

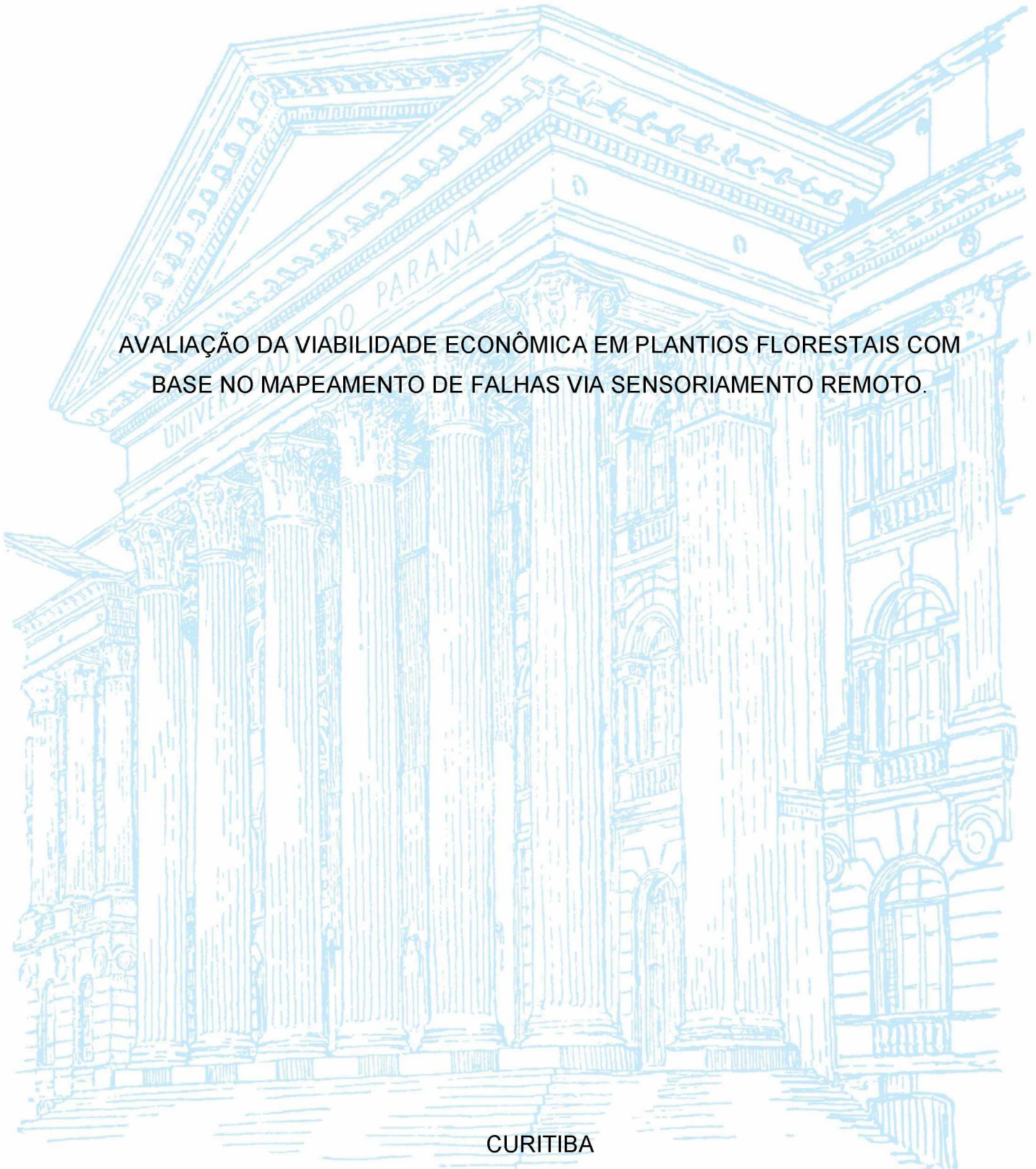
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ISABELA ALVARENGA DE MATTOS LANDIM

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA EM PLANTIOS FLORESTAIS COM
BASE NO MAPEAMENTO DE FALHAS VIA SENSORIAMENTO REMOTO.

CURITIBA

2025



ISABELA ALVARENGA DE MATTOS LANDIM

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA EM PLANTIOS FLORESTAIS COM
BASE NO MAPEAMENTO DE FALHAS VIA SENSORIAMENTO REMOTO.

Artigo apresentado como requisito parcial à
conclusão do curso de MBA em Gestão Florestal
EAD, Setor de Ciência Agrárias, Universidade
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Andersom Holler

CURITIBA

2025

Avaliação da Viabilidade Econômica em Plantios Florestais com Base no Mapeamento de Falhas via Sensoriamento Remoto.

Isabela Alvarenga de Mattos Landim

RESUMO

A integração entre geotecnologias e economia traz robustez as ferramentas de planejamento florestal. Este trabalho teve como objetivo aplicar técnicas de sensoriamento remoto para identificação de falhas em plantios florestais no município de Telêmaco Borba – PR, bem como analisar os impactos econômicos decorrentes dessas falhas, apoiando na tomada de decisão referente ao manejo das florestas. A metodologia empregou imagens multiespectrais Sentinel-2, utilizando os índices BSI e NDVI para mapeamento e validação multitemporal das áreas com solo exposto. A partir do cruzamento dos dados, foi possível estimar uma área de cerca de 4,7 mil hectares com potencial ocorrência de falhas, resultando em uma perda estimada de 1 milhão de metros cúbicos de madeira ao final de um ciclo de sete anos. Com base nesses dados, foram estruturados fluxos de caixa para dois cenários produtivos, e calculados os indicadores de viabilidade econômica (VPL e TIR), demonstrando os impactos das falhas na rentabilidade dos plantios.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Viabilidade Econômica. Mapeamento de Falhas. Planejamento Florestal.

ABSTRACT

The integration between geotechnologies and economics brings robustness to forest planning tools. This study aimed to apply remote sensing techniques to identify failures in forest plantations in the municipality of Telêmaco Borba, Paraná, as well as to analyze the resulting economic impacts, supporting decision-making related to forest management. The methodology employed multispectral Sentinel-2 images, using the BSI and NDVI indices for the multitemporal mapping and validation of areas with exposed soil. From the data cross-analysis, it was possible to estimate an area of approximately 4.7 thousand hectares with potential failure occurrence, resulting in an estimated loss of 1 million cubic meters of wood at the end of a seven-year cycle. Based on these data, cash flows were structured for two productive scenarios, and the economic feasibility indicators (NPV and IRR) were calculated, demonstrating the impacts of failures on plantation profitability.

Keywords: Remote Sensing. Economic Feasibility. Failure Mapping. Forest Planning.

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal desempenha um importante papel na economia brasileira e o crescimento dessa atividade exige, cada vez mais, a adoção de ferramentas tecnológicas que possibilitem um monitoramento eficiente, de baixo custo e em larga escala. Nesse contexto, o sensoriamento remoto surge como uma ferramenta fundamental para a gestão florestal, permitindo a análise contínua de grandes áreas e a detecção precoce de anomalias nos plantios, como falhas de desenvolvimento, ataques de pragas ou degradação do solo.

A observação da cobertura florestal por meio de imagens de satélite multiespectrais, aliada à aplicação de índices espectrais como NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e BSI (*Bare Soil Index*), oferece uma alternativa viável para a identificação de áreas com baixa cobertura vegetal, podendo ser associadas a falhas no plantio. Tais informações são essenciais para a tomada de decisão, permitindo ações corretivas e preventivas em tempo hábil.

Além do aspecto técnico, os dados obtidos via sensoriamento remoto também fornecem base sólida para análises econômicas. A quantificação das falhas e a estimativa de perdas produtivas viabilizam a construção de cenários financeiros que refletem a realidade dos plantios, possibilitando avaliar sua viabilidade econômica por meio de indicadores como o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Essa integração entre geotecnologias e economia traz robustez para as ferramentas de planejamento e sustentabilidade dos investimentos no setor florestal.

Dessa forma, este trabalho busca explorar o potencial do sensoriamento remoto na identificação de falhas em plantios, com o objetivo de demonstrar como sua aplicação pode influenciar na avaliação econômica de projetos florestais, contribuindo para uma gestão mais eficiente, produtiva e alinhada aos princípios da sustentabilidade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Para compreender as alternativas de metodologias existentes para identificação de falhas em plantios florestais por meio de técnicas de sensoriamento remoto, as possibilidades de indicadores econômicos utilizados para verificar a viabilidade econômica da condução de plantios, como também definir a metodologia aplicada neste trabalho, as seguintes seções apresentam os conhecimentos técnicos essenciais para que os objetivos deste estudo fossem alcançados.

2.1 SENSORIAMENTO REMOTO E A SILVICULTURA

A possibilidade de observar remotamente extensas áreas de forma contínua, com baixo custo e alta frequência temporal, permite uma compreensão mais precisa e abrangente das dinâmicas florestais, como o crescimento, a degradação, a ocorrência de falhas de plantio e alterações no uso e cobertura do solo.

Estas observações são possíveis por meio do uso de técnicas de sensoriamento remoto, em especial por imagens de satélite. O sensoriamento remoto se tornou ferramenta indispensável para o monitoramento e a gestão de florestas plantadas. Imagens de satélites de média resolução espacial, como as fornecidas gratuitamente pelas missões Sentinel-2 e Landsat, oferecem dados espectrais valiosos que possibilitam realizar análises multitemporais e a aplicar índices de vegetação eficazes na detecção de anomalias no desenvolvimento florestal.

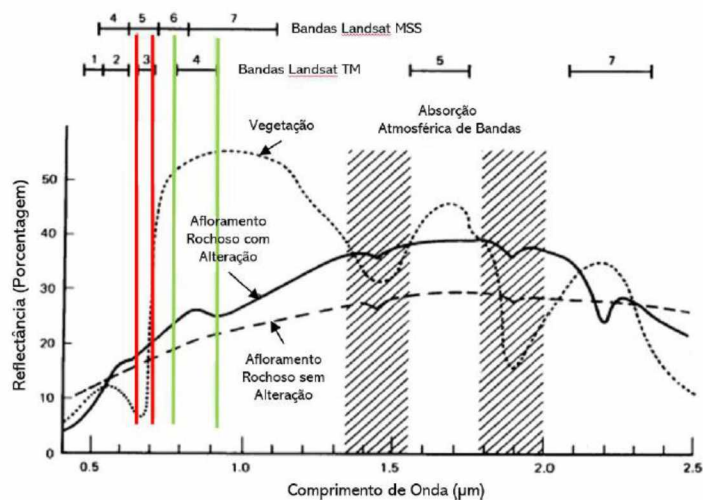
De acordo com o último relatório divulgado pela Indústria Brasileira de Árvores (2024), em 2023 a área total dedicada ao plantio de árvores no Brasil ultrapassou 10 milhões de hectares, dando destaque ao eucalipto, que corresponde a 76% da área plantada total (IBÁ, 2024).

Este indicador também representa a importância do monitoramento de florestas plantadas, que pode ser refletido em benefícios diretos à produtividade, à sustentabilidade e à competitividade global do Brasil no setor florestal. Compreende-se que as técnicas de sensoriamento remoto por imagens de satélite aplicadas ao eucalipto apresentam grande potencial, por ser uma tecnologia que garante celeridade e acessibilidade de informação referentes a floresta.

2.2 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS

Os sistemas de sensores acoplados aos satélites são capazes de detectar respostas espectrais, ou seja, as diferenças no comportamento espectral de cada alvo observado (FIGUEIREDO, 2005). A FIGURA 1 ilustra a reflectância que pode ser observada em diferentes alvos dispostos na superfície terrestre, ilustrando também as diferentes bandas de alguns sensores responsáveis por detectar estas respostas.

FIGURA 1 – COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS



FONTE: Adaptado de Figueiredo (2005).

Cada resposta espectral permite classificar os alvos observados a partir da sua refletância, e no contexto de identificação de falhas em plantios, esta resposta possibilita diferenciar a área ou região do plantio florestal com crescimento saudável a partir da resposta espectral de solo exposto sobre o talhão observado.

A assinatura espectral dos solos é afetada principalmente por sua porcentagem de matéria orgânica, sua granulometria, composição mineral e umidade. O aumento do conteúdo de matéria orgânica no solo provoca aumento na absorção espectral, na faixa do espectro reflexivo 0,4 µm a 2,5 µm (FIGUEIREDO, 2005). Este comportamento faz com que o solo seja mais perceptível em bandas referentes ao espectro do vermelho e do *Shortwave Infrared* (SWIR) ou infravermelho-médio.

Quando observamos a vegetação, a fotossíntese é o principal processo na interação com a Radiação Eletromagnética (REM), que diferencia a vegetação de outros materiais. Os pigmentos fotossintetizantes como clorofila, xantofila e o caroteno são os agentes responsáveis pela absorção do espectro, principalmente na região do

visível (PONZONI, 2012). Este comportamento faz com uma vegetação saudável, em seu auge de crescimento, seja mais perceptível em bandas referentes ao espectro do *Near Infrared* (NIR) ou infravermelho-próximo e alterações relacionadas a saúde da floresta podem ser identificadas a partir da baixa refletância do alvo nessa região do espectro.

De acordo com Galvão (2024) a qualidade do manejo florestal é monitorada ao longo do ciclo de crescimento das florestas, com atenção especial para povoamento mais jovens, que são mais susceptíveis a danos como ataques de formigas, bacteriose e competição com outras plantas. Os danos mais severos podem ser classificados como falhas para áreas menores danificadas ou reboleiras. Já para áreas maiores, estes danos podem ser causados por pragas, doenças e outros vetor de estresse (GALVÃO, 2024).

2.3 INDICES DE SOLO E VEGETAÇÃO

Com o objetivo de diferenciar alvos em imagens de satélite, além da análise de valores de refletância, o cálculo de índices pode auxiliar no mapeamento de determinados objetos de estudo. O *Bare Soil Index* (BSI), por exemplo, é um índice referência na separação entre a informação do solo livre de cobertura vegetal e a vegetação em seu auge de crescimento. Para a geração do BSI considera-se a combinação de bandas que capturam o comprimento de onda do visível e do infravermelho, dispostas sobre a seguinte combinação linear (EQUAÇÃO 1):

$$BSI = \frac{(RED+SWIR)-(NIR+BLUE)}{(RED+SWIR)+(NIR+BLUE)} \quad (1)$$

onde, *RED* representa a banda do vermelho; *BLUE* representa a banda do azul; *NIR* é a captura do comprimento do infravermelho próximo e o *SWIR* é a captura do infravermelho médio.

Outro índice referência que permite compreender aspectos da saúde da vegetação é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI). Seu cálculo é realizado a partir da seguinte equação:

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad (2)$$

em que *RED* representa a captura do comprimento do vermelho e *NIR* a captura do comprimento do Infravermelho próximo.

Este índice de expressiva importância caracteriza a vegetação em estimativas de biomassa, cobertura vegetal e detecta mudanças de padrão de uso e cobertura da terra (NETA, 2018), através da diferença normalizada entre as bandas dos comprimentos que o compõem.

2.4 INDICADORES ECONOMICOS

O Brasil possui hoje uma das melhores produtividades mundiais em eucalipto, ficando em média de 39 m³ ha/ano, em alguns locais alcançando cerca de 60 m³ ha/ano e a maior parte da produção nacional de eucalipto, destina-se à produção de celulose e papel e ao carvão vegetal que abastece as siderúrgicas (JANOSELLI *et al*, 2016). Entretanto, a ocorrência de falhas nos plantios pode representar um entrave significativo referente ao aproveitamento pleno desse potencial produtivo.

A redução do volume de madeira decorrente das falhas impacta diretamente no retorno e na viabilidade econômica do plantio para o produtor, seja pela diminuição da madeira disponível para venda, seja pela perda de matéria-prima para outros produtos do setor. A possibilidade de mensurar as áreas afetadas pode proporcionar a antecipação de uma estimativa do impacto financeiro sobre determinada produção.

O Valor Presente Líquido (VPL) é um dos indicadores mais utilizados na análise econômica de um projeto para verificar a sua viabilidade (JANOSELLI *et al*, 2016). De acordo com JANOSELLI *et al* (2016) ele se destaca dos demais por considerar o efeito do tempo e o reinvestimento dos fluxos líquidos intermediários à mesma taxa do custo de oportunidade do capital investido. O VPL pode ser descrito pela EQUAÇÃO 3 a seguir.

$$VPL = \left[\frac{FC_1}{(1+i)} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \frac{FC_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \right] - FC_0 \quad (3)$$

onde, FC_n: é o fluxo de caixa em cada ano t, com t de 1 a n; FC₀: é o investimento inicial; i: custo do capital.

A regra para tomada de decisão quando se aplica o VPL, é que se o valor for positivo o projeto é viável economicamente. Caso o valor do VPL seja igual à zero, significa que o projeto não terá viabilidade para sua continuidade (JANOSELLI *et al*, 2016).

Outro indicador econômico que auxilia na determinação da viabilidade de determinado projeto é a Taxa Interna de Retorno (TIR). Ela reflete, no momento zero, o valor presente das entradas com o das saídas previstas no fluxo de caixa (JANOSELLI *et al*, 2016). Por definição, a TIR pode ser obtida através do fluxo de caixa projetado de determinado projeto (EQUAÇÃO 4):

$$TIR = -1 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} = 0 \quad (4)$$

onde, i: representa o investimento inicial; FC_t: é o fluxo de caixa no t-ésimo período; t: tempo de desconto de cada entrada de caixa.

Tomando a taxa interna de retorno para uma decisão de investimento, analisa-se se o valor da TIR for superior ao valor do custo de oportunidade o projeto é economicamente viável. Caso contrário, se o valor da TIR for inferior ao valor do custo de oportunidade, rejeita-se o projeto, pois não criará valor (JANOSELLI *et al*, 2016).

Considerando a construção de um fluxo de caixa que represente os custos de implantação do plantio, despesas operacionais com manejo, investimentos em infraestrutura, custos com mão de obra, transporte da madeira e tributos, torna-se possível a aplicação de indicadores como base para a análise da viabilidade, tanto para cenários em que não há ocorrência de falhas, ou seja, havendo aproveitamento integral da área manejada, como também quando há ocorrência de falhas, a partir da quantificação o volume da madeira afetado ao longo do tempo e seu impacto no retorno financeiro.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido com base na metodologia descrita nas sessões a seguir.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O desenvolvimento considerou analisar áreas de plantio florestal no município de Telêmaco Borba, interior do estado do Paraná. Este que é município referência, pois apresenta a maior área plantada do estado (APRE, 2022). A espacialização dos plantios considerou áreas de silvicultura delimitadas pelo MapBiomas e publicadas em sua última coleção (Coleção 9), com data base de 2024 (FIGURA 2).

FIGURA 2 – ÁREA DE SILVICULTURA NO MUNICÍPIO DE TELÊMACO BORBA



FONTE: A autora (2025).

3.2 MAPEAMENTO DE FALHAS EM PLANTIOS FLORESTAIS

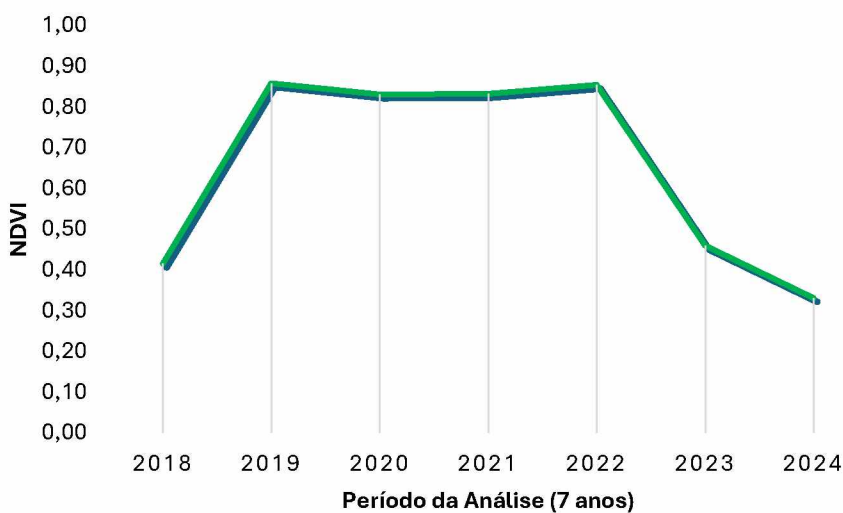
A quantificação das áreas de falha sobre a classe de silvicultura do MapBiomas considerou a observação da incidência de solo exposto nas regiões delimitadas como plantio.

Para a delimitação da dinâmica do solo nos talhões foi realizada a aplicação do BSI, a partir das imagens Sentinel-2, definindo limiares de valor do pixel para mapear duas classes principais: Falha e Corte. Esta diferenciação foi importante para refinar a informação da falha mapeada, já que existe influência de diferentes comportamentos espectrais que as dinâmicas do manejo em plantios florestais podem oferecer a imagem, como por exemplo, desbastes e corte-raso nos talhões.

Para incorporar maior assertividade no mapeamento das falhas, foi considerado o desenvolvimento de uma análise multitemporal dos talhões onde houve falha identificada, refinando o mapeamento das regiões mapeadas. Para esta validação, foi considerado traçar o perfil espectral dos talhões em valores de NDVI sobre uma amostragem nas regiões classificadas como Falha, a fim de se comparar com o padrão de perfil espectral conhecido para uma região de Silvicultura livre de anomalias, determinado e publicado pela Embrapa na plataforma SatVeg.

Observando o comportamento espectral das amostras de falha ao longo de um período de 7 anos, foi possível validar se a incidência de solo exposto corresponderia efetivamente a uma área de falha ou se corresponderia a possíveis dinâmicas de manejo como desbastes ou corte. Quando a curva espectral da amostra se distancia do padrão de curva amostrada para Silvicultura (FIGURA 3), compreende-se que a dinâmica observada para os talhões sinaliza uma possível falha no plantio.

FIGURA 3 – EXEMPLIFICAÇÃO DA DINÂMICA ESPECTRAL ESPERADA PARA SILVICULTURA LIVRE DE ANOMALIAS – PERÍODO DE 7 ANOS



FONTE: Adaptado de EMBRAPA (2024).

Com a delimitação da curva espectral de amostras de pixels classificados como “falha” dentro do limite municipal, por meio da análise multitemporal de valores NDVI, tornou-se possível gerar um segundo mapeamento, considerando como “falha” apenas pixels na imagem que apresentassem valores de BSI dentro dos limiares esperados para observação no ano base (2024), combinados aos valores de NDVI dentro do limiar esperado ao longo de um período de 7 anos (De 2018 a 2024).

O cruzamento dos dados utilizados, o tratamento das imagens de satélite, a geração dos índices e a classificação final das áreas de falha foram realizadas no ambiente do *Google Earth Engine (GEE)*. Para etapa final da quantificação foi considerada a contagem de pixels classificados como “falha” após etapa de validação multitemporal.

3.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DOS PLANTIOS

A fim de se analisar a viabilidade econômica dos plantios do município a partir da quantificação das áreas de potencial falha na região, optou-se pela estruturação de um fluxo de caixa que representasse os custos e as receitas geradas a partir do volume estimado da produção, com base na área de plantio mapeada.

Para a estruturação do fluxo foram consideradas premissas de custo médio de implantação, manejo e colheita de florestas plantadas do gênero eucalipto, observadas para o estado do Paraná, além de estimar o volume da produção e receitas geradas a partir da área de silvicultura mapeada, com e sem incidência de falhas, a partir do preço da madeira e da produtividade média na região.

No QUADRO 1 estão apresentados os valores adotados como premissas para a elaboração do fluxo de caixa, considerando um período de análise de sete anos, correspondente a um ciclo completo de eucalipto:

QUADRO 1 – PREMISSAS UTILIZADAS NA ELABORAÇÃO DO FLUXO DE CAIXA

Premissa	Valor	Unidade	Fonte
IMA/Produtividade	33,7	m ³ /ha/ano	IBA,2024
Idade de corte	7	anos	IBA,2024
Preço da Madeira - celulose PR	117	R\$/m ³	SEAB, 2025
Custo Médio de Implantação - eucalipto	5.250		APRE,2020
Custo Médio de Colheita - eucalipto	5.504		APRE,2020

Custos de Manejo - Entre 2 e 3 anos			
Controle de Pragas	225	R\$/ha/ano	EMBRAPA,2001
Capina	400	R\$/ha/ano	
Adubações	325	R\$/ha/ano	
Custos de Manejo - Após 3 anos			
Controle de Pragas	200	R\$/ha/ano	EMBRAPA,2001

FONTE: A autora (2025).

De acordo com o IBÁ, em seu relatório anual, a produtividade média no Brasil em 2024 para florestas de eucalipto foi estimada em 33,7 m³/ha/ano (com casca), considerando uma idade média de corte de 7,2 anos.

Para definição das premissas de custos, foram considerados os dados divulgados pela Associação Paranaense de Empresas de Base Florestal (APRE), que definiu uma média para custos de implantação no estado entre R\$ 4.500 a R\$ 6.000 por hectare de eucalipto, podendo variar consideravelmente ao analisar declividade do terreno, mão de obra, escala de produção e espécie plantada.

Já os custos de colheita, considerado um dos maiores custos referentes ao investimento em silvicultura, a associação estima que uma floresta produtiva de eucalipto, com cerca de 300 metros cúbicos por hectare aos sete anos de idade, tem custo médio de colheita entre R\$ 6.000 e R\$ 8.000.

Custos referentes a manejo da floresta até a idade de corte definida apresentaram como base valores divulgados pela EMBRAPA, de acordo com o estudo de custo de Produção, produtividade e renda do Eucalipto no Norte Pioneiro do Estado do Paraná. O estudo destaca que a maior parte dos custos de manejo ocorrem até os 3 primeiros anos da floresta, envolvendo controle de pragas, capina e adubação. A partir dos 3 anos, os custos de manejo são reduzidos significativamente para eventuais controles de praga, podas e vigilância.

Outras premissas consideradas foram calculadas a partir da área total de silvicultura informada pelo MapBiomass em 2024, cerca de 77,8 mil hectares para o município de Telêmaco Borba, possibilitando estimar o volume de madeira produzido pela floresta em até 7 anos, considerando dois cenários: (A) Volume de madeira sem o impacto de possíveis áreas de falha nos plantios e (B) com o impacto da área de falha mapeada.

Para o cálculo dos indicadores de viabilidade econômica, foi considerada uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 15% ao ano, valor escolhido por estar alinhado

à taxa Selic vigente, referência comum em análises financeiras no país, parâmetro recomendado para estudos econômicos, de acordo com o Banco Central do Brasil, em outubro de 2025. Os fluxos de caixa foram elaborados com base em valores reais das premissas, sem a aplicação de correção inflacionária, possibilitando representar o desempenho econômico dos diferentes cenários de forma objetiva e garantir compatibilidade na utilização da Selic que já incorpora ajustes referentes a inflação.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

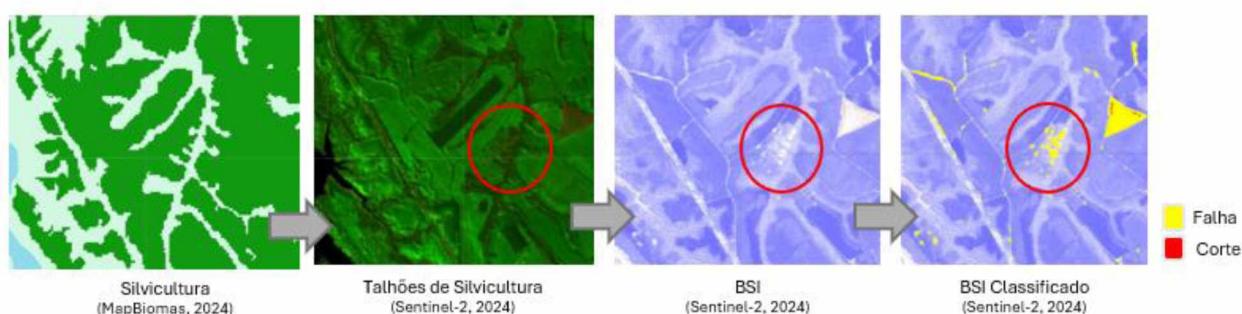
A partir do processamento de imagens do satélite Sentinel-2, com recobrimento do município de Telêmaco Borba, foram gerados os resultados apresentados nas sessões a seguir:

4.1 MAPEAMENTO DE FALHAS EM PLANTIOS FLORESTAIS

O mapeamento de falhas nos plantios foi desenvolvido na plataforma do GEE, caracterizando a dinâmica do solo exposto em duas classes principais, sobre a classe de Silvicultura do MapBiomas, tomando como base o cálculo do índice BSI nos talhões de plantio (FIGURA 4).

A partir da amostragem dos valores de BSI, as classes foram definidas como: Falha, que considerou valores de índice que variaram entre -0,35 e 0,13; e Corte-raso, com valores de índice acima de 0,13. Foi possível observar também que regiões dos talhões que apresentavam a vegetação em seu auge de crescimento obtiveram valores de índice inferiores a -0,35.

FIGURA 4 – EXEMPLIFICAÇÃO DO PROCESSO DE MAPEAMENTO DE FALHAS

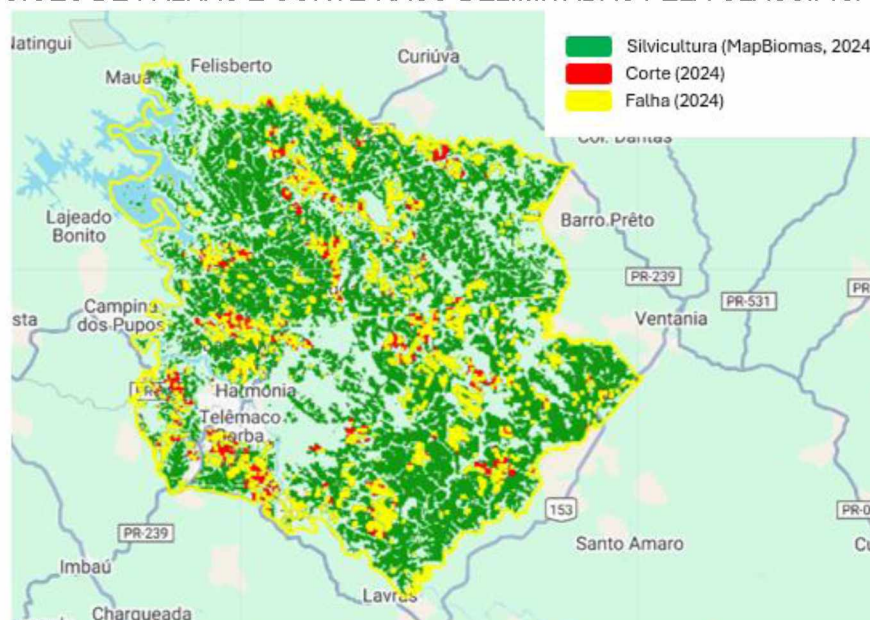


FONTE: A autora (2025).

Os limiares de BSI escolhidos foram determinados a partir de testes sobre os intervalos de valores de índice que obtivessem a melhor separação entre as características de “corte-raso” e “falha”, a partir da interpretação das imagens de satélites classificadas. Para áreas de “corte-raso” considerou analisar se as regiões apresentavam alta refletância do solo e aspecto liso na imagem; enquanto para áreas de potencial “falha”, o objetivo era de separar regiões com alta refletância da porção do solo, combinadas ao aspecto difuso e irregular do alvo observado.

Para reduzir ruídos e garantir maior homogeneidade na classificação, os resultados foram refinados por filtros morfológicos de dilatação, erosão e por um filtro majoritário, produzindo uma classificação temática refinada (FIGURA 5) de ambas as classes, que seguiu para o processo de validação, posteriormente para a mensuração das áreas.

FIGURA 5 – REGIÕES DE FALHAS E CORTE-RASO DELIMITADAS PELA CLASSIFICAÇÃO BSI



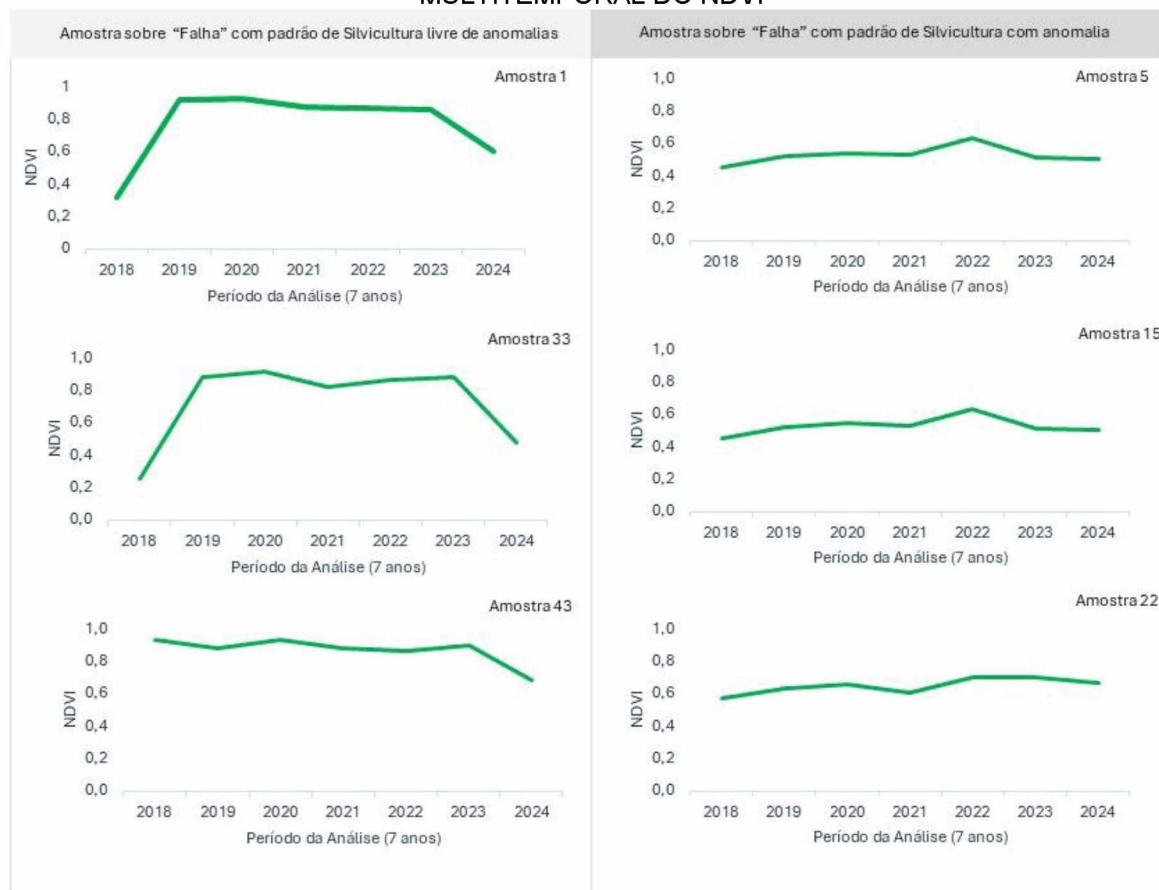
FONTE: A autora (2025).

A fim de assegurar que a fração de solo exposto identificada representasse de forma mais assertiva uma área de falha e não outra possível dinâmica do manejo dos talhões, foi considerada uma análise multitemporal das regiões classificadas como “falha” durante um período de 7 anos.

Foram dispostas um total de 100 amostras nas regiões classificadas com o objetivo de traçar o perfil espectral dos talhões em valores de NDVI, realizando um comparativo entre a curva espectral da amostragem e o padrão de perfil espectral

conhecido para Silvicultura livre de anomalias. A seguir estão exemplificados os padrões encontrados para alguns dos perfis espectrais dos talhões analisados (FIGURA 6).

FIGURA 6 – PERFIL ESPECTRAL DE AMOSTRAS CLASSIFICADAS COMO “FALHA” - ANÁLISE MULTITEMPORAL DO NDVI



FONTE: A autora (2025).

O perfil espectral traçado para as amostras 1, 33 e 43 exemplificadas evidenciou que, ao analisar áreas classificadas como “falha” ao longo de um período de 7 anos, o comportamento espectral foi semelhante ao padrão definido pela Embrapa para uma região com dinâmica de silvicultura livre de anomalias. De acordo com o perfil espectral padrão (FIGURA 3), os valores de NDVI para a silvicultura variam entre 0,7 e 0,9, ao observar as amostras de plantio entre os dois e seis anos de idade. A partir do sexto ano, os valores de NDVI sofrem uma queda, referenciando um possível período de corte-raso nos talhões nesta época (2024).

Entretanto, para parte das amostras, exemplificadas pelas observações 5, 15 e 22, o comportamento espectral se distanciou do padrão definido, tendo em vista que os valores de NDVI não representavam grandes variação ao longo do período e

principalmente apresentavam valores de índice abaixo de 0,7, referenciando uma possível anomalia ou falha nos talhões nesta época.

4.2. QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS DE FALHA

A partir da análise multitemporal, foi possível refinar a classificação inicial incorporando ao classificador um critério baseado em valores de NDVI ao longo do tempo. Para isso, estabeleceu-se que pixels com NDVI inferiores a 0,7 seriam considerados como possíveis falhas, uma vez que esse limiar se mostrou consistente com padrões de anomalias identificadas nas amostras do estudo, refletindo áreas de baixa densidade ou vigor vegetativo reduzido. Ao adotar esse critério, a classificação final permitiu quantificar aproximadamente 4,7 mil hectares de plantio florestal com indícios de falhas no município de Telêmaco Borba, área que serviu como premissa para a construção da análise de viabilidade econômica dos plantios.

4.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DOS PLANTIOS

A partir das premissas pré-definidas, foram estruturados os fluxos de caixa para avaliar a viabilidade econômica dos plantios no município em dois cenários distintos: (A) Considerando a realidade dos plantios livres de anomalias ou áreas de falha, e (B) Considerando a realidade dos plantios com a incidência de falha.

Baseado na estimativa da área total de silvicultura divulgada pelo MapBiomass, a área de falha mapeada a partir das técnicas de sensoriamento remoto e as premissas de produtividade e idade de corte definidas, para o cenário A foi estimado um volume total de 18,4 milhões m³ de madeira produzidos em até 7 anos, enquanto para o cenário B estimou-se um volume de 17,3 milhões m³, originado da redução do volume estimado de perda para as áreas de falha mapeada, cerca de 1 milhão de metros cúbicos afetados.

Ambos os fluxos estruturados (TABELAS 1 e 2) estimaram aproximadamente meio milhão de reais em custos totais, considerando custos de implantação, manejo e colheita da floresta, compondo uma receita bruta de 2,2 milhões de reais para o cenário A e 2 milhões de reais para o cenário B ao final do período analisado.

A partir da premissa de preço da madeira na região foi estimado lucro bruto de 1,7 milhões de reais após 7 anos para o cenário livre de falhas, enquanto para o

cenário em que considera a perda da floresta obteve lucro de 1,6 milhões de reais após todo o período. Este montante resultou em valores de TIR iguais para ambos os cenários (20,6%) e valores de VPL bastante semelhantes: cenário A com VPL de R\$ 153 milhões, enquanto para o cenário B um VPL de R\$ 142 milhões.

TABELA 1 – FLUXO DE CAIXA, VPL E TIR CALCULADAS PARA CENÁRIO A

Área Plantada Total (ha)		77.820		ha												
Cenário A		0	1	2	3	4	5	6	7							
Valor (\$/ha)																
Implantação	R\$	408.555.000														
Controle de Praga			R\$ 17.509.500				R\$ 15.564.000	R\$ 15.564.000	R\$ 15.564.000							
Capina				R\$ 31.128.000												
Adubação						R\$ 25.291.500										
Corte raso											R\$	428.321.280				
Receita	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 2.147.488.191			
Custos	-R\$	408.555.000	-R\$ 17.509.500	-R\$ 31.128.000	R\$ -	-R\$ 15.564.000	-R\$ 15.564.000	-R\$ 15.564.000	-R\$ 15.564.000	-R\$ 428.321.280						
Implantação	-R\$	408.555.000	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -			
Capina	R\$	-	-R\$ 17.509.500	R\$ -	R\$ -	-R\$ 15.564.000	-R\$ 15.564.000	-R\$ 15.564.000	-R\$ 15.564.000	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -			
Corte raso	R\$	-	R\$ -	-R\$ 31.128.000	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -			
Corte raso	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	-R\$	428.321.280			
Fluxo de Caixa	-R\$	408.555.000	-R\$ 17.509.500	-R\$ 31.128.000	R\$ -	-R\$ 15.564.000	-R\$ 15.564.000	-R\$ 15.564.000	-R\$ 15.564.000	R\$ 1.719.166.911						
Período		1	2	3	4	5	6	7	8							
Fator		0,87	0,76	0,66	0,57	0,50	0,43	0,38	0,33							
Fluxo de Caixa Descontado	-R\$	355.265.217	-R\$ 13.239.698	-R\$ 20.467.165	R\$ -	-R\$ 7.738.059	-R\$ 6.728.747	-R\$ 5.851.084	R\$ 561.998.713							
TMA		15%														
VPL Cenário A	R\$	152.708.743														
TIR Cenário A		20,6%														

FONTE: A autora (2025).

TABELA 2 – FLUXO DE CAIXA, VPL E TIR CALCULADAS PARA CENÁRIO B

Área Plantada Total (ha)	73.169		ha									
Cenário B	0	1	2	3	4	5	6	7				
Valor (\$/ha)												
Implantação	R\$ 384.139.486											
Controle de Praga		R\$ 16.463.121			R\$ 15.564.000	R\$ 15.564.000	R\$ 15.564.000					
Capina			R\$ 29.267.770									
Adubação				R\$ 23.780.063								
Corte raso											R\$ 402.724.521	
Receita	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 2.019.152.895	
Custos	-R\$ 384.139.486	-R\$ 16.463.121	-R\$ 29.267.770	R\$ -	-R\$ 15.564.000	-R\$ 15.564.000	-R\$ 15.564.000	-R\$ 402.724.521				
Implantação	-R\$ 384.139.486	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	
Controle de Praga	R\$ -	-R\$ 16.463.121	R\$ -	R\$ -	-R\$ 15.564.000	-R\$ 15.564.000	-R\$ 15.564.000	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	
Capina	R\$ -	R\$ -	-R\$ 29.267.770	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	
Corte raso	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	-R\$ 402.724.521	
Fluxo de Caixa	-R\$ 384.139.486	-R\$ 16.463.121	-R\$ 29.267.770	R\$ -	-R\$ 15.564.000	-R\$ 15.564.000	-R\$ 15.564.000	R\$ 1.616.428.374				
Período	1	2	3	4	5	6	7	8				
Fator	0,87	0,76	0,66	0,57	0,50	0,43	0,38	0,33				
Fluxo de Caixa Descontado	-R\$ 334.034.336	-R\$ 12.448.485	-R\$ 19.244.034	R\$ -	-R\$ 7.738.059	-R\$ 6.728.747	-R\$ 5.851.084	R\$ 528.413.303				
TMA	15%											
VPL Cenário B	R\$ 142.368.559											
TIR Cenário B	20,6%											

FONTE: A autora (2025).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo investigar metodologias baseadas em sensoriamento remoto para a identificação de falhas em plantios florestais, bem como analisar os impactos dessas falhas na viabilidade econômica dos plantios. Ao longo do trabalho, foi possível demonstrar que o uso de imagens de satélite, em especial da missão Sentinel-2, combinado aos índices espectrais como o BSI e o NDVI, representa uma ferramenta eficaz e acessível para o monitoramento da cobertura florestal. A abordagem metodológica adotada, que incorporou análise multitemporal e perfis espectrais de referência, contribuiu para refinar o mapeamento inicial das áreas com indícios de falhas, distinguindo-as de outras dinâmicas de manejo florestal, como cortes-rasos, considerando a impossibilidade de validação do produto com dados de campos.

A aplicação dessa metodologia ao município de Telêmaco Borba, maior polo florestal do estado do Paraná, permitiu a quantificação de aproximadamente 4,7 mil hectares de plantio com potencial incidência de falha, em um universo de 77,8 mil hectares de silvicultura mapeados. Apesar da baixa representatividade do valor de falhas mapeadas frente a área total de silvicultura na região foi possível quantificar uma perda de 1 milhão de metros cúbicos de madeira ao final de um ciclo produtivo de sete anos, evidenciando a importância do monitoramento precoce e contínuo dessas áreas para o adequado manejo dos recursos e maximização da produtividade.

A análise econômica, estruturada a partir de fluxos de caixa para dois cenários – com e sem a ocorrência de falhas –, demonstrou que, embora a rentabilidade geral do projeto permaneça positiva em ambos os casos, a existência de falhas afeta negativamente na receita e no lucro. Considerando que VPL projetado para o cenário sem falhas foi de aproximadamente R\$ 153 milhões, enquanto o cenário com falhas apresentou um VPL de R\$ 142 milhões. Mesmo que a TIR calculada manteve-se igual nos dois casos (20,6%), a diferença no VPL evidencia o impacto das falhas no retorno financeiro do investimento. Compreende-se também que um fluxo de caixa com premissas mais detalhadas poderia fortalecer a assertividade dos indicadores e a tomada de decisão.

Esses resultados reforçam a relevância de ferramentas de sensoriamento remoto na silvicultura moderna, especialmente em um contexto em que o Brasil busca manter sua competitividade no mercado global de produtos florestais. A integração

entre geotecnologias e análises econômicas se mostra não apenas viável, mas necessária para uma gestão florestal eficiente e sustentável.

Conclui-se, portanto, que o uso de técnicas de sensoriamento remoto, aliados a uma abordagem quantitativa e multitemporal, possibilita a identificação de falhas nos plantios, fornecendo subsídios técnicos valiosos para tomada de decisão por parte de produtores, gestores e investidores do setor florestal. Além disso, a quantificação do impacto econômico decorrente dessas falhas reforça a importância de políticas de monitoramento ativo e intervenções corretivas nos plantios, promovendo maior eficiência produtiva e sustentabilidade econômica ao longo do ciclo florestal.

REFERÊNCIAS

APRE. **Quanto custa implantar uma floresta?** Disponível em: <https://apreflorestas.com.br/noticias/quanto-custa-implantar-uma-floresta/> . Acesso em: 29 set. 2025.

APRE. Associação Paranaense de Empresas de Base Florestal. **Estudo Setorial Apre 2022**, 2022.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa Selic**. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic> . Acesso em: 13 out. 2025.

EMBRAPA. **Custo de produção, produtividade e renda do eucalipto conduzido para uso múltiplo no Norte Pioneiro do Estado do Paraná**. 2001. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/305319/1/CT0051.pdf> . Acesso em: 29 set. 2025.

EMBRAPA. Plataforma SatVeg. **Biblioteca de Padrões - Silvicultura**. Disponível em: <https://www.satveg.cnptia.embrapa.br/satveg/pages/home.html> . Acesso em: 02 set. 2025.

FIGUEIREDO, Divino. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. 2005.

GALVÃO, Manuelle de Freitas. **Sensoriamento remoto para identificação de falhas em cultura de eucalipto**. 2024.

IBA. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual 2024**, 2024

JANOSSELLI, H. R. D.; et al. **Viabilidade econômica da produção de eucalipto no interior de São Paulo**. Revista Brasileira de Ciências Florestais, 2016.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SEAB – Secretaria da Agricultura e do Abastecimento do Paraná. **Preços de Produtos Florestais**, 2025. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/Pagina/Precos-de-Produtos-Florestais> . Acesso em: 13 out. 2025.