

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

MANUELLE DE FREITAS GALVÃO

**SENSORIAMENTO REMOTO PARA IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM
CULTURA DE EUCALIPTO**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2024**

MANUELLE DE FREITAS GALVÃO

**SENSORIAMENTO REMOTO PARA IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM
CULTURA DE EUCALIPTO**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheira Agrícola e Ambiental.

Orientador: Domingos Sárvio M. Valente

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2024**

MANUELLE DE FREITAS GALVÃO


**SENSORIAMENTO REMOTO PARA IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM
CULTURA DE EUCALIPTO**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheira Agrícola e Ambiental.


Orientador: Domingos Sárvio M. Valente

APROVADA: 05 de setembro de 2024.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **MANUELLE DE FREITAS GALVAO**
Data: 13/09/2024 19:35:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Manuelle de Freitas Galvão
Autora

Documento assinado digitalmente
 **DOMINGOS SARVIO MAGALHAES VALENTE**
Data: 16/09/2024 09:32:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Domingos Sárvio Magalhães Valente
Orientador

RESUMO

GALVÃO, Manuelle de Freitas, Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2024. **Sensoriamento remoto para identificação de falhas na cultura do eucalipto.** Orientador: Domingos Sárvio Magalhães Valente.

Com esse estudo foi possível investigar a eficácia do uso de imagens de satélite para identificar e delimitar falhas em áreas de silvicultura, com foco em como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) pode aprimorar o monitoramento florestal. Objetivou-se avaliar a capacidade das imagens de satélite em detectar diferentes tipos de falhas e comparar esses resultados com informações obtidas em campo. A metodologia incluiu a análise de imagens de satélite do *China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS) 4A*, processamento das imagens com software *ArcGIS Pro* e comparação com dados fotográficos das áreas, além do cálculo de NDVI. Foram analisadas quadras de eucalipto em três fazendas no estado de São Paulo, categorizando falhas em plantio, saúde, manejo, ambientais e por competição. Foi utilizado também o teste Qui-Quadrado para verificar a associação entre áreas de falhas vetorizadas e NDVI. A comparação entre imagens de satélite e fotografias aéreas confirmou que, em muitos casos, as falhas detectadas pelo NDVI corresponderam às observadas em campo. Contudo, a resolução temporal das imagens e as condições climáticas podem influenciar a precisão da detecção. Foi concluído que, apesar das limitações, o NDVI e as imagens de satélite gratuitas são recursos valiosos para o monitoramento de falhas em plantios florestais, com a necessidade de refinamentos e possíveis complementos para melhorar a precisão da detecção.

Palavras-chave: Falhas. Geoprocessamento. Índice de Vegetação. NDVI.

ABSTRACT

GALVÃO, Manuelle de Freitas, Universidade Federal de Viçosa, September 2024. **Remote sensing to identify failures in eucalyptus crops.** Advisor: Domingos Sárvio Magalhães Valente.

With this study, it was possible to investigate the effectiveness of using satellite images to identify and delineate failures in forestry areas, focusing on how the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) can enhance forest monitoring. The aim was to assess the ability of satellite images to detect different types of failures and compare these results with field data. The methodology included analyzing images from the China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS) 4A, processing the images with ArcGIS Pro software, and comparing them with photographic data of the areas, as well as calculating NDVI. Eucalyptus plots were analyzed in three farms in the state of São Paulo, categorizing failures into planting, health, management, environmental, and competition issues. The Chi-Square test was also used to verify the association between vectorized failure areas and NDVI. The comparison between satellite images and aerial photographs confirmed that, in many cases, failures detected by NDVI matched those observed in the field. However, the temporal resolution of images and weather conditions can influence detection accuracy. It was concluded that, despite the limitations, NDVI and free satellite images are valuable resources for monitoring failures in forest plantations, with a need for refinements and possible supplements to improve detection accuracy.

Keywords: Failures. Geoprocessing. Vegetation Index. NDVI.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	6
2 MATERIAL E MÉTODOS	8
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	12
3.1 Análise das quadras	12
3.2 Comparação geral entre as quadras	23
3.3 Análise estatística: Teste Qui-Quadrado	26
3.4 Discussão geral	27
4 CONCLUSÃO	29
REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro desempenha um papel crucial para a economia do Brasil, englobando a produção de celulose, bioenergia, pisos laminados e painéis de madeira. Em 2022, o agronegócio florestal representou 1,3% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, a maior porcentagem desde 2012 (IBÁ, 2023).

O eucalipto é a principal matéria-prima do setor florestal, com mais de 7 milhões de hectares plantados em 2022, sendo a Região Sudeste a que possui a maior porcentagem dessas áreas com cerca de 46% (IBÁ, 2023). No estado de São Paulo, foram registrados 1,2 milhão de hectares, dos quais 80% são de eucalipto, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022). De acordo com a FLORESTAR - SÃO PAULO (2024), as áreas de florestas plantadas estão presentes em 76% dos municípios paulistas. A meta do Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas, de acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2018), é adicionar mais 2 milhões de hectares de florestas comerciais até 2030.

A qualidade do manejo florestal e a saúde das florestas são monitoradas ao longo do ciclo de crescimento, com atenção especial para as florestas jovens, que são susceptíveis a danos como ataques de formigas, bacteriose e competição com outras plantas (COUTINHO *et al.*, 2011). Os danos mais severos podem ser classificados como falhas para áreas menores danificadas ou reboleiras, para áreas maiores danificadas e podem ser causadas por pragas e doenças, estresse hídrico, erosão, geada, adubação insuficiente e daninhas. As falhas foram categorizadas em cinco grupos: falhas de plantio, falhas por saúde, falhas de manejo, falhas ambientais e falhas por competição. As falhas de plantio incluem problemas como o replantio tardio, resultando em desuniformidade no crescimento das árvores. As falhas por saúde envolvem a presença de pragas e doenças, como formigas, que comprometem a vitalidade das árvores e seu desenvolvimento. As falhas de manejo referem-se a práticas inadequadas, como irrigação insuficiente, adubação inadequada e aplicação incorreta de herbicidas, que afetam negativamente o crescimento das plantas. As falhas ambientais são causadas por fatores como erosão do solo, geadas e estresse hídrico. Finalmente, as falhas por competição resultam da presença de plantas daninhas que competem com as árvores por recursos essenciais como luz, água e nutrientes.

O uso do geoprocessamento permite uma visualização detalhada da condição das florestas, além de aprimorar as atividades em campo (WERNEBURG, 2015). O sensoriamento remoto, por meio de imagens de satélite, possibilita a análise abrangente e precisa das florestas,

aproveitando informações espectrais para avaliar mudanças e o uso do solo ao longo dos anos (GERVÁSIO, 2021). Um dos produtos do sensoriamento remoto utilizados na análise de desenvolvimento de culturas é o Índice de Vegetação (NDVI), sendo amplamente utilizado como em PEDRALI et al. (2019), BERRA et al. (2012) e BORGES et al. (2018), para entender o comportamento espectral e saúde da floresta, além de identificar a presença de vegetação (BRAZ *et al.*, 2015).

Aliando o uso de índices de vegetação com análises de qualidade do manejo pode-se minimizar a ocorrência de falhas e reboleiras com acompanhamento da saúde dessas florestas. Pode-se identificar danos previamente, sendo possível uma mudança de manejo, aplicação de defensivos agrícolas ou poda antes que se tornem mais prejudiciais e irreversíveis, sendo inviável a recuperação da área de manejo (MELO, 2017).

Diante da crescente necessidade de métodos ágeis para o monitoramento e avaliação de áreas florestais com maior frequência, visou-se avaliar a eficácia do uso de imagens de satélite na identificação e delimitação de falhas em áreas de silvicultura. Objetivou-se com o presente estudo identificar falhas ambientais, por saúde e por competição por meio de imagens de satélite, desenvolver uma metodologia de processamento e análise dessas imagens. Com isso, busca-se fornecer uma abordagem mais eficiente para o monitoramento e gestão das áreas de silvicultura, aproveitando o potencial das tecnologias de sensoriamento remoto para melhorar a detecção e a vetorização de falhas.

total da quadra, esta é classificada como insatisfatória. O estudo concentrou-se em áreas que apresentaram essa classificação, caracterizadas por falhas severas ou reboleiras, resultando em uma estrutura florestal heterogênea. As fazendas selecionadas contavam com registros fotográficos das falhas e reboleiras observadas, embora tais áreas não tenham sido medidas, foram utilizadas para apoiar a análise, servindo como referência visual. Os dados como data de monitoramento, idade da floresta e possível ocorrência de falha foram fornecidos pela empresa, visando identificar e analisar possíveis falhas no plantio. As quadras escolhidas foram categorizadas pela empresa como falhas por competição, por saúde e ambientais, visto que foi percebido durante o monitoramento a presença de daninhas, bacteriose, formigas e erosão. As informações das quadras selecionadas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados das fazendas e quadras selecionadas análise de falhas

Unidade	Fazenda	Quadra	Data plantio	Data monitoramento	Data imagem	Idade	Tipo de falha	Causa raiz
Agudos	A	0040A	22/11/2022	05/02/2024	01/01/2024	1,11	Competição / Ambiental	Daninhas / Erosão
Agudos	A	0040B	22/11/2022	05/02/2024	01/01/2024	1,11	Competição	Daninhas
Agudos	A	0041	24/11/2022	05/02/2024	01/01/2024	1,10	Competição	Daninhas
Agudos	A	0044B	21/11/2022	05/02/2024	01/01/2024	1,11	Competição	Daninhas
Agudos	A	0044C	25/11/2022	05/02/2024	01/01/2024	1,10	Competição	Daninhas
Agudos	B	0006	06/07/2023	18/07/2024	09/06/2024	0,93	Saúde	Formigas
Agudos	B	0021	03/07/2023	18/07/2024	09/06/2024	0,94	Competição	Daninhas
Itapetininga	C	0112U	19/06/2023	19/06/2024	19/06/2024	1,00	Competição	Daninhas
Itapetininga	C	0205	13/06/2023	19/06/2024	19/06/2024	1,02	Saúde	Bacteriose
Itapetininga	C	0212	15/06/2023	19/06/2024	19/06/2024	1,01	Saúde	Bacteriose

Fonte: Autora.

As imagens de satélite do CBERS 4A (INPE, 2019) foram obtidas para as áreas selecionadas, com cenas em datas próximas ao monitoramento das quadras, sendo elas: CBERS_4A_WPM_20240101_207_141_L4; CBERS_4A_WPM_20240609_206_141_L4; CBERS_4A_WPM_20240619_204_143_L4. O processamento das imagens foi conduzido usando o *software ArcGIS Pro*. As imagens foram processadas para gerar composições específicas: a composição RGB foi feita utilizando as bandas Vermelho (banda 3), Verde (banda 2) e Azul (banda 1), com resolução espacial de 8 metros, o que proporcionou imagens em cores naturais que facilitam a interpretação visual; a Figura 2 ilustra uma composição RGB.

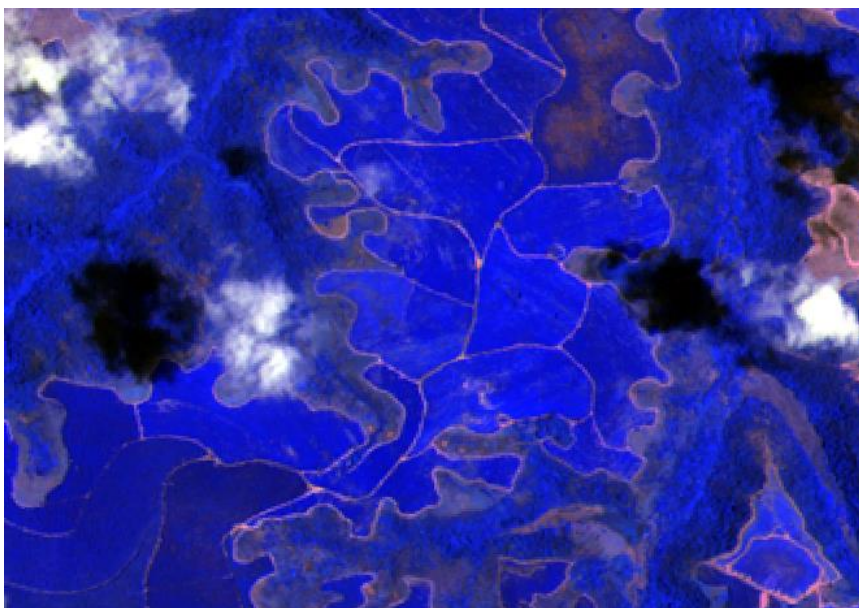
Figura 2 – Imagem em composição RGB (*Red, Green e Blue*)



Fonte: Autora.

Para aprimorar a análise da vegetação, foi utilizada a composição RG-NIR, que combina as bandas Vermelho (banda 3), Verde (banda 2) e Infravermelho Próximo (banda 4), também com resolução espacial de 8 metros. A combinação com o Infravermelho Próximo permite uma visualização mais detalhada das condições da vegetação. Pela Figura 3 é apresentada um exemplo de composição RG-NIR.

Figura 3 – Imagem em composição RG-NIR (*Red, Green e Near Infrared*)



Fonte: Autora.

Em vista das pequenas áreas (1 a 13 hectares), foi realizado o processo de *pansharpening*, utilizando a banda pancromática (banda 0), com resolução espacial de 2 metros, e fundindo com a imagem de resolução espacial de 8 metros. Segundo OUZEMOU et al. (2018), o método de *pansharpening* consiste em simular a banda pancromática de alta resolução a partir das bandas multiespectrais de menor resolução espacial. Adicionalmente, foi realizada a conversão de datum das imagens do sistema de coordenadas planas WGS 84 *Universal Transverse Mercator* (UTM) para o sistema de coordenadas planas SIRGAS 2000 UTM, garantindo a compatibilidade e a precisão espacial das análises. O processamento também incluiu o recorte das imagens conforme as áreas de interesse e o georreferenciamento para assegurar o alinhamento das imagens com o terreno real.

Após o geoprocessamento inicial das imagens, por meio da fotointerpretação das imagens foi criada uma camada vetorial no *software ArcGIS Pro* para delinear os contornos das falhas identificadas nas composições RGB e RG-NIR com resoluções espaciais de 2 metros, a fim de calcular a área afetada. Paralelamente, foi realizado o cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), expresso pela Equação 1 e proposto por Rouse *et al.* (1973), utilizando a composição RG-NIR para cada quadra. Conforme metodologia adotada pelo setor de qualidade, foi aplicado um *buffer* de 10 metros a partir das bordas das quadras. O *raster* resultante do NDVI foi reclassificado com o objetivo de obter a área e a porcentagem das classes, conforme definidas pelo método de classificação *natural breaks*, também conhecido como Algoritmo de *Jenks*, aplicado ao NDVI.

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

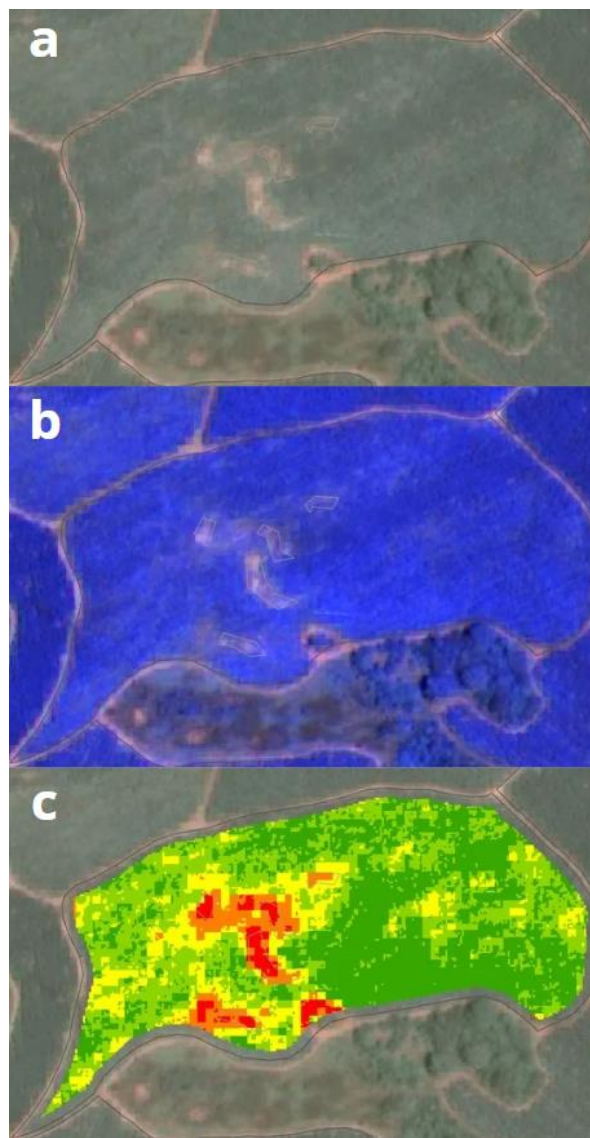
Obtido o NDVI foi realizado a sobreposição da camada vetorial de delimitação das falhas com o *raster* NDVI. Esta sobreposição teve o objetivo de verificar a correspondência entre as áreas identificadas manualmente e as áreas de menor NDVI, além de confirmar se as áreas com menor classe de NDVI representam mais de 3% da área total das quadras. As imagens fornecidas pela empresa foram utilizadas para apoiar a análise, servindo como referência visual. Para avaliar a correspondência entre as áreas vetorizadas manualmente e as áreas das classes com menor NDVI em cada quadra foi aplicado o teste qui-quadrado para comparação de proporções. O teste qui-quadrado foi utilizado para determinar se a diferença entre as proporções das áreas era estatisticamente significativa, ou seja, se havia associação entre as áreas vetorizadas e as áreas do menor intervalo do NDVI (PETERNELLI, 2020). A análise foi feita utilizando o programa R.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise das quadras

As falhas vetorizadas e o NDVI calculado para a quadra 0040A da Fazenda A são apresentados na Figura 4, enquanto o registro fotográfico correspondente está na Figura 5. Observa-se na Figura 4 que as falhas vetorizadas coincidem com as regiões de NDVI mais baixo. Ao visualizar a Figura 5, nota-se a presença de erosões e daninhas na quadra.

Figura 4 – Composições (a) RGB e (b) RG-NIR com falhas vetorizadas e (c) NDVI para a quadra 0040A da Fazenda A



Fonte: Autora.

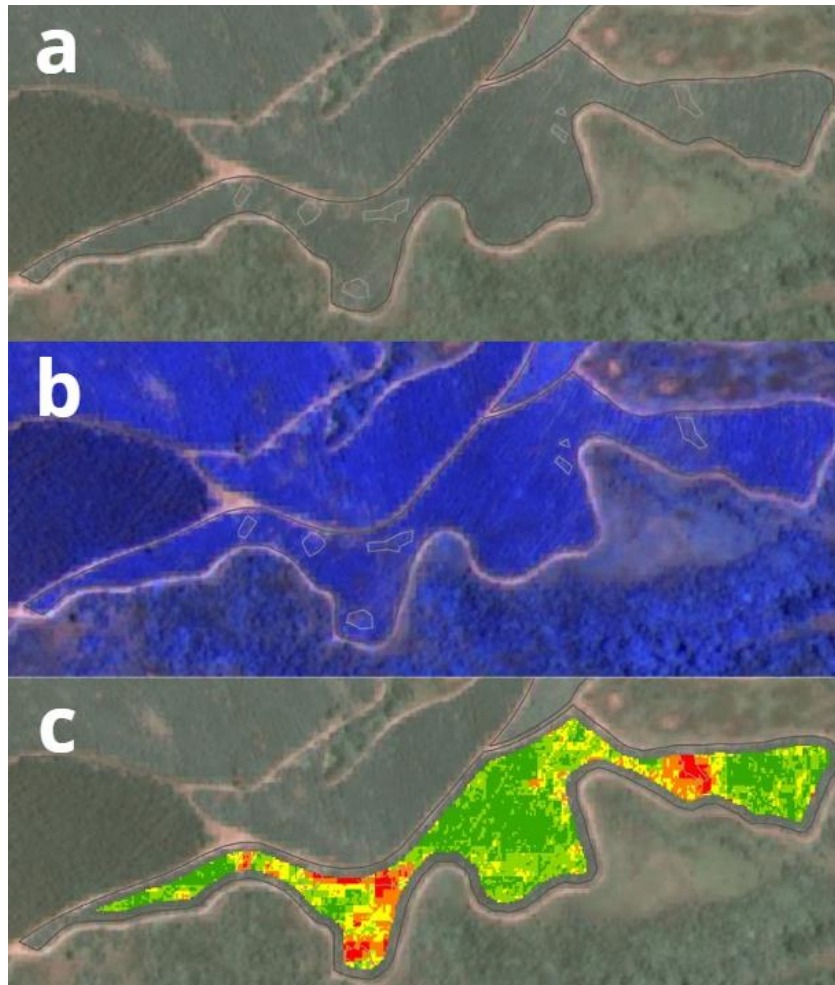
Figura 5 – Imagem aérea da quadra 0040A da Fazenda A



Fonte: Autora.

As falhas vetorizadas e o NDVI apresentados na Figura 6 para a quadra 0040B da Fazenda A, enquanto mostra-se na Figura 7 o registro fotográfico correspondente. Observa-se na Figura 6 que as falhas vetorizadas coincidem com áreas de NDVI mais baixo. Ao analisar a Figura 7, verifica-se a presença de daninhas, que resultaram em falhas e heterogeneidade na floresta.

Figura 6 – Composições (a) RGB e (b) RG-NIR com falhas vetorizadas e (c) NDVI para a quadra 0040B da Fazenda A



Fonte: Autora.

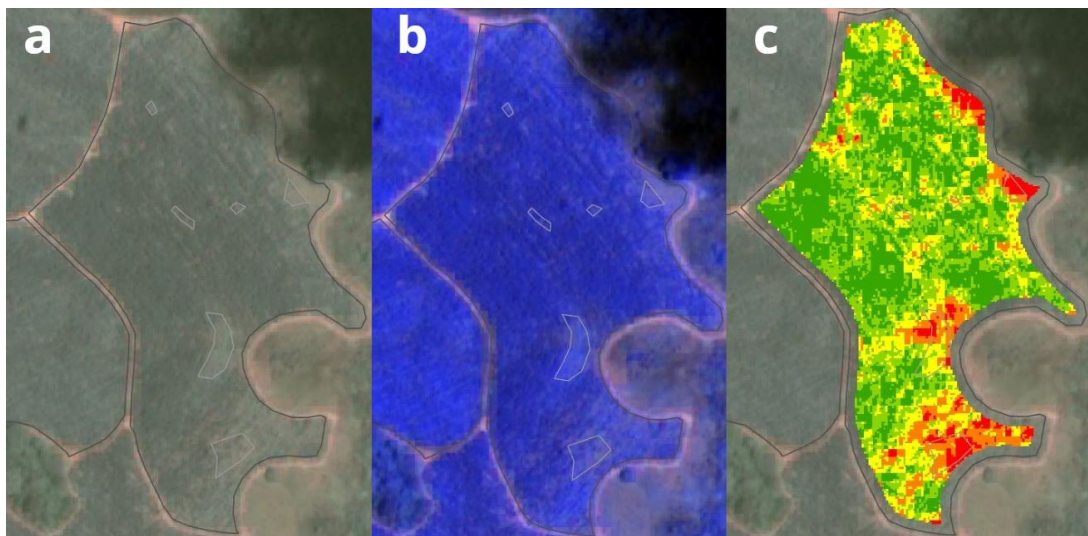
Figura 7 – Imagem aérea da quadra 0040B da Fazenda A



Fonte: Autora.

Para a quadra 0041 da Fazenda A, as falhas vetorizadas e o NDVI são apresentados na Figura 8, e a imagem aérea consta na Figura 9. A Figura 8 evidencia que as falhas vetorizadas estão concentradas nas áreas de menor NDVI. Na Figura 9, pode-se identificar a presença de falhas devido à competição de daninhas.

Figura 8 – Composições (a) RGB e (b) RG-NIR com falhas vetorizadas e (c) NDVI para a quadra 0041 da Fazenda A



Fonte: Autora.

Figura 9 – Imagem aérea da quadra 0041 da Fazenda A

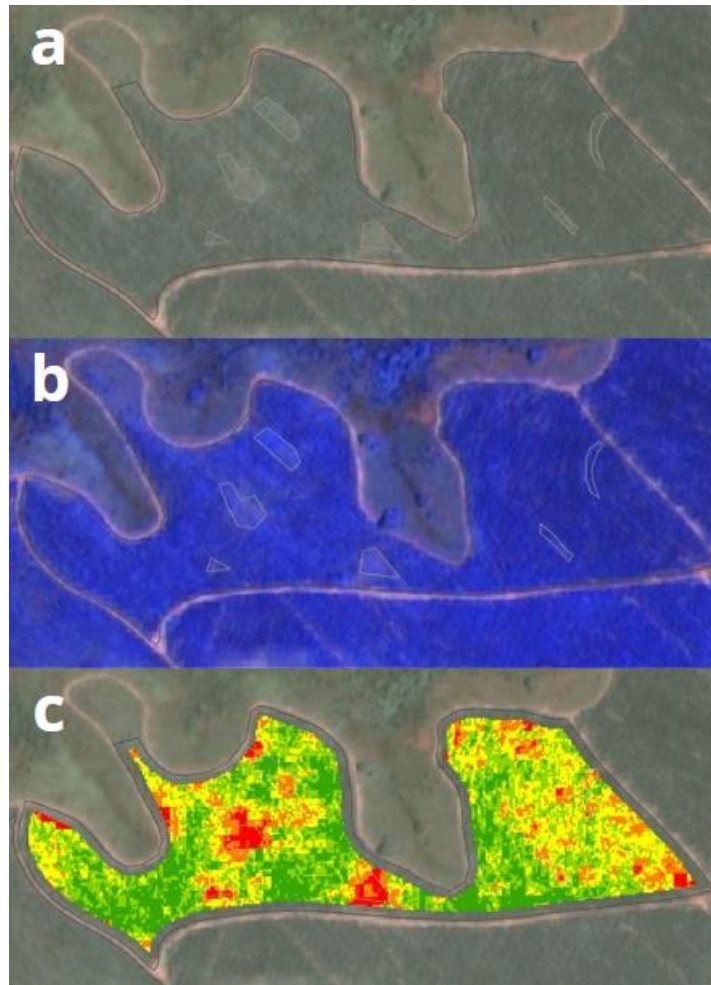


Fonte: Autora.

As falhas vetorizadas e o NDVI calculado para a quadra 0044B da Fazenda A são

apresentados na Figura 10, com o registro fotográfico na Figura 11. Na análise da Figura 10, verifica-se que as falhas vetorizadas coincidem com regiões de NDVI mais baixo. A Figura 11 revela a ocorrência de falhas pontuais, atribuídas a daninhas no início da rotação.

Figura 10 – Composições (a) RGB e (b) RG-NIR com falhas vetorizadas e (c) NDVI para a quadra 0044B da Fazenda A



Fonte: Autora.

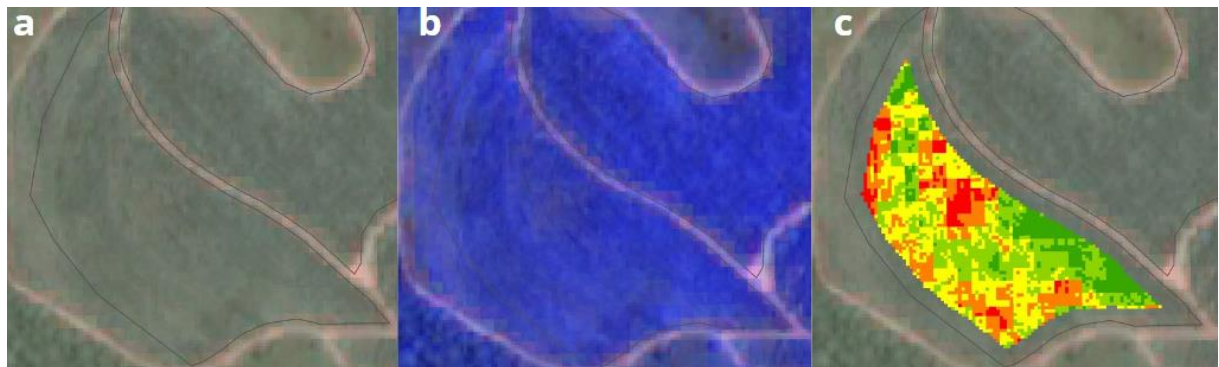
Figura 11 – Imagem aérea da quadra 0044B da Fazenda A



Fonte: Autora.

A Figura 12 apresenta o NDVI calculado para a quadra 0044C da Fazenda A, enquanto a Figura 13 traz o registro fotográfico. Embora as falhas não sejam identificáveis na composição RGB, a análise da Figura 12 mostra que, na composição RG-NIR algumas áreas apresentam coloração azul diferente, indicando anomalias. O NDVI também aponta regiões com árvores não saudáveis. A Figura 13 confirma a presença de falhas espalhadas pela quadra.

Figura 12 – Composições RGB, RG-NIR e NDVI para a quadra 0044C da Fazenda A



Fonte: Autora.

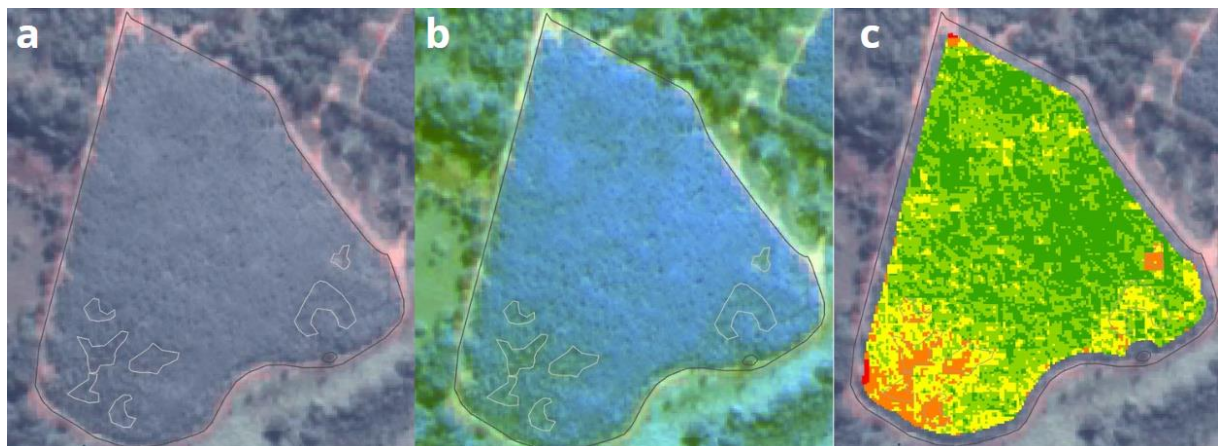
Figura 13 – Imagem aérea da quadra 0044C da Fazenda A



Fonte: Autora.

A Figura 14 apresenta as falhas vetorizadas e o NDVI calculado para a quadra 0006 da Fazenda B, enquanto a Figura 15 traz o registro fotográfico. Na análise da Figura 14, verifica-se que as falhas vetorizadas correspondem às regiões de NDVI mais baixo. A Figura 15 evidencia a ocorrência de falhas significativas, atribuídas ao ataque de formigas no início da rotação.

Figura 14 – Composições (a) RGB e (b) RG-NIR com falhas vetorizadas e (c) NDVI para a quadra 0006 da Fazenda B



Fonte: Autora.

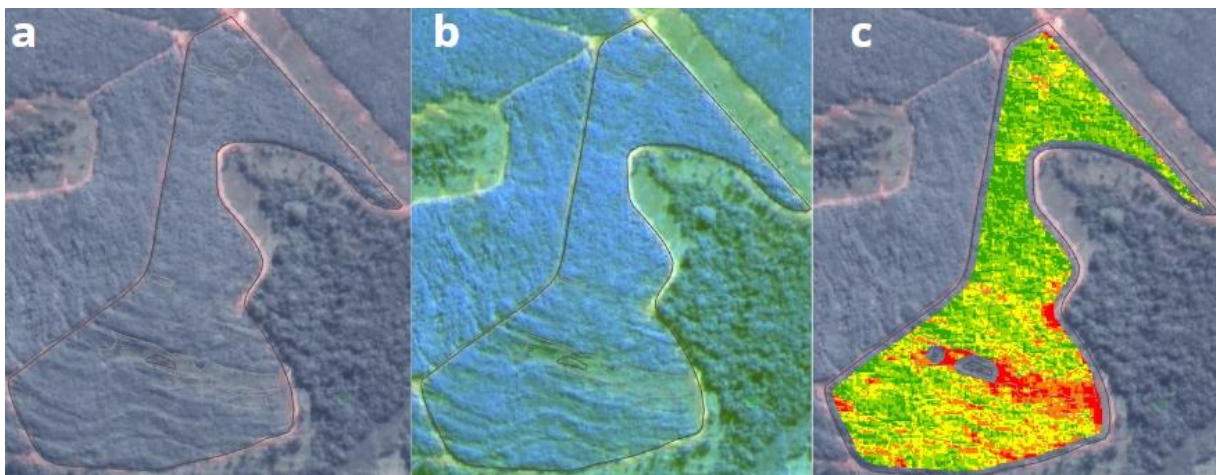
Figura 15 – Imagem aérea da quadra 0006 da Fazenda B



Fonte: Autora.

A Figura 16 apresenta as falhas vetorizadas e o NDVI calculado para a quadra 0021 da Fazenda B, com a Figura 17 mostrando o registro fotográfico. A Figura 16 revela que as falhas vetorizadas coincidem com áreas de NDVI mais baixo, embora, em algumas regiões, as daninhas se misturem com o eucalipto, dificultando a visualização em composição RGB. A Figura 17 destaca a presença de reboleiras causadas pela competição de mato.

Figura 16 – Composições (a) RGB e (b) RG-NIR com falhas vetorizadas e (c) NDVI para a quadra 0021 da Fazenda B



Fonte: Autora.

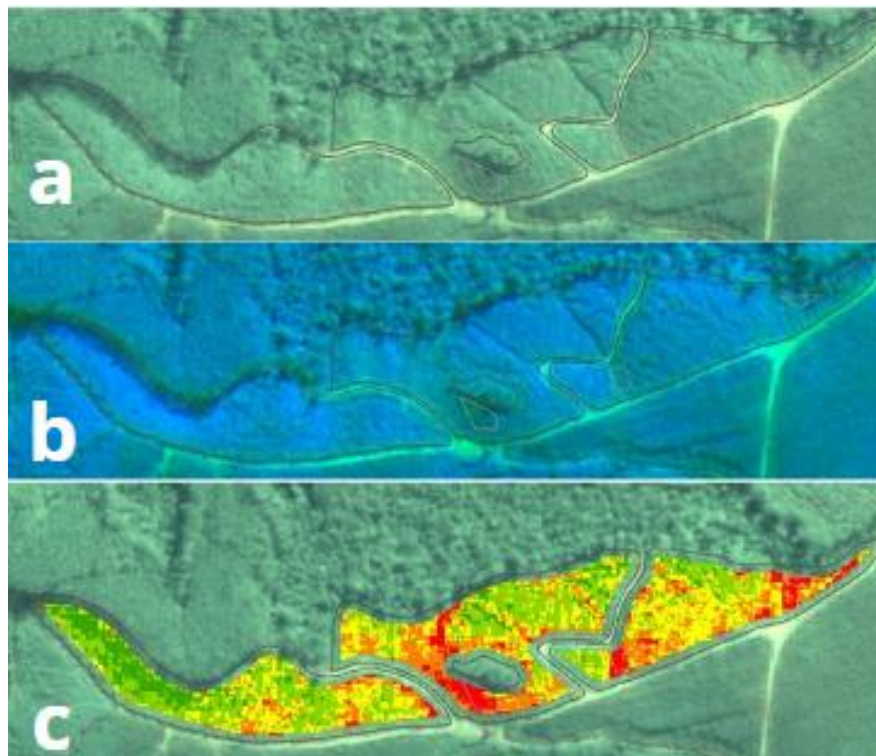
Figura 17 – Imagem aérea da quadra 0021 da Fazenda B



Fonte: Autora.

Para a quadra 0112U da Fazenda C, as falhas vetorizadas e o NDVI calculado são apresentados na Figura 18, com a imagem aérea na Figura 19. A Figura 18 mostra que as falhas vetorizadas correspondem às regiões de NDVI mais baixo. A Figura 19 destaca a presença de falhas representativas, associadas à proliferação de daninhas.

Figura 18 – Composições (a) RGB e (b) RG-NIR com falhas vetorizadas e (c) NDVI para a quadra 0112U da Fazenda C



Fonte: Autora.

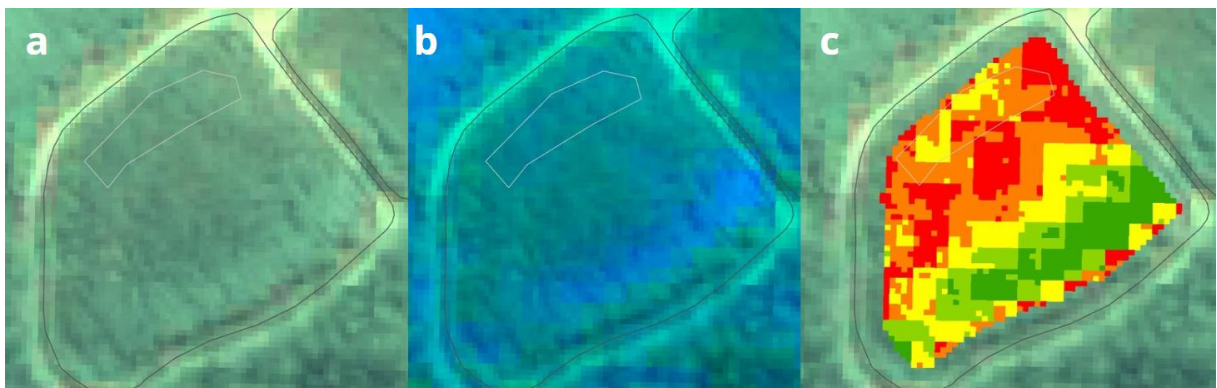
Figura 19 – Imagem aérea da quadra 0112U da Fazenda C



Fonte: Autora.

A Figura 20 apresenta as falhas vetorizadas e o NDVI calculado para a quadra 0205 da Fazenda C, enquanto a Figura 21 traz o registro fotográfico. Na análise da Figura 20, observa-se que as falhas vetorizadas coincidem com as áreas de NDVI mais baixo, embora algumas regiões não tenham sido vetorizadas. A Figura 21 revela a ocorrência de desfolha por ataque de bacteriose (MELO, 2017), resultando em baixo vigor e crescimento reduzido em grande parte da quadra.

Figura 20 – Composições (a) RGB e (b) RG-NIR com falhas vetorizadas e (c) NDVI para a quadra 0205 da Fazenda C



Fonte: Autora.

Figura 21 – Imagem aérea da quadra 0205 da Fazenda C



Fonte: Autora.

Para a quadra 0212 da Fazenda C, as falhas vetorizadas e o NDVI calculado são mostrados na Figura 22, com a imagem aérea correspondente na Figura 23. Na Figura 22, observa-se que as falhas vetorizadas coincidem com regiões de NDVI mais baixo, mas algumas regiões não foram incluídas na vetorização. A Figura 23 confirma a presença de desfolha semelhante à quadra 0205, também associada a um ataque de bacteriose.

Figura 22 – Composições (a) RGB e (b) RG-NIR com falhas vetorizadas e (c) NDVI para a quadra 0212 da Fazenda C



Fonte: Autora.

Figura 23 – Imagem aérea da quadra 0212 da Fazenda C



Fonte: Autora.

3.2 Comparação geral entre as quadras

Ao comparar as dez quadras estudadas, foi possível observar padrões distintos na relação entre as áreas de menor NDVI e as falhas vetorizadas em composição RGB. Para falhas ocasionadas por erosão é possível realizar a vetorização em composição RGB, entretanto, para os demais tipos de falhas a composição RG-NIR pode ser mais adequada, visto que em composição RGB a presença de daninhas saudáveis pode influenciar na detecção, bem como ANDRADE *et al.* (2013) constataram que plantas daninhas podem contribuir no aumento dos valores no índice de vegetação. Já para falhas ocasionadas por bacteriose, enxergou-se uma dificuldade para visualizar em ambas as composições, podendo ser visualizada somente na análise do índice de vegetação.

As áreas calculadas para cada classe de NDVI foram comparadas com as áreas das falhas vetorizadas, resultando em percentuais que permitem uma visão quantitativa das correspondências e diferenças observadas na Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 2 – Intervalos do NDVI e áreas calculadas por quadra para a fazenda A

Fazenda - Quadra	NDVI		Área falhas vetorizadas (ha)	Área falhas vetorizadas (%)	Área quadra total (ha)	
	Classe	Área (ha)				Área (%)
A - 0040A	0,135 - 0,335	0,29	2,96	0,27	2,30	11,76
	0,336 - 0,424	0,56	5,68			
	0,425 - 0,485	1,69	17,20			
	0,486 - 0,525	3,68	37,41			
	0,526 - 0,598	3,62	36,75			
A - 0040B	0,298 - 0,4	0,19	4,59	0,23	3,53	6,41
	0,401 - 0,445	0,49	11,94			
	0,446 - 0,484	0,71	17,30			
	0,485 - 0,516	1,34	32,61			
	0,517 - 0,582	1,37	33,55			
A - 0041	0,315 - 0,407	0,30	4,31	0,30	3,43	8,80
	0,408 - 0,449	0,77	10,96			
	0,45 - 0,481	1,46	20,80			
	0,482 - 0,505	2,49	35,48			
	0,506 - 0,573	1,99	28,45			
A - 0044B	0,341 - 0,433	0,30	3,85	0,39	3,68	10,66
	0,434 - 0,469	1,10	14,04			
	0,47 - 0,494	2,11	27,02			
	0,495 - 0,517	2,53	32,43			
	0,518 - 0,578	1,77	22,67			
A - 0044C	0,378 - 0,431	0,10	8,17	0,00	0,00	2,65
	0,432 - 0,459	0,26	20,51			
	0,46 - 0,481	0,38	30,33			
	0,482 - 0,504	0,33	26,45			
	0,505 - 0,552	0,18	14,53			

Fonte: Autora.

Tabela 3 – Intervalos do NDVI e áreas calculadas por quadra para a fazenda B

Fazenda - Quadra	NDVI			Área falhas vetorizadas (ha)	Área falhas vetorizadas (%)	Área quadra total (ha)
	Classe	Área (ha)	Área (%)			
B - 0006	0,202 - 0,33	0,01	0,22	0,39	5,19	7,51
	0,331 - 0,439	0,34	5,93			
	0,44 - 0,488	0,90	15,69			
	0,489 - 0,519	2,24	39,16			
	0,52 - 0,619	2,23	39,00			
B - 0021	0,149 - 0,4	0,50	4,94	0,89	6,87	12,90
	0,401 - 0,452	1,30	12,87			
	0,453 - 0,491	2,48	24,66			
	0,492 - 0,528	3,62	35,89			
	0,529 - 0,674	2,18	21,64			

Fonte: Autora.

Tabela 4 – Intervalos do NDVI e áreas calculadas por quadra para a fazenda C

Fazenda - Quadra	NDVI			Área falhas vetorizadas (ha)	Área falhas vetorizadas (%)	Área quadra total (ha)
	Classe	Área (ha)	Área (%)			
C - 0212	0,175 - 0,289	0,28	13,75	0,30	10,13	2,98
	0,29 - 0,344	0,64	31,64			
	0,345 - 0,409	0,49	24,26			
	0,41 - 0,481	0,31	15,48			
	0,482 - 0,608	0,30	14,87			
C - 0205	0,256 - 0,359	0,19	22,84	0,10	7,80	1,28
	0,36 - 0,405	0,22	25,80			
	0,406 - 0,464	0,19	22,74			
	0,465 - 0,535	0,12	14,86			
	0,536 - 0,65	0,12	13,76			
C - 0112U	0,241 - 0,404	0,56	7,93	0,17	1,62	10,67
	0,405 - 0,474	1,46	20,82			
	0,475 - 0,528	2,08	29,76			
	0,529 - 0,589	2,20	31,42			
	0,59 - 0,817	0,71	10,07			

Fonte: Autora.

Analisando a Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4 pode-se observar que as quadras 0040B, 0041, 0044B e 0044C da Fazenda A ultrapassam os 3% de área tolerado para o primeiro

intervalo de NDVI, confirmando sua classificação como insatisfatória. Enquanto que para a Fazenda B, apesar da Figura 15 mostrar falhas significativas, o intervalo mais baixo de NDVI é pequeno em porcentagem, e o segundo menor intervalo ultrapassa os 3%. A quadra 0021 da Fazenda B e as demais quadras da Fazenda C também ultrapassam os 3% de área para o primeiro intervalo de NDVI.

Apesar de serem difíceis de identificar nas imagens em RGB, as quadras 0040B, 0040C, 0041, 0044B, 0044C e 0112U, que constavam daninhas como causa raiz das falhas tiveram um resultado expressivo nas porcentagens dos menores intervalos do NDVI, evidenciando que as daninhas se encontram secas.

3.3 Análise estatística: Teste Qui-Quadrado

O teste Qui-Quadrado apresentado na Tabela 5 foi aplicado para comparar as proporções de áreas de falhas vetorizadas e áreas de menor NDVI nas diferentes quadras.

Tabela 5 – Valores do teste Qui-Quadrado

Fazenda	Quadra	Qui-Quadrado	Proporção observada de falhas vetorizadas (%)	Proporção observada de menor NDVI (%)	Valor esperado de falhas vetorizadas (ha)	Significância
A	0040A	0,0007	2,30	2,47	0,290	Não
A	0040B	0,0002	3,53	2,96	0,2198	Não
A	0041	0,0005	3,43	3,41	0,3176	Não
A	0044B	0,0003	3,68	2,81	0,3658	Não
A	0044C	0,0528	0	3,77	0,0528	Não
B	0006	146,428	5,19	0,13	0,0098	Sim
B	0021	0,737	6,87	3,88	0,501	Não
C	0112U	0,0016	10,14	9,40	0,280	Não
C	0205	0,012	7,8	14,8	0,190	Não
C	0212	0,457	1,63	5,25	0,560	Não

Fonte: Autora.

Os valores dos Qui-Quadrados na Tabela 3 que são inferiores a 0,05 indicam uma associação estatisticamente significativa entre as áreas vetorizadas e as áreas de menor NDVI, ou seja, a presença das falhas vetorizadas está correlacionada com as áreas de menor NDVI. Portanto, as diferenças observadas entre falhas vetorizadas e áreas de menor NDVI não são atribuídas ao acaso para as quadras 0040A, 0040B, 0041, 0044B, 0112U e 0205.

Já os valores dos Qui-Quadrados apresentados na Tabela 3 superiores a 0,05 sugerem que não há associação significativa entre as falhas vetorizadas e o NDVI das quadras, ou seja, a diferença observada pode ser atribuída ao acaso para as quadras 0044C, 0021 e 0212, que constavam como causa raiz das falhas respectivamente por daninhas, daninhas e bacteriose, não existindo evidência suficiente para afirmar uma relação significativa entre as duas variáveis.

Conforme a Tabela 3, a quadra 0006 não resultou em uma relação significativa, sugerindo que a diferença observada foi insignificante. Entretanto, este valor pode ser considerado como *outlier* visto que a imagem utilizada para vetorizar as falhas são do mês anterior a data do monitoramento onde foi obtida a imagem aérea, o que se entende que em menos de um mês as falhas aumentaram significativamente.

3.4 Discussão geral

As imagens de satélite, especialmente por meio do uso do NDVI, demonstraram ser uma abordagem útil para a identificação e delimitação de falhas em áreas de manejo de eucalipto. No entanto, a eficácia da utilização de imagens de satélite gratuitas com resolução espacial de 2 metros pode variar conforme condições específicas de cada área analisada, como tamanho da área de dano, tamanho da área da quadra e até mesmo a data da imagem comparada à data de monitoramento.

Em algumas quadras foi possível detectar diferentes tipos de falhas, como as ambientais, causadas por erosão, e as de saúde, causadas por formigas. Contudo, falhas relacionadas à bacteriose não foram visíveis nas imagens RGB, visto que foi realizada a vetorização da fotointerpretação das falhas observadas, ou seja, a interpretação das falhas pode ser subjetiva dependendo de cada pessoa que for realizar a vetorização. Entretanto, as quadras observadas com bacteriose foram detectadas apenas no NDVI. Além disso, as falhas por competição mostraram-se mais difíceis de delimitar com precisão, devido à resolução espacial das imagens, que pode causar confusão com a floresta e também o tamanho que a daninha possui.

Apesar das quadras selecionadas possuírem idade aproximadamente de 12 meses, aconselha-se realizar o monitoramento por NDVI a cada trimestre, dessa forma poderão ser tomadas medidas mais assertivas antes que o plantio complete um ano e possa ser evitado uma reforma na área de manejo. Considerar até 3% de falhas na área total da quadra pode ser entendido como ponto de inflexão, ou seja, pode ser tolerado até 3% de falhas na área, caso seja indicado que o tamanho dos danos ultrapassara os 3% deve-se então realizar uma análise de impacto caso a quadra seja inteiramente reformada ou somente retalhada.

Outro ponto a ser considerado é a limitação da resolução temporal das imagens do satélite CBERS-4A da câmera multiespectral e pancromática de ampla varredura (WPM), que pode impactar a análise em função das condições climáticas, como a presença de nuvens. Além disso, para uma análise mais próxima da realidade, é essencial que as imagens de satélite sejam capturadas o mais próximo possível da data do monitoramento em campo.

Os drones também podem ser utilizados para identificar falhas menores e gerar NDVI ou outros índices de vegetação, sendo uma alternativa caso seja necessário resolução espacial maior em um espaço de tempo onde não foi possível obter imagens CBERS-4A.

4 CONCLUSÃO

As imagens de satélite, a partir do NDVI, foram eficazes para identificar as falhas nas áreas de plantio de eucalipto, como erosão, danos causados por formigas e bacteriose, enquanto para as falhas por mato competição foram difíceis de diferenciar entre o que era plantio e daninhas. A metodologia, mesmo que bem-sucedida em várias quadras, encontrou limitações em outras áreas conforme indicado pelos resultados do teste estatístico. A validação com dados de campo mostrou uma boa correspondência em alguns casos, ainda que em outros houvessem inconsistências devido à resolução das imagens e condições climáticas. Ainda assim, o NDVI e as imagens de satélite gratuitas se mostram ferramentas úteis, com necessidade de ajustes para maior precisão, sendo uma alternativa para identificação de falhas menores o uso de drones.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDRADE, R. G. et al. Uso de técnicas de sensoriamento remoto na detecção de processos de degradação de pastagens. **Revista Engenharia Na Agricultura - Reveng**, v. 21, n. 3, p. 234–243, 2013.
- BERRA, E. F. et al. ESTIMATIVA DO VOLUME TOTAL DE MADEIRA EM ESPÉCIES DE EUCALIPTO A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE LANDSAT. **Ciência Florestal, Santa Maria**, v. 22, p. 853–864, 2012.
- BORGES, M. G.; LEITE, M. E.; LEITE, M. R. Mapeamento do Eucalipto no Estado de Minas Gerais Utilizando o Sensor Modis. **Universidade Estadual de Montes Claros - Unimontes**, 2018.
- BRAZ, A. M.; ÁGUAS, T. D. A.; MIRANDOLA, P. H. G. Análise de índices de vegetação NDVI e SAVI e índice de área foliar (IAF) para comparação da cobertura vegetal na bacia hidrográfica do córrego ribeirãozinho, município de Selvíria - MS. **Revista Percurso - NEMO**, v. 7, n. 2, p. 5–22, 2015.
- COUTINHO, T. A. et al. A new shoot and stem disease of eucalyptus species caused by erwinia psidii. **Australasian Plant Pathology**, v. 40, n. 1, p. 55–60, 2011.
- FLORESTAR - SÃO PAULO. Panorama da silvicultura paulista. p. 1–68, 2024.
- GERVÁSIO, D. R. V. P. **Análise da variação de áreas de vegetação em imagens NDVI em diferentes bandas espectrais da plataforma SENTINEL-2A**. Uberlândia: UFU - Universidade Federal de Uberlândia, 2021.
- IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual Ibá 2023. p. 1–91, 2023.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção da extração vegetal e da silvicultura 2022. v. 37, p. 1–9, 2022.
- INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Câmeras Imageadoras CBERS 04A**. Disponível em: <<http://www.cbbers.inpe.br/sobre/cameras/cbbers04a.php>>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas**. Brasília, 2018. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/outras-publicacoes/plano-nacional-de-desenvolvimento-de-florestas-plantadas.pdf>>
- MELO, M. R. DE. INFLUÊNCIA DA BACTERIOSE FOLIAR E A DESFOLHA ARTIFICIAL EM MUDAS DE EUCALIPTO NO CRESCIMENTO PÓS-PLANTIO. **UNESP - Botucatu**, p. 2–4, 2017.
- OUZEMOU, J. E. et al. Crop type mapping from pansharpened Landsat 8 NDVI data: A case

of a highly fragmented and intensive agricultural system. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 11, n. November 2017, p. 94–103, 2018.

PEDRALI, L. D. et al. Multispectral remote sensing for determining dry severity levels of pointers in eucalyptus spp. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 47, n. 122, p. 224–234, 2019.

PETERNELLI, L. A. **EST 106 Estatística I**. Viçosa: [s.n.].

ROUSE, J. W. et al. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. Washington: Texas A&M University, 1973.

WERNEBURG, M. A. P. **Planejamento em grandes empresas florestais no brasil**. Diamantina: UFVJM - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, 2015.