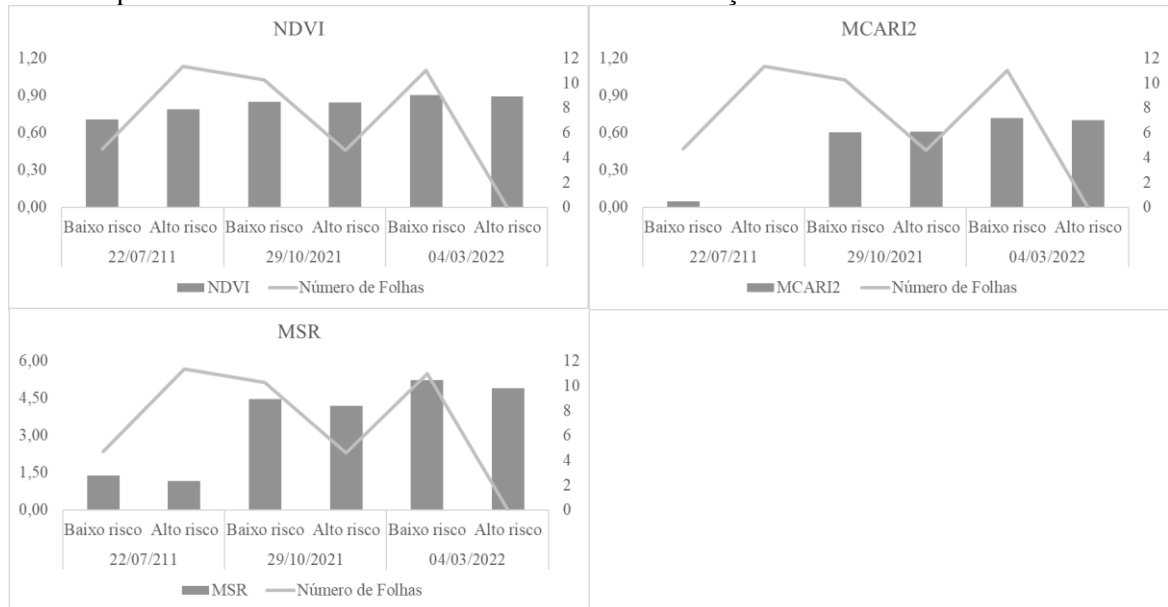
ANEXO B – GRÁFICOS DE COMBINAÇÃO

Figura 13 – Gráfico de combinação entre as variáveis número de folhas (NF) e com índices de vegetação no plantio de um ano considerando as datas de avaliação e áreas de alto e baixo risco.



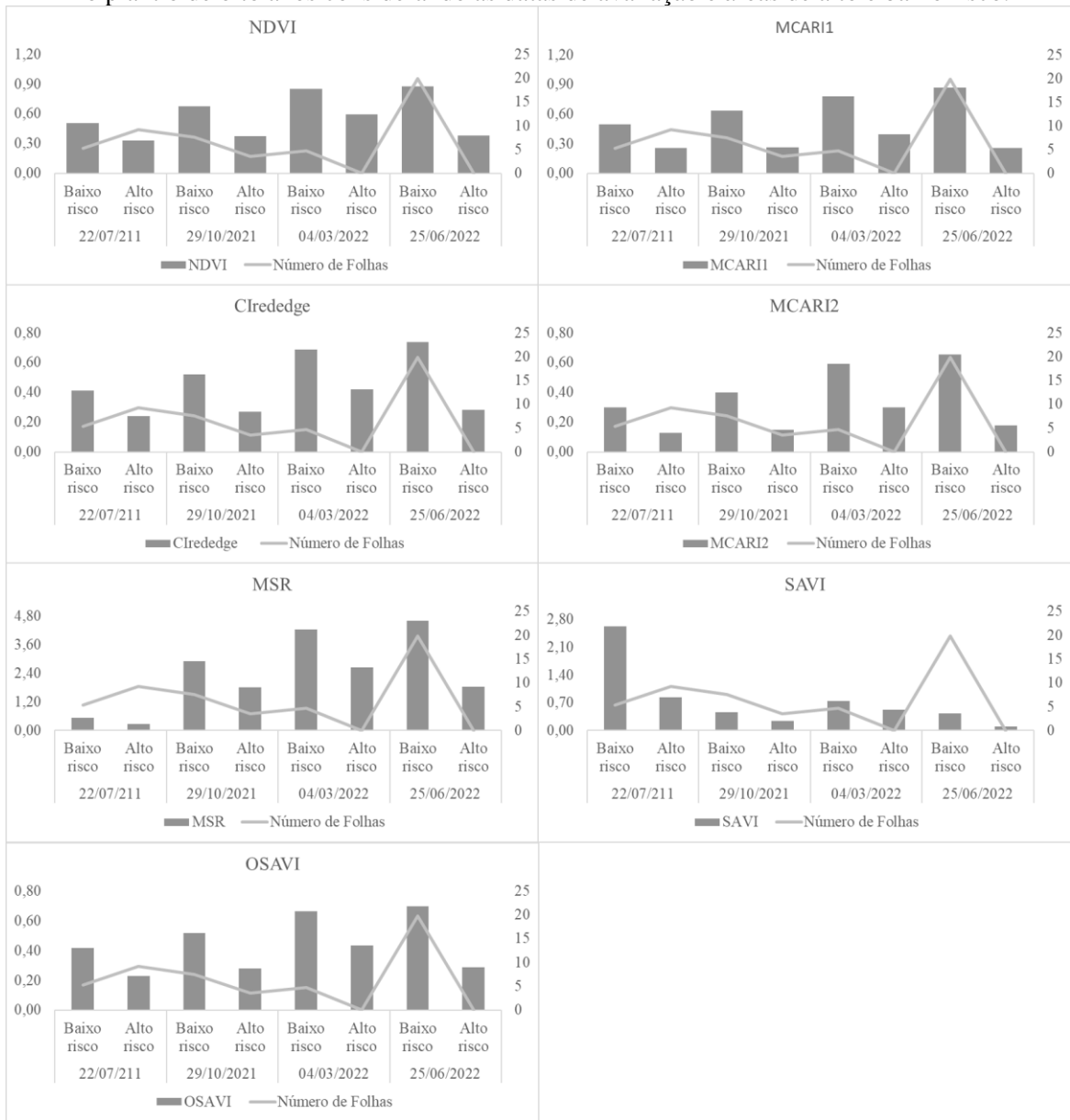
Fonte: Do autor (2023).

Figura 14 – Gráfico de combinação entre as variáveis número de folhas (NF) e com índices de vegetação no plantio de dois anos considerando as datas de avaliação e áreas de alto e baixo risco.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 15 – Gráfico de combinação entre as variáveis número de folhas (NF) e com índices de vegetação no plantio de oito anos considerando as datas de avaliação e áreas de alto e baixo risco.



Fonte: Do autor (2023).

ARTIGO 3 – AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA NA AVALIAÇÃO DA RESPOSTA VEGETATIVA NAS FACES DE EXPOSIÇÃO SOLAR EM CAFEIEIRO APÓS A OCORRÊNCIA DE GEADA

RESUMO

A face do cafeeiro com maior exposição ao sol pode influenciar na recuperação de plantas com danos de geada. Dado esta premissa, o objetivo do trabalho foi avaliar a influência da face de exposição solar na fenologia e produção de plantio cafeeiro com danos causados por geada. O estudo foi realizado na Fazenda Bom Jardim, localizada em Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, Brasil. Foram utilizadas três áreas experimentais com diferentes tempos de plantio cafeeiro (um ano, dois anos e oito anos). Foram realizadas avaliações periódicas na área, três dias após a geada e a cada três meses ao longo de um ano e seis meses. As plantas foram avaliadas na face norte e sul da linha de plantio, onde foram mensurados os números de nós por ramo (NR), número de folhas com danos (FD), número de flores por ramos (NFL), número de frutos por ramos (NFR), produtividade (P) e danos por geada (DG). Adicional as análises de campo, foram realizados voos sobre as três áreas com uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) para a captura de imagens multiespectrais para avaliação por índices de vegetação. As imagens foram processadas para gerar os ortomosaicos e para calcular os índices de vegetação. As variáveis foram submetidas a análise de variância e teste Tukey a nível de 5%. As plantas de oito anos da face norte apresentaram maior dano por geada, enquanto em plantas de um e dois anos, a exposição solar não teve impacto significativo nos danos.

1 INTRODUÇÃO

O café se destaca como uma das bebidas mais apreciadas no mundo (FERREIRA et al., 2022). O Brasil é o maior produtor e exportador de café, no ano agrícola 2022/2023 produziu 54.742,9 mil sacas de 60 kg de café arábica e conilon (CONAB, 2023). No entanto, dados da Organização Internacional do Café revelam uma queda de 7,6% na produção da América do Sul em 2021/22, representando a maior redução desde 2004/05, quando houve uma queda de 16,6%. Segundo os dados da Organização Internacional do Café (OIC, 2023), o Brasil foi o principal impulsionador desse declínio, devido à baixa produção bienal e condições meteorológicas adversas. Essa situação destaca a relevância da produção brasileira para o cenário global do café. Portanto, é necessário compreender os fatores edafoclimáticos envolvidos na produção do café (FERREIRA et al., 2021)

Em geral, no Brasil os cafezais são conduzidos quase exclusivamente a pleno sol e comumente utiliza-se a implantação das lavouras cafeeiras em filas ou renques abertos (MATIELLO et al., 2010; FERNANDES et al., 2012; RONCHI et al., 2015). Nas latitudes onde o café é comumente cultivado $>18^\circ$ S, temos uma influência muito grande da face de exposição sobre a quantidade de radiação solar que chega sobre a copa da planta. De modo geral temos uma maior quantidade de radiação solar na face voltada ao Norte e uma menor quantidade de radiação solar voltada ao Sul. A menor exposição da área foliar à radiação solar através do arranjo de linhas de cultivo associado a uma redução acentuada da temperatura (BOSELDMANN et al., 2009; FERREIRA et al., 2022) pode proporcionar um microclima favorável a ocorrência de geada. Fatores como a face de exposição das plantas à radiação solar influenciam na fisiologia e produção do café (CHAVES et al., 2012).

O arranjo de plantas e a face de exposição podem alterar o microclima do sistema de produção, atuando principalmente na interceptação e no balanço da radiação, assim como na temperatura do ar, umidade relativa e regime de molhamento na copa da planta (MONTEIRO 2009). Dessa forma, condições de manejo, como a direção de plantio do cafeeiro, expondo sua face à radiação solar, podem alterar a intensidade das geadas em função do microclima proporcionado (SENTELHAS et al., 2005; MONTEIRO 2009).

A absorção da radiação solar é fundamental para determinar as temperaturas foliares e do ar, exercendo impacto na pressão de vapor, na manutenção do estado hídrico e no estresse oxidativo das plantas (HOLMGREN, 2003). São escassos os estudos sobre a influência da face de exposição solar da linha de plantio e os danos de geada em cafeeiros. Ferraz et al. (2014)

avaliaram a dependência espacial da força de desprendimento de frutos verdes de acordo com a face de exposição solar (Leste e Oeste). Verificou que a magnitude da produção de frutos pode variar entre as faces opostas dos cafeeiros cultivados em fileiras (CHAVES et al., 2012). Isso ressalta a importância da orientação Leste/Oeste na linha de plantio de café, otimizando a exposição solar para criar condições ideais de crescimento e desenvolvimento da cultura.

Contudo não se sabe o quanto a face de exposição também influencia nos danos causados pela geada, uma vez que o microclima é alterado, e conseqüentemente, a favorabilidade para ocorrência de geada. Diante do exposto, a seguinte hipótese foi gerada: os danos mais severos por geada na cultura do café ocorrem na face de exposição voltada ao Sul, sendo que a idade da planta deve ser considerada na avaliação. Neste sentido, o objetivo do trabalho foi avaliar a influência da face de exposição solar Norte/Sul sobre a resposta da planta e os danos por geada em plantas de café com diferentes idades e topografia.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Descrição da área

O estudo foi realizado na Fazenda Bom Jardim, localizada em Santo Antônio do Amparo, na região do Oeste de Minas Gerais, Brasil, nas coordenadas geográficas 21°00'58.9"S e 44°55'24.9"W, altitude de 950m acima do nível do mar.

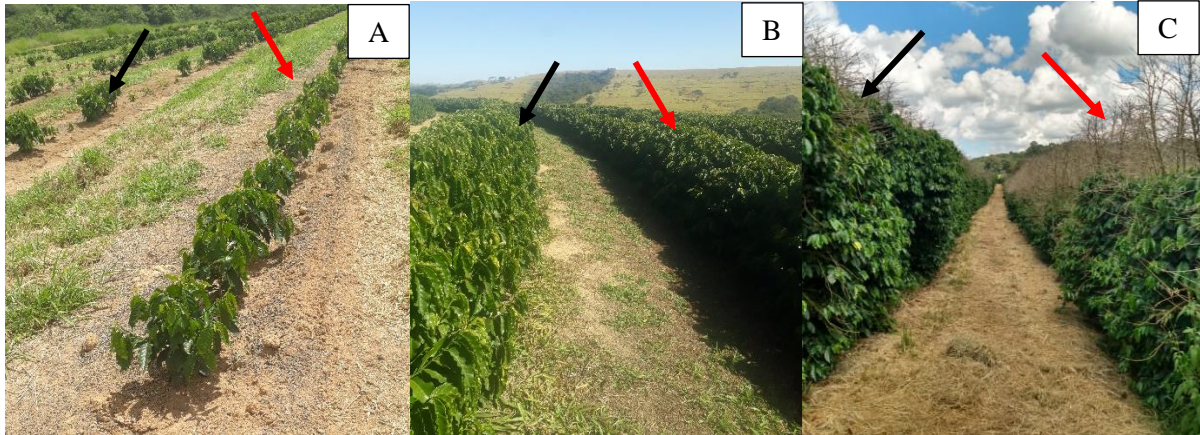
A classificação climática da região é Cwa, subtropical úmido segundo classificação Köppen-Geiser, com verões quentes e úmidos e invernos frios e secos, com temperaturas média, mínima e máxima de 20°C, 14°C e 26°C. A precipitação total média é de 1400 mm e precipitação total anual média de 1670 mm.

2.2 Delineamento experimental

Foram utilizadas três áreas experimentais de plantio de café (*Coffea arabica* L.) com características distintas, abrangendo épocas de plantio e variedades específicas. As áreas foram designadas como Área de 1 ano, Área de 2 anos e Área de 8 anos, determinando a idade das plantas com base no intervalo entre o plantio e a ocorrência da geada. A área de 1 ano possuía 31.966 m² e era plantada com cafeeiros da cultivar Catucaí e Arara, a área de 2 anos contava com 19.546 m² de cafeeiros da cultivar Catuaí Amarelo e a área 8 anos estava cultivada com

cafeeiros da cultivar Catucaí vermelha IAC 144 em 35.176 m². Todas as áreas foram plantadas com um espaçamento de 0,5m entre plantas e 3,5m na entrelinha. Na Figura 1 é possível observar uma ilustração das diferentes áreas de plantio, das áreas experimentais.

Figura 1 – a) Plantio de um ano, b) Plantio de dois anos, c) Plantio de oito anos. Na esquerda das imagens temos a face voltada ao Norte (flechas pretas) e a direita a face voltada ao Sul (flechas vermelhas).



Fonte: Do autor (2023).

2.3 Obtenção de imagens aéreas e processamento de imagens

A primeira etapa foi gerar o banco de dados contendo imagens no formato digital. As imagens foram obtidas usando uma aeronave pilotada remotamente (RPA) e uma câmera multiespectral acoplada. A RPA utilizada foi a 3DR Solo comercial (3D Robotics, Berkeley, CA, EUA), com quatro motores (quadricóptero) (Figura 2a). As imagens foram capturadas por câmera multiespectral Parrot Sequoia (Figura 2b) que possui um sensor RGB com Resolução de 16 megapixels (4608 × 3456) e quatro sensores extras com resolução de 1,5 megapixels (1280 × 960) nas bandas espectrais de verde (550 nm BP 40), vermelho (660 nm BP40), borda vermelha (735 nm BP 10) e infravermelho próximo (790 nm BP 40).

Figura 2 – a) RPA 3DR Solo e Placa de correção radiométrica, b) Câmera multiespectral Parrot Sequoia.



Fonte: Do autor (2023).

A sobreposição de imagens foi de 80%, altitude de voo de 30 m e velocidade 30 m/s. A sobreposição de imagens é o elo entre as várias fotos sequenciais feitas pela câmera na hora de produzir o mapa.

Os índices de vegetação foram escolhidos com base na pesquisa de Marin et al. (2021 a), o qual avaliou e identificou os índices com capacidade de avaliar a resposta espectral das plantas devido a danos causados por geada. Os índices de vegetação estão apresentados na Tabela 1. Após o processamento dos ortomosaicos, as imagens foram cortadas apenas na área de interesse para aplicação de índices vegetativos.

Tabela 1 – Índices de vegetação calculados a partir da reflectância das bandas multiespectrais das imagens.

Índices de vegetação	Fórmulas	Referência
NDVI (normalized difference vegetation index)	$(\text{Nir} - \text{Red}) / (\text{Nir} + \text{Red})$	Rouse et al. (1974)
MTCI (meris terrestrial chlorophyll index)	$(\text{Nir} - \text{RedEdge}) / (\text{RedEdge} - \text{Red})$	Dash e Curran (2004)
MSR (modified simple ratio)	$((\text{Nir}/\text{Red}) - 1) / (\sqrt{((\text{Nir}/\text{Red}) + 1)})$	Chen (1996)
MCARI1 (first modified chlorophyll absorption ratio index)	$1,2 (2,5 (\text{Nir} - \text{Red}) - 1,3 (\text{Nir} - \text{Green}))$	Haboudane et al. (2004)
MCARI2 (modified chlorophyll)	$1,5 (2,5 (\text{Nir} - \text{Red}) - 1,3 (\text{Nir} - \text{Green})) (\text{Nir} / \text{Red}) / \sqrt{(2\text{Nir}+1)^2 - (6\text{Nir} - 5\sqrt{\text{Red}})-0,5}$	Haboudane et al. (2004)
SAVI (soil adjusted difference vegetation index)	$(1 + 0,5) * ((\text{Nir} - \text{Red}) / (\text{Nir} + \text{Red} + 0,5))$	Huete (1988)
OSAVI (optimized SAVI)	$(\text{Nir} - \text{Red}) / (\text{Nir} + \text{Red} + 0,16)$	Rondeaux et al. (1996)
CIrededge (Chlorophyll IndexRedEdge)	$(\text{Nir} / \text{RedEdge}) - 1$	Ahamed et al. (2011)

Fonte: O autor (2023).

Os índices de vegetação foram calculados com base na combinação de bandas espectrais das imagens processadas. Os índices de vegetação das imagens foram calculados usando a ferramenta Raster Calculator disponível no menu Raster do software QGIS 3.4.14-Madeira (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2018). Após a elaboração dos índices de vegetação, foram

criados *buffers* associados aos pontos amostrais georreferenciados dos dados coletados em campo. No software QGIS 3.4.14-Madeira (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2018) foram extraídos os valores médios dos *pixels* da imagem condizentes à cada planta individual utilizando a ferramenta Zonal Statistics, o valor médio extraído dos pixels foi no raio de 0,20 m, calculado a partir do centro de cada planta amostrada para comparar matematicamente os valores das imagens com os dados de danos coletados em campo. Os valores de pixel foram exportados em formato XLSX e analisado desempenho dos índices de vegetação na estimativa dos danos causada por geadas em cafeeiros.

2.4 Avaliação de danos

A avaliação visual *in loco* de danos causados por geada em cafeeiros foi realizada de acordo com metodologia descrita por Soderholm e Gaskins (1960); Androcioli Filho et al. (1986) e Marin et al. (2021a). Neste método de avaliação, três avaliadores independentes realizam uma análise visual das três seções distintas de cada planta (superior, média e inferior), considerando folhas e ramos. Cada avaliador atribui notas numa escala de 0 a 10, as quais são então utilizadas para calcular a pontuação média para cada planta. Essa pontuação média é posteriormente convertida para uma escala percentual. Danos são identificados nas partes da planta que exibem coloração marrom e necrose, indicativos físicos da morte celular causada pelo congelamento. Os valores médios atribuídos por cada avaliador são agrupados em classes de dano, onde as notas de um a dez correspondem a porcentagens de 0 a 100%, conforme estabelecido na tabela apresentada no artigo de Marin et al. (2019a).

2.5 Avaliação de recuperação e crescimento vegetativo

Os cafeeiros foram avaliados por meio da mensuração das seguintes variáveis: número de folha (NF), números de nós por ramo (NR), número de flores por ramos (NFL), número de frutos por ramos (NFR) e danos por geada (DG). Para uma análise espacial precisa, as plantas foram georreferenciadas por meio de um sistema de posicionamento global (GPS). Essa abordagem permitiu uma caracterização mais detalhada e precisa das condições e desempenho dos cafeeiros, integrando dados geográficos à avaliação das variáveis mencionadas.

O NFL foi coletado na época de floração em 29/10/21. Para as avaliações foram utilizadas trena e prancheta. Foram utilizadas 18 plantas em cada área de risco climático,

distribuídas na área de produção, de modo a avaliar a distribuição espacial, totalizando 36 plantas por idade. Com a finalidade de avaliar a influência da face de exposição solar foram avaliadas plantas do lado sul e norte da linha de plantio. Em cada planta de avaliação foram utilizados dois ramos (superior e inferior) do terço médio da planta para mensuração das variáveis. Na Figura 3 é possível visualizar as avaliações na área de estudo, bem como a face de exposição através das flechas. A avaliação foi conduzida a cada três meses ao longo de um período de um ano e meio, totalizando cinco visitas no local. A primeira avaliação foi realizada três dias após a geada (3 DAG), dia 22/07/2021. As demais avaliações foram realizadas nas seguintes datas: 29/10/21 (90 DAG), 04/03/22 (240 DAG), 25/06/22 (330 DAG) e 03/12/22 (510 DAG).

Figura 3 – a) Avaliação de cafeeiros de um ano de idade, b) avaliação de cafeeiros de dois anos de idade, c) avaliação de cafeeiros de oito anos.



Fonte: O autor (2023).

2.6 Análises estatísticas

Os dados referentes aos danos por geadas, aos índices de vegetação e às respostas vegetativas foram submetidos ao teste de Mann-Whitney no ambiente de software R, com nível de significância 0,05. O foco da investigação foi avaliar possíveis diferenças entre as faces sul e norte em relação aos danos por geadas, índices de vegetação e respostas vegetativas de recuperação do cafeeiro. A metodologia empregada incluiu a aplicação do teste U de Mann-Whitney para amostras independentes, sendo este um método não paramétrico robusto, adequado para situações em que os dados não atendem aos pressupostos de normalidade.

Para avaliar as diferenças entre as faces sul e norte avaliadas foi realizado pelo teste U de Mann-Whitney com nível de significância de $p = 0,05$. Considerando as seguintes hipóteses: H_0 : As duas faces, sul e norte, possuem a mesma medida de tendência central.

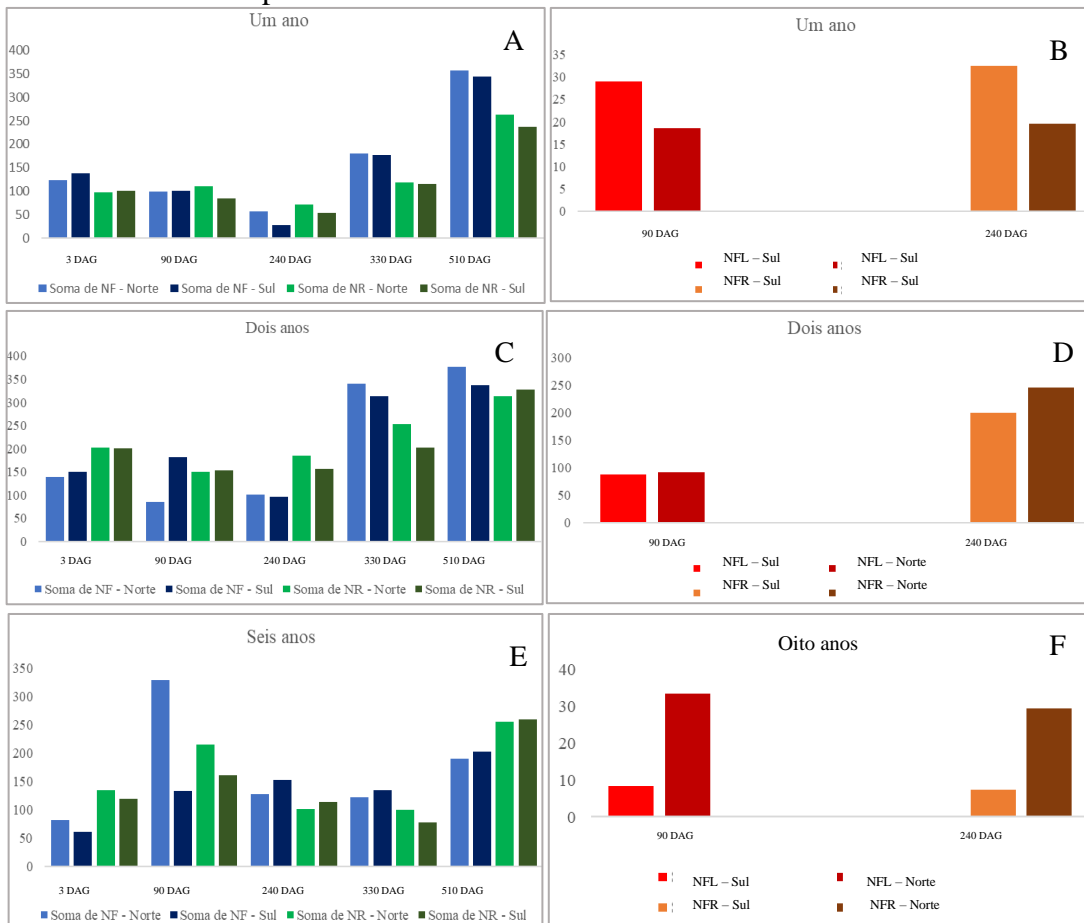
H1: As duas faces, sul e norte estão centrados em pontos diferentes. O teste de Mann-Whitney proporciona uma abordagem estatística para avaliar a presença de diferenças significativas entre as amostras, levando em consideração a variabilidade observada nos danos por geadas, índices de vegetação e respostas vegetativas nas duas faces. A interpretação dos resultados será realizada com base no valor-p obtido em relação ao nível de significância pré-estabelecido, com o intuito de aceitar ou rejeitar a hipótese nula.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estatísticas descritivas

Na Figura 4 observa-se os resultados da análise descritiva dos dados nas áreas de plantio de um ano, dois anos e oito anos de idade.

Figura 4 – Soma do Números de folhas (NF), nós por ramo (NR), flores por ramo (NFL), frutos por ramo (NFR) em lavouras de um ano, dois anos e oito anos de idade nas faces norte e sul do plantio.



Fonte: Do autor (2023)

Para as plantas de um ano, percebe-se que o NF e o NR não apresenta diferenças notáveis entre as faces sul e norte observadas (Figura 4a). Em relação ao NFL e ao NFR, nota-se que, na amostra analisada, a face norte exibe valores mais altos (figura 4b).

O quantitativo de flores e frutos foi registrado em duas datas específicas, coincidindo com o período de floração e frutificação dos cafeeiros. No caso das plantas de dois anos, não são evidentes disparidades significativas visualmente entre os NF e NR (Figura 4c), assim como entre NFL e NFR (figura 4d), nas faces sul e norte observadas. Quanto às plantas de oito anos (Figura 4e), não se observam grandes diferenças visuais entre as faces sul e norte em relação aos NF e NR, exceto para o NF aos DAG 90. Em relação ao NFL e NFR (Figura 4f), nota-se que, na amostra analisada, a face norte exibe valores mais elevados. Durante as visitas de campo, foi constatado que somente a partir da segunda visita, realizada três meses após a ocorrência da geada, as plantas passaram a apresentar desfolhamento nos locais afetados pela geada na sul. Essa constatação contribui para explicar os resultados obtidos.

A disparidade entre as faces de exposição solar é notável. A face Norte, que recebe os primeiros raios solares pela manhã, apresenta folhas maiores e coloração verde mais escura nos cafeeiros. A face oposta (norte), recebe os raios solares horas depois, resultando em sombra prolongada. Esta face norte também é impactada pela luz solar mais intensa à tarde (SANTINATO et al. 2020; CASSIA et al. 2013). A observação revela consistentemente que a face voltada para o sol matinal exibe menor desfolhamento. Por outro lado, na face onde a incidência solar é mais tardia, ocorre maior desfolhamento. A explicação reside no fato de que, nessa exposição, a folhagem não seca rapidamente pela manhã, mantendo maior umidade. Essa diferenciação na exposição solar contribui significativamente para os padrões observados nas plantas.

Figura 5 – Representação esquemática do microclima entre a face Norte (flechas pretas) e Sul (flechas vermelhas) das linhas de plantio do café. A imagem se refere as plantas de oito anos de idade e foi obtida as 10 horas da manhã nas areas de alto (a) e baixo risco climatico (b).



Fonte: O autor (2023).

3.2 Análise inferencial

Nas Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6 é possível observar os resultados do teste U de Mann-Whitney, para avaliar a presença de diferenças estatisticamente significativas entre as faces sul e norte investigadas. As tabelas fornecem informações sobre a mediana e a Amplitude Interquartil (AIQ), que são medidas estatísticas centrais e de dispersão para caracterizar a distribuição dos dados em ambas as faces.

Tabela 2 – Resultados do teste U de Mann-Whitney para distribuições não paramétricas avaliando a existência de diferenças significativas entre as faces sul e norte analisadas, para as plantas de um ano.

Plantas de um ano						
	Face	mediana	AIQ	U	Valor-p	Decisão
NF	Norte	8	15,2	4151,5	0,771	Não rejeita H0
	Sul	6	15			
NR	Norte	7	75	4505	0,191	Não rejeita H0
	Sul	5,5	6,75			
NFL	Norte	1	2,5	202	0,191	Não rejeita H0
	Sul	1	1,75			
NFR	Norte	2	2	50,5	0,387	Não rejeita H0
	Sul	2	2			
NDVI	Norte	0,53	0,394	2564	0,915	Não rejeita H0
	Sul	0,55	0,442			
MCARI1	Norte	0,50	0,453	2588	0,988	Não rejeita H0
	Sul	0,46	0,371			
MCARI2	Norte	0,32	0,349	2576	0,950	Não rejeita H0
	Sul	0,23	0,309			
MSR	Norte	2,04	2,12	2525	0,790	Não rejeita H0
	Sul	2,28	2,43			
MTCI	Norte	0,40	0,406	2497	0,705	Não rejeita H0
	Sul	0,4	0,454			
OSAVI	Norte	0,44	0,326	2538	0,830	Não rejeita H0
	Sul	0,42	0,319			
RECI	Norte	0,48	0,428	2416	0,483	Não rejeita H0
	Sul	0,54	0,543			
SAVI	Norte	0,44	0,349	2558	0,893	Não rejeita H0
	Sul	0,41	0,305			
Danos	Norte	45	85	2816	0,356	Não rejeita H0
	Sul	40	85			

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 3 – Resultados do teste U de Mann-Whitney para distribuições não paramétricas avaliando a existência de diferenças significativas entre as faces sul e norte analisadas, para as plantas de dois anos.

Plantas de dois anos						
	Face	mediana	AIQ	U	Valor-p	Decisão
NF	Norte	12	14,8	3947,5	0,770	Não rejeita H0
	Sul	12	9			
NR	Norte	13	6	4474	0,224	Não rejeita H0
	Sul	12	5			
NFL	Norte	4	8,75	148,5	0,6782	Não rejeita H0
	Sul	4	6,75			
NFR	Norte	16	17	35,5	0,691	Não rejeita H0
	Sul	25	30			
NDVI	Norte	0,85	0,081	1522	0,696	Não rejeita H0
	Sul	0,85	0,116			
MCARI1	Norte	0,87	0,315	1475	0,919	Não rejeita H0
	Sul	0,86	0,378			
MCARI2	Norte	0,61	0,622	1436	0,895	Não rejeita H0
	Sul	0,59	0,560			
MSR	Norte	4,34	3,450	1525	0,682	Não rejeita H0
	Sul	4,33	3,600			
MTCI	Norte	0,67	0,221	1515	0,728	Não rejeita H0
	Sul	0,66	0,219			
OSAVI	Norte	0,67	0,099	1496	0,817	Não rejeita H0
	Sul	0,66	0,117			
RECI	Norte	0,78	4,740	1485	0,871	Não rejeita H0
	Sul	0,81	4,320			
SAVI	Norte	0,74	0,634	1535	0,683	Não rejeita H0
	Sul	0,74	0,638			
Danos	Norte	22,5	35	1687,5	0,147	Não rejeita H0
	Sul	25	40			

Fonte: Do autor (2023).

Amplitude Interquartil = 3° quartil – 1° quartil = Q3 – Q1. Nas Tabelas 2 e 3 tem-se que não há diferenças entre as faces sul e norte analisadas com relação às variáveis NF, NR, NFL, NFR, os índices de vegetação e o dano atribuído nos plantios de um e dois anos.

Os poucos trabalhos publicados com este assunto, demonstram que o cafeeiro é altamente influenciado pela exposição do sol. Tanto a luz quanto a temperatura interferem na diferenciação de gemas, velocidade de amadurecimento de frutos, crescimento vegetativo e outras injúrias (SANTINATO et al., 2020). Os danos foliares estão diretamente relacionados com a queda de temperatura e tempo de exposição das plantas. Junior et al. (2022) verificou em estudos que o efeito das temperaturas de congelamento é agravado com o aumento do tempo de exposição.

No entanto, verificou-se no presente estudo que, nas plantas mais jovens, a exposição solar direta em uma determinada face não parece ter um impacto significativo nos danos causados pela geada e na subsequente recuperação das plantas. Isso pode ser atribuído a características específicas das plantas em estágios iniciais de desenvolvimento, como a altura e o enfolhamento, ou seja, a altura e o enfolhamento não são capazes de criar um sombreamento na planta que possa retardar o efeito do sol sobre as folhas. Fahl et al. (2000), avaliaram as variações microclimáticas posterior à geada, em plantio cafeeiro com 3 anos de idade e verificaram que duas semanas após o evento, as plantas apresentaram recuperação plena.

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados das análises de plantas de oito anos de idade.

Tabela 4 – Resultados do teste U de Mann-Whitney para distribuições não paramétricas avaliando a existência de diferenças significativas entre as faces sul e norte analisadas, para as plantas de oito anos.

Plantas de oito anos						
	Face	mediana	AIQ	U	Valor-p	Decisão
NF	Norte	4	5,75	181	0,554	Não rejeita H0
	Sul	4	5			
NR	Norte	7	1,75	154,5	0,821	Não rejeita H0
	Sul	7,5	2,75			
NFL	Norte	3	4	20,5	0,079	Não rejeita H0
	Sul	1	2			
NFR	Norte	2	6	20	0,068	Não rejeita H0
	Sul	1	1			
NDVI	Norte	0,83	0,112	2804	0,398	Não rejeita H0
	Sul	0,82	0,126			
MCARI1	Norte	0,39	0,475	2808	0,389	Não rejeita H0
	Sul	0,36	0,254			
MCARI2	Norte	0,30	0,313	2855	0,294	Não rejeita H0
	Sul	0,26	0,17			
MSR	Norte	3,99	1,37	2834	0,334	Não rejeita H0
	Sul	3,78	1,4			
MTCI	Norte	0,66	0,288	2498	0,708	Não rejeita H0
	Sul	0,70	0,432			
OSAVI	Norte	0,49	0,2	2917	0,194	Não rejeita H0
	Sul	0,46	0,146			
RECI	Norte	0,78	0,305	2395	0,432	Não rejeita H0
	Sul	0,83	0,38			
SAVI	Norte	0,43	0,287	2846	0,311	Não rejeita H0
	Sul	0,38	0,192			
Danos	Norte	14,5	43	3440	> 0,05	Rejeita-se H0
	Sul	21	31			

Fonte: Do autor (2023).

Observa-se uma diferença apenas com relação ao dano, sendo que as plantas localizadas na face Sul apresentaram maior dano após a geada comparada com a face norte. Pelo teste U de Mann-Whitney avaliando a existência de diferenças significativas entre as faces sul e norte para NF aos 90 DAG, para as plantas de oito anos obteve-se um valor-p maior que 5% ($> 0,05$), desta forma podemos concluir que a face norte obteve um maior NF que a face norte.

Aos 3 DAG foi verificado maior porcentagem de dano foliar na face de exposição Sul da linha de plantio, onde não ocorre incidência solar logo pela manhã. E na segunda vista esses resultados foram confirmados, pela maior queda de folhas nesta face da linha de plantio. Conseqüentemente a face norte apresentou maior número de folhas. Conforme indicado por Camargo e Camargo (2004), embora os danos causados pela geada sejam comumente associados à "insolação matinal", observações em cafeeiros afetados pela geada mostraram que nenhum dano significativo ocorreu no lado exposto aos primeiros raios quentes do sol da madrugada.

Por observações práticas, sabe-se que o lado da planta que recebe sol pela manhã apresenta folhas maiores, mais esverdeadas e flácidas que as folhas do lado que recebe sol à tarde, caracterizadas por serem menores e verde-amareladas. Encontra-se na literatura, vários trabalhos investigativos envolvendo plantas sombreadas e a pleno sol (CARELLI et al., 2000). Cassia et al. (2013) apontam que devido ao fato de uma planta sombrear a outra, dependendo do sentido de plantio, além do próprio auto-sombreamento e do efeito "guarda-chuva", em que os ramos do terço superior sobrepõem aos ramos dos terços de baixo. Bicalho et al. (2005), verificaram que a parte da planta que estava exposta ao sol da tarde, apresentou menor crescimento de ramos e de folha, mostravam também maiores temperaturas, baixas taxas fotossintética e transpiratória.

Essa situação resulta em um controle endógeno influenciado pelo clima, conferindo um crescimento assíncrono, onde algumas partes estão em processo de crescimento enquanto outras estão sofrendo desfolha ocasionada pelo dano foliar. A partir dessas observações, pode-se concluir que as plantas na linha de café, associadas à face de exposição solar norte e sul, demonstram comportamentos distintos em resposta à incidência da geada, evidenciando uma maior porcentagem de danos na face sul da linha de plantio.

Com relação ao NFL e NFR (Tabela 4), nota-se que na amostra observada a face Norte apresenta maiores valores, no entanto, essa diferença não foi significativa ao nível de 5% de significância. Mas, cabe salientar que os valores-p observados foram próximos a 5%, indicando

que, se fosse considerado um maior nível de significância, por exemplo 10%, poderia considerar a existência de diferença entre as faces sul e norte, pelo teste U de Mann-Whitney.

Como houve diferenças significativas para o dano nas plantas de oito anos, verificou-se como foi o efeito nas diferentes zonas de risco (alto e baixo risco) (Tabela 5). Na área de alto risco climático de oito anos houve diferença na incidência de danos foliares e diferença no número de folhas entre as faces de exposição solar. As plantas de oito anos localizadas na área de alto risco não apresentaram flores e nem frutos.

Tabela 5 – Resultados do teste U de Mann-Whitney para distribuições não paramétricas avaliando a existência de diferenças significativas entre as faces sul e norte analisadas, para as plantas de oito anos na localização de alto risco.

Plantas de oito anos (Alto Risco)				
	Face	U	Valor-p	Decisão
NF	Norte Sul	1313	> 0,05	Rejeita H0
NR	Norte Sul	1112	0,40	Não rejeita H0
NFL	Norte Sul	-	-	-
NFR	Norte Sul	-	-	-
NDVI	Norte Sul	786	0,12	Não rejeita H0
MCARI1	Norte Sul	723	0,40	Não rejeita H0
MCARI2	Norte Sul	760	0,21	Não rejeita H0
MSR	Norte Sul	785	0,12	Não rejeita H0
MTCI	Norte Sul	627	0,81	Não rejeita H0
OSAVI	Norte Sul	779	0,14	Não rejeita H0
RECI	Norte Sul	612	0,69	Não rejeita H0
SAVI	Norte Sul	756	0,22	Não rejeita H0
Danos	Norte Sul	1862,5	> 0,05	Rejeita-se H0

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 6 – Resultados do teste U de Mann-Whitney para distribuições não paramétricas avaliando a existência de diferenças significativas entre as faces sul e norte analisadas, para as plantas de oito anos na localização de baixo risco.

Plantas de oito anos (Baixo Risco)				
	Face	U	Valor-p	Decisão
NF	Norte Sul	893	0,33	Não rejeita H0
NR	Norte Sul	1067,5	0,65	Não rejeita H0
NFL	Norte Sul	20,5	0,07	Não rejeita H0
NFR	Norte Sul	20	0,06	Não rejeita H0
NDVI	Norte Sul	705	0,52	Não rejeita H0
MCARI1	Norte Sul	718	0,43	Não rejeita H0
MCARI2	Norte Sul	715	0,45	Não rejeita H0
MSR	Norte Sul	711	0,48	Não rejeita H0
MTCI	Norte Sul	609	0,66	Não rejeita H0
OSAVI	Norte Sul	720	0,42	Não rejeita H0
RECI	Norte Sul	577	0,42	Não rejeita H0
SAVI	Norte Sul	708	0,50	Não rejeita H0
Danos	Norte Sul	1487,5	> 0,05	Rejeita-se H0

Fonte: Do autor (2023).

Os resultados observados na Tabela 5 e 6 destacam uma forte associação entre os danos causados pela geada e as características topográficas do plantio de café. Especificamente, no plantio de oito anos, na área identificada como de alto risco climático, os danos são mais evidentes nas faces de exposição solar norte e sul das plantas, ao longo da linha de plantio.

De acordo com Camargo e Camargo (2004), fatores topográficos exercem uma influência crucial na circulação e movimentação do ar, como o ar frio é mais denso do que o ar quente, em terrenos inclinados, o ar frio, que se acumula na superfície do solo durante a noite devido à perda de calor, tende a fluir para baixo e se acumular em depressões ou vales. Portanto,

é razoável antecipar a ocorrência mais frequente de geadas nesses terrenos mais baixos, resultando em danos foliares mais severos nas plantas situadas nessa zona.

À medida que o ar desce, sua temperatura diminui. Esse fluxo descendente de ar frio pode ser eficientemente barrado por barreiras físicas. Na área de estudo, foram observadas características topográficas ao redor do plantio que podem ter contribuído para o represamento do ar frio na parte inferior da encosta. Além disso, a exposição solar na linha de plantio desempenhou um papel significativo no aumento dos danos na face sul, onde o sol da manhã não atinge diretamente, criando assim um microclima propício para danos foliares mais intensos.

Quando as plantas são submetidas a temperaturas de congelamento por longos períodos, a formação de cristais de gelo extracelulares gera um processo contínuo de transferência de água do meio intracelular para a região extracelular, causando desidratação do protoplasto e congelamento do conteúdo intracelular. A formação de cristais de gelo no interior das células causa danos extensos, geralmente letais (TAIZ; ZEIGER, 2009). Estudos realizados, principalmente com referência aos aspectos microclimáticos, destacando-se a escolha de local com microclima adequado, tais como, a face de exposição e inclinação do terreno, e configurações da topografia operações (CARAMORI; MANETTI FILHO, 1993; FAHL et al., 2000).

Líquidos extracelulares são mais pobres em solúveis sólidos do que os líquidos intracelulares e, portanto, tendem a congelar mais facilmente. Líquidos intracelulares podem vaziar e formar cristais de gelo extracelulares. O citoplasma pode encolher e se distanciar da parede da célula - este fenômeno, conhecido como plasmólise, é irreversível e leva à morte da célula. Em casos graves, as células podem ser esmagadas pela pressão do gelo extracelular cristais (CAMARGO, 2010).

Em resumo, os resultados apresentados destacam a importância das características topográficas e da exposição solar na manifestação e intensidade dos danos causados pela geada no plantio de café, especialmente em áreas de alto risco climático. A relação entre a orientação das faces de exposição solar e a linha de plantio de oito anos revelou-se crucial, com danos mais acentuados nas faces sul.

A presença de características topográficas ao redor do plantio e a exposição solar desempenhou um papel essencial, criando microclimas propícios para danos mais intensos, especialmente na face sul, onde o sol da manhã não incide diretamente. Recomenda-se, portanto, uma escolha criteriosa do local de plantio, levando em conta a orientação e inclinação

do terreno. Os resultados deste estudo oferecem uma base sólida para entender os fatores que influenciam a suscetibilidade do cafezal à geada, proporcionando informações valiosas para práticas de manejo e seleção de locais propícios ao plantio, visando a mitigação dos impactos causados por eventos de geada.

3 CONCLUSÃO

Com base nos resultados foi possível observar influência da face de exposição e idade da planta sobre os danos por geada no café. Nas plantas de oito anos, observou-se que a face de exposição solar Sul do cafeeiro, ao longo da linha de plantio, foi associada a níveis elevados de danos causados pela geada, resultando em uma redução no número de folhas, flores e frutos. Em contraste, nas plantas de um e dois anos, a face de exposição solar Norte/Sul, ao longo da linha de plantio, não teve um impacto significativo nos danos causados pela geada.

Este estudo mostrou a importância de considerar as variações no microclima dos sistemas de produção de café em função da idade das plantas e da face de exposição da planta ao sol. Em virtude do maior sombreamento, redução da temperatura e risco de danos por geada nas plantas com face voltadas ao Sul, recomenda-se evitar o cultivo do café na orientação Norte/Sul, bem como deve-se evitar áreas de baixada onde o ar frio se acumula.

REFERÊNCIAS

- ALVES, A. R., et al. Determinação analítica dos instantes do 'nascer' e do 'pôr do sol' para superfícies inclinadas quaisquer. **Revista Ciência e Cultura**, v. 35, n. 2, p. 194-198, 1983.
- ANDROCIOLI FILHO, A. et al. Frost injury and performance of coffee at 23°S in Brazil. **Experimental Agriculture**, v. 22, n. 1, p. 71-74, 1986. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:86775096>.
- BICALHO, D. et al. Direcionamento das linhas de plantio em diferentes orientações cardeais e seus reflexos sobre a produtividade de cafeeiros. *In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*, v. 4., 2005, Londrina, PR. **Anais**. Brasília: Embrapa-Café, 2005. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/50185/1/Direcionamento-das-linhas.pdf>.
- BOSELTMANN, A. S. et al. The influence of shade trees on coffee quality in small holder coffee agroforestry systems in Southern Colombia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 129, n. 253–260, 2009. Disponível em:
- CAMARGO M. B. P de. The impact of climatic variability and climate change on Arabic coffee crop in Brazil. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 1, p. 239-247, 2010.
- CAMARGO, P.; CAMARGO, M. B. Frost in Coffee Crops: Frost Characteristics, Damaging Effects on Coffee and Alleviation Options. *In Coffee: Growing, Processing, Sustaining Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders, and Researchers* (Ebook: ed. 1 ed., cap 11, p. 355-369, 2004. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527619627.ch11>.
- CARAMORI, P.H.; MANETTI FILHO J. Proteção dos cafeeiros contra geadas. IAPAR, **Circular Técnica**, v. 79, n. 28, p.1993. Disponível em: http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/publicacoes_tecnicas/protgeada.pdf.
- CARELLI, M. L. C. et al. Densidade de fluxo de seiva em plantas de café (*Coffea arábica* L.) em diferentes regimes de água e de irradiância. *In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*, 1., 2000, Poços de Caldas, MG. **Resumos expandidos**. Brasília, D.F.: Embrapa Café; Belo Horizonte: Minasplan, 2000. v. 2, p. 1490, 2000. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/766>.
- CASSIA, M. T. et al. Quality of mechanized coffee harvesting in circular planting system. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 1, p. 28-34, 2013.
- CHAVES, A. R. M. et al. Varying leaf-to-fruit ratios affect branch growth and dieback, with little to no effect on photosynthesis, carbohydrate or mineral pools, in different canopy positions of field-grown coffee trees. **Environmental and Experimental Botany**, v.77, p. 207-218, 2012.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de café. Brasília, **Segundo levantamento - Safra 2023**. v. 10, n. 2, p. 1-44, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe>.

FAHL, J. I. et al. Densidade de fluxo de seiva em plantas de café (*Coffea arabica* L.) submetidas a baixas temperaturas e diferentes regimes de irradiância. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 1., 2000, Poços de Caldas, MG. **Resumos expandidos**. Brasília, D.F.: Embrapa Café; Belo Horizonte: Minasplan, v. 2, p. 1490, 2000. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/698>.

FERNANDES, A.L.T.; PARTELI, F.L.; BONOMO, R.; GOLYNSKI, A. A moderna cafeicultura dos cerrados brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, p. 231-240, 2012.

FERRAZ, G. A. et al. Variabilidade espacial da força de desprendimento de frutos do cafeeiro. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 6, p. 1210-1223, 2014.

FERREIRA, D. S. et al. Association of Altitude and Solar Radiation to Understand Coffee Quality. **Agronomy**, v. 12, p. 1885, 2022.

FERREIRA, D. S. et al. Exploring the multivariate technique in the discrimination of *Coffea arabica* L. cultivars regarding the production and quality of grains under the effect of water management. **Euphytica**, v. 217, n. 118, 2021.

HOLMGREN, M. Combined effects of shade and drought on tulip poplar seedlings: trade-off in tolerance or facilitation? **Oikos**, v. 90, p. 67-78, 2003.

International Coffee Organization (ICO), 2023. Coffee Report and Outlook April 2023. Disponível em: https://icocoffee.org/documents/cy2022-23/Coffee_Report_and_Outlook_April_2023_-_ICO.pdf.

MARIN, D. B. et al. Sensoriamento remoto espectral na identificação e mapeamento de variáveis bióticas e abióticas do cafeeiro. **Revista Ceres**, v. 66 n. 2, p. 142-153, 2019. (B).

MARIN, D. B. et al. Unmanned aerial vehicle to evaluate frost damage in coffee plants. **Precision Agriculture**, v. 22, p. 1845-1860, 2021. (A).

MARIUCCI JUNIOR, V. et al. Resistance to frost in Arabica coffee lines introgressed with *Coffea racemosa* Lour. Genes. **American Journal of Coffee Science**, v. 16, n. 0, p. 338-342, 2022.

MATIELLO, J. B. et al. **Cultura de café no Brasil: manual de recomendações**, Rio de Janeiro: MAPA/Procafé; Varginha: **Fundação Procafé**, p. 546, 2010.

MONTEIRO, José Eduardo BA (Ed.). Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Instituto Nacional de Meteorologia--INMET, 2009.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. "QGIS Geographic Information System." **Open Source Geospatial Foundation Project: Beaverton, OR, USA**, 2018.

RONCHI, C. P. et al. Morfologia radicular de cultivares de café arábica submetidas a diferentes arranjos espaciais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 3, p. 187-195, 2015.

SANTINATO, F. et al. Direcionamento de plantio, exposição solar e suas implicações no cafeeiro. **Nota técnica**, 2020.

SODERHOLM, P. K.; GASKINS, M. H. Evaluation of cold resistance in the genus *Coffea*. Proceedings of the Caribbean Region. **American Society for Horticultural Science**. VIII. Annual Meeting, Puerto Rico, v. 4, p. 8-15, 1960.

TAIZ L; ZEIGER E. Fisiologia do Estresse: resfriamento e congelamento. In: Taiz L and Zeiger E (ed.). *Fisiologia Vegetal*. Artmed, Porto Alegre, p. 738-774, 2009.