

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Monitoramento da trajetória de restauração florestal em áreas de preservação permanente impactadas por rejeito de mineração com uso de sensoriamento remoto

Fernando Gomes Gonçalves
Magister Scientiae

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026

FERNANDO GOMES GONÇALVES

Monitoramento da trajetória de restauração florestal em áreas de preservação permanente impactadas por rejeito de mineração com uso de sensoriamento remoto

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Sebastiao Venancio Martins

Coorientador: João F. Costa dos Santos

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

G635m
2026
Gonçalves, Fernando Gomes, 1996-
Monitoramento da trajetória de restauração florestal em
áreas de preservação permanente impactadas por rejeito de
mineração com uso de sensoriamento remoto / Fernando Gomes
Gonçalves. – Viçosa, MG, 2026.

1 dissertação eletrônica (86 f.): il. (algumas color.).

Inclui anexo.

Orientador: Sebastião Venâncio Martins.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Florestal, 2026.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.437>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Recuperação ecológica - Doce, Rio, Bacia (MG e ES) -
Sensoriamento remoto. 2. Minas e recursos minerais - Doce, Rio,
Bacia (MG e ES) - Aspectos ambientais. I. Martins, Sebastião
Venâncio, 1965-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 634.92301

FERNANDO GOMES GONÇALVES

Monitoramento da trajetória de restauração florestal em áreas de preservação permanente impactadas por rejeito de mineração com uso de sensoriamento remoto

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 13 de julho de 2026.

Assentimento:

Fernando Gomes Gonçalves
Autor

Sebastiao Venancio Martins
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 28/07/2026 às 21:07:36 e pelo orientador em 04/08/2026 às 10:54:44. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **8UHA.7Q7S.V5UJ** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação representa uma etapa importante da minha formação acadêmica, profissional e pessoal, construída com o apoio de pessoas e instituições que contribuíram de maneira decisiva ao longo deste percurso.

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pela força nos momentos de dificuldade e pela oportunidade de concluir mais esta etapa.

À minha família, pelo apoio constante, pelos valores transmitidos e pelo incentivo ao estudo e ao trabalho. À minha esposa, Letícia, pelo companheirismo, pela compreensão e pelo apoio ao longo desta caminhada.

Ao professor Sebastião Venâncio Martins, pela orientação, pelas contribuições técnicas e científicas e pela oportunidade de desenvolver este trabalho no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal de Viçosa.

Ao pesquisador João Flávio, meu coorientador, pelo apoio desde o início deste trabalho, pelas contribuições e pela disponibilidade ao longo desta trajetória.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Laboratório de Restauração Florestal, pelo suporte institucional e pela contribuição à minha formação.

À Samarco S.A. pelas ações de restauração florestal das APPs analisadas neste estudo.

A todos os colegas de trabalho, pelo apoio, pela colaboração e pelo companheirismo durante esta caminhada.

A todos os colegas, profissionais e instituições que contribuíram para a geração, organização, interpretação e discussão dos dados utilizados neste estudo, especialmente no contexto da restauração florestal das áreas impactadas pelo rompimento da Barragem de Fundão.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de

Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Restaurar uma paisagem é compreender que a natureza se reconstrói no tempo,
enquanto a ciência nos ajuda a reconhecer cada sinal dessa transformação.

RESUMO

GONÇALVES, Fernando Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2026. **Monitoramento da trajetória de restauração florestal em áreas de preservação permanente impactadas por rejeito de mineração com uso de sensoriamento remoto.** Orientador: Sebastiao Venancio Martins. Coorientador: João Flávio Costa dos Santos.

O monitoramento da restauração florestal em Áreas de Preservação Permanente (APPs) impactadas por rejeitos de mineração exige ferramentas capazes de acompanhar a evolução da cobertura vegetal em escala temporal e espacial compatível com programas de reparação ambiental de longo prazo. Esta dissertação avaliou o potencial do sensoriamento remoto para o monitoramento da trajetória de restauração florestal em APPs da bacia do rio Doce, Minas Gerais, impactadas pelo rompimento da Barragem de Fundão, estruturando-se em dois capítulos complementares. No primeiro capítulo, avaliou-se a trajetória espectral de três Unidades de Trabalho (UT01, UT02 e UT03) entre 2016 e 2026, por meio de imagens anuais Sentinel-2 e de imagens de alta resolução obtidas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), comparando-as a um ecossistema de referência. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi adotado como métrica principal, e os índices SAVI, MSAVI, EVI e EVI2 como indicadores complementares; a elevada correlação entre eles confirmou a coerência da resposta espectral. As três unidades apresentaram aumento progressivo da cobertura verde e redução do déficit espectral (NDVI) em relação à referência, com a UT01 atingindo a maior aproximação espectral em 2026 e tempo médio estimado de convergência de aproximadamente 5,8 anos após a implantação. No segundo capítulo, a análise em nível de pixel avaliou a aplicabilidade do NDVI na identificação de anomalias intraunidade. Na UT02, identificou-se um setor persistentemente inferior, adjacente à estrada, cuja trajetória mais lenta é compatível com efeito de borda e/ou entrada de animais de produção; o aumento da média anual do NDVI não foi acompanhado por redução significativa da variabilidade interna. Na UT03, utilizada como contraste comparativo, não se detectou núcleo anômalo persistente, e o ganho de cobertura ocorreu com redução significativa da variabilidade interna. Conclui-se que imagens anuais Sentinel-2, integradas a VANTs e ao monitoramento de campo, constituem abordagem operacional de baixo custo para triagem, acompanhamento temporal e identificação de anomalias em programas de restauração florestal sobre rejeitos de mineração. Entretanto, a convergência espectral deve ser interpretada como aproximação da cobertura verde, e não como comprovação de restauração ecológica completa, uma vez que o NDVI não

mede diretamente riqueza de espécies, diversidade florística, regeneração natural ou estrutura da comunidade florestal.

Palavras-chave: Restauração ecológica; NDVI; Sentinel-2; VANT; Convergência espectral; Bacia do rio Doce

ABSTRACT

GONÇALVES, Fernando Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2026.
Monitoring the forest restoration trajectory in permanent preservation areas impacted by mining tailings using remote sensing. Adviser: Sebastiao Venancio Martins. Co-adviser: João Flávio Costa dos Santos.

Monitoring forest restoration in Permanent Preservation Areas (PPAs) impacted by mining tailings requires tools capable of tracking the evolution of vegetation cover at temporal and spatial scales compatible with long-term environmental reparation programmes. This dissertation assessed the potential of remote sensing for monitoring the forest restoration trajectory of PPAs in the Doce River basin, Minas Gerais, Brazil, impacted by the Fundão Dam collapse, and was structured into two complementary chapters. The first chapter assessed the spectral trajectory of three Work Units (UT01, UT02 and UT03) from 2016 to 2026, using annual Sentinel-2 images and high-resolution images obtained by Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), compared with a reference ecosystem. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was adopted as the main metric, with SAVI, MSAVI, EVI and EVI2 as complementary indicators; their high correlation confirmed the coherence of the spectral response. The three units showed a progressive increase in green cover and a reduction of the spectral deficit (NDVI) relative to the reference, with UT01 reaching the greatest spectral approximation in 2026 and an estimated mean convergence time of approximately 5.8 years after planting. In the second chapter, a pixel-level analysis assessed the applicability of NDVI for identifying intra-unit anomalies. In UT02, a persistently lower-performing sector adjacent to the road was identified, whose slower trajectory is consistent with edge effects and/or the entry of livestock; the increase in the annual mean NDVI was not accompanied by a significant reduction in internal variability. In UT03, used as a comparative contrast, no persistent anomalous core was detected, and the cover gain occurred with a significant reduction in internal variability. It is concluded that annual Sentinel-2 images, integrated with UAVs and field monitoring, constitute a low-cost operational approach for screening, temporal tracking and anomaly identification in forest restoration programmes on mining tailings. However, spectral convergence should be interpreted as an approximation of green cover, and not as evidence of complete ecological restoration, since NDVI does not directly measure species richness, floristic diversity, natural regeneration or the structure of the forest community.

Keywords: Ecological restoration; NDVI; Sentinel-2; UAV; Spectral convergence;
Doce River basin

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	12
2. REFERÊNCIAS.....	20
CAPÍTULO I.....	23
RESUMO.....	23
1. INTRODUÇÃO	24
2. MATERIAL E MÉTODOS	27
2.1. Área de estudo	27
2.2. Dados Sentinel-2 e seleção das imagens anuais	31
2.3. Imagens obtidas por Veículos Aéreos Não Tripulados e apoio multiescala	33
2.4. Índices espectrais.....	34
2.5. Estatísticas, correlação entre índices e convergência espectral.....	35
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
3.1. Dinâmica estrutural observada por VANTs	38
3.2. Triagem espectral inicial com EVI e coerência entre índices de vegetação.....	39
3.3. Evolução anual do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	41
3.4. Convergência espectral em relação à referência.....	43
3.5. Tempo de aproximação espectral a 80% e 90% da referência	45
3.6. Distribuição recente dos valores de NDVI e implicações para o monitoramento.....	47
4. CONCLUSÕES.....	48
5. REFERÊNCIAS.....	50
CAPÍTULO II.....	53
RESUMO.....	53
1. INTRODUÇÃO	54
2. MATERIAL E MÉTODOS	56
2.1. Área de estudo, contexto ambiental e unidades analisadas	56
2.2. Contexto operacional da restauração florestal.....	57
2.3. Base de dados Sentinel-2 e delimitação analítica	58
2.4. Índice analisado e métricas estatísticas	60
2.5. Análise pixel a pixel e identificação das anomalias intraunidade	60
2.6. Tendências temporais, validação complementar e interpretação operacional.....	62
3. RESULTADOS	63
3.1. Trajetória média da UT02.....	63
3.2. Setor anômalo: identificação e divergência da unidade	64
3.3. Trajetória da UT03 e contraste comparativo	66

3.4. Síntese comparativa entre UT02 e UT03	69
3.5. Estabilidade, variabilidade interna e cartas I-AM	70
3.6. Implicações operacionais do monitoramento intraunidade	72
4. DISCUSSÃO	73
5. CONCLUSÕES.....	76
6. REFERÊNCIAS.....	77
<i>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</i>	<i>81</i>
<i>APÊNDICE A – FIGURAS COMPLEMENTARES DE MONITORAMENTO</i>	<i>84</i>

1. INTRODUÇÃO GERAL

O rompimento da Barragem de Fundão, ocorrido em novembro de 2015 no município de Mariana, Minas Gerais, representa um dos eventos ambientais mais relevantes associados à mineração no Brasil. A liberação e a deposição de rejeitos ao longo do rio Gualaxo do Norte, rio do Carmo e rio Doce provocaram alterações expressivas em ambientes ripários, planícies de inundação, áreas produtivas e formações florestais associadas aos cursos d'água. Estudos baseados em sensoriamento remoto demonstraram perdas de cobertura florestal na Mata Atlântica associadas ao rompimento, evidenciando a magnitude espacial do impacto e a necessidade de ações de recuperação ambiental e restauração florestal em escala de paisagem (OMACHI et al., 2018).

A Figura 1 sintetiza a extensão espacial da área impactada e evidencia a distribuição do rejeito ao longo do sistema fluvial afetado. Essa representação espacial é relevante porque demonstra que o desafio da recuperação ambiental não se restringe a pontos isolados, mas envolve uma paisagem ripária extensa, heterogênea e submetida a diferentes graus de deposição de rejeito, históricos de uso do solo, condições geomorfológicas e pressões antrópicas.

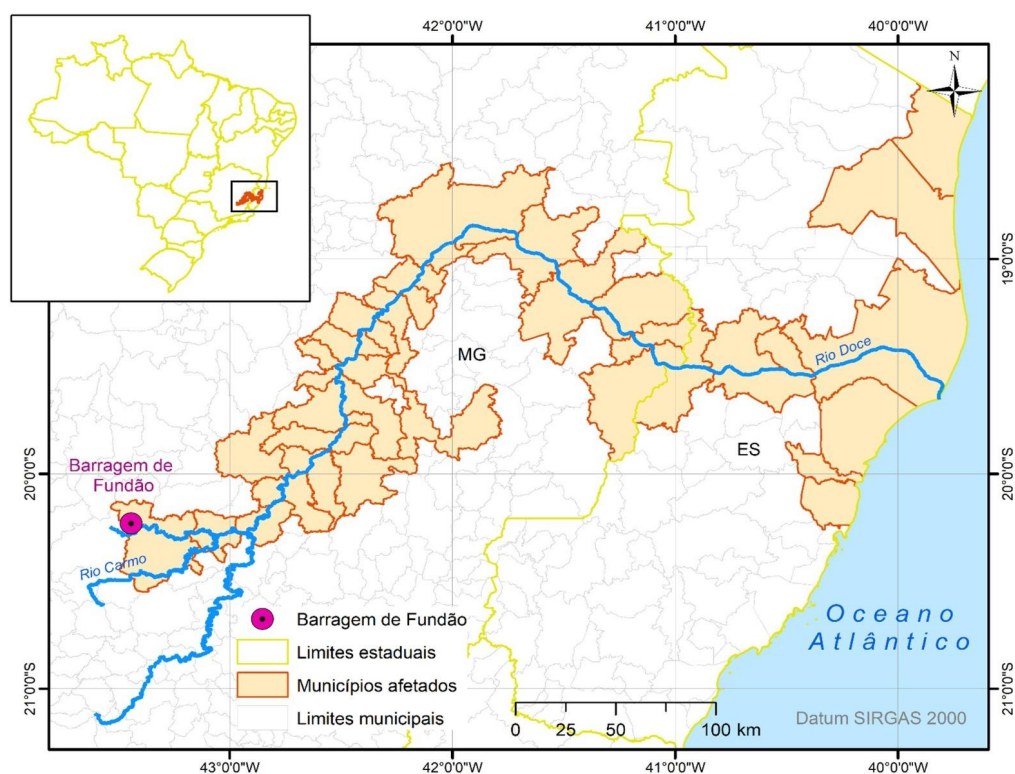


Figura 1 – Mapa de extensão da área impactada. Fonte: elaboração do autor.

As Áreas de Preservação Permanente (APPs) assumem papel central nesse contexto, pois exercem funções ecológicas diretamente relacionadas à proteção dos recursos hídricos,

estabilização de margens, redução de processos erosivos, retenção de sedimentos, conectividade ecológica e manutenção da biodiversidade. A recomposição da vegetação ripária, portanto, não representa apenas a recuperação da cobertura vegetal, mas também a busca pela retomada gradual de funções ecossistêmicas essenciais à estabilidade da paisagem e à resiliência dos ambientes fluviais. Nesse sentido, a restauração florestal em APPs impactadas constitui componente estratégico dos processos de reparação ambiental, especialmente em regiões sob domínio da Mata Atlântica, onde a fragmentação florestal e o histórico de uso agropecuário intensificam a vulnerabilidade dos ecossistemas ripários (RODRIGUES et al., 2009; MARTINS, 2012; SER, 2019).

A restauração ecológica é compreendida como um processo de assistência à recuperação de ecossistemas degradados, danificados ou destruídos, envolvendo não apenas a recomposição da cobertura vegetal, mas também a reorganização gradual da estrutura, da composição, dos processos ecológicos e das funções ambientais ao longo do tempo (SER, 2019). Entretanto, a avaliação do sucesso da restauração é complexa, pois depende de múltiplos indicadores e não pode ser reduzida a uma única métrica. Indicadores relacionados à sobrevivência, riqueza, diversidade, regeneração natural, controle de espécies invasoras, estrutura da vegetação, conectividade e estabilidade da cobertura devem ser considerados de forma integrada para avaliar a efetividade das ações de restauração (WORTLEY et al., 2013; SER, 2019).

Em áreas recobertas por rejeitos de mineração, os desafios da restauração são ampliados por limitações físicas, químicas, biológicas e hidrológicas do substrato. Nesses ambientes, é importante distinguir o rejeito recém-depositado do substrato que passa a se formar após as intervenções de recuperação e o início dos processos pedogenéticos. Inicialmente, o material depositado apresenta características distintas de um solo natural, geralmente associadas à baixa estruturação, reduzido teor de matéria orgânica, limitações à infiltração, maior suscetibilidade à compactação e instabilidade hidrossedimentológica, fatores que podem restringir o estabelecimento da vegetação e retardar a sucessão ecológica (CAMPANHARO et al., 2021; VILLA et al., 2022).

Ao longo do tempo, esse material pode ser modificado por ações de manejo, como reconformação do terreno, incorporação de matéria orgânica, calagem, adubação, semeadura de espécies de recobrimento, plantio de mudas e desenvolvimento da vegetação, passando a constituir um substrato tecnogênico em transformação. Esses substratos podem estar associados à formação de tecnossolos, compreendidos como solos fortemente influenciados pela ação humana, formados ou modificados pela presença de materiais artificiais, rejeitos, resíduos ou outros materiais tecnogênicos, cuja evolução depende tanto das características originais do

material depositado quanto das intervenções de manejo e dos processos ecológicos subsequentes (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022).

No contexto das áreas impactadas pelo rompimento da Barragem de Fundão, a formação desses substratos representa um desafio adicional à restauração florestal, pois a compactação, a baixa fertilidade inicial, a limitação de matéria orgânica, a dinâmica erosiva marginal e a heterogeneidade espacial podem influenciar diretamente o estabelecimento das mudas, o desenvolvimento da cobertura vegetal e a velocidade de recuperação das APPs (CAMPANHARO et al., 2021; VILLA et al., 2022; MARTINS et al., 2024). Assim, o monitoramento da trajetória de restauração deve considerar que a recuperação espectral da cobertura verde pode ocorrer em ritmo distinto da recuperação edáfica, estrutural e funcional do ecossistema. Essa distinção reforça a necessidade de integrar sensoriamento remoto, imagens de VANTs e avaliações de campo, permitindo interpretar a evolução do NDVI à luz das limitações e transformações do substrato tecnogênico.

Além das limitações edáficas e geomorfológicas, as áreas em restauração estão frequentemente submetidas a pressões externas, como entrada de animais, pisoteio, herbivoria, falhas de cercamento, competição com gramíneas, recorrência de processos erosivos e interferências humanas no entorno. Esses fatores podem gerar trajetórias distintas de recuperação entre unidades restauradas, mesmo quando submetidas a estratégias semelhantes de implantação. Dessa forma, a reparação ambiental exige monitoramento contínuo e adaptativo, capaz de identificar áreas com menor desempenho, orientar correções de manejo e subsidiar a tomada de decisão em diferentes escalas espaciais e temporais.

O monitoramento é, portanto, componente indispensável da restauração, pois permite verificar se as áreas restauradas estão seguindo trajetória compatível com os objetivos ecológicos e operacionais estabelecidos. Em programas de restauração de grande escala, o acompanhamento exclusivamente por vistorias de campo pode demandar elevado esforço logístico, tempo e custo, especialmente quando as áreas estão distribuídas em diferentes propriedades rurais, municípios e contextos ambientais. Nesse cenário, o sensoriamento remoto tem se consolidado como ferramenta complementar ao monitoramento de campo, oferecendo capacidade de observação repetida, espacialmente abrangente, padronizável e comparável ao longo do tempo (REIS et al., 2019; WANG et al., 2024; ALMEIDA et al., 2025).

A aplicação de séries temporais em áreas de restauração também exige atenção à sazonalidade climática e à variação fenológica da vegetação. Em regiões sob influência de clima estacional, a vegetação pode apresentar alterações naturais de vigor, teor de água, atividade fotossintética e deciduidade sazonal, especialmente em formações florestais adaptadas ao

período seco. Assim, a padronização fenológico-sazonal da série temporal constitui etapa metodológica relevante para reduzir o risco de interpretar diferenças espectrais naturais, decorrentes da época do ano, como avanço ou retração da restauração. Em avaliações interanuais, a comparação entre imagens obtidas em períodos equivalentes aumenta a consistência da análise da trajetória da cobertura vegetal.

Entre os sensores orbitais disponíveis, a missão Sentinel-2 apresenta grande potencial para o monitoramento da restauração florestal, por combinar gratuidade, revisita frequente, cobertura espacial ampla e resolução de 10 m nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo, utilizadas no cálculo de índices de vegetação. O sensor MultiSpectral Instrument (MSI) permite a obtenção de produtos de reflectância de superfície e análises multitemporais aplicáveis ao acompanhamento da cobertura vegetal em escala operacional (DRUSCH et al., 2012; GASCON et al., 2017; COPENICUS SENTINEL-2, 2021). Essas características tornam o Sentinel-2 especialmente útil em programas de restauração ambiental que demandam monitoramento contínuo, reproduzível e de baixo custo.

Entre os índices espectrais aplicados ao acompanhamento da vegetação, o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) destaca-se por sua ampla utilização, simplicidade operacional e relação com biomassa verde, atividade fotossintética e vigor vegetativo (ROUSE et al., 1974; TUCKER, 1979). Em áreas em restauração, o aumento do NDVI pode indicar expansão da cobertura verde, redução de solo exposto, incremento da vegetação herbácea ou arbóreo-arbustiva e avanço do fechamento da cobertura. Por essa razão, o NDVI tem sido amplamente empregado em estudos de diagnóstico, monitoramento e avaliação de trajetórias sucessionais e de restauração em ambientes tropicais (BERVEGLIERI et al., 2021; VALTONEN et al., 2021; DIAS et al., 2022).

Apesar de sua utilidade, o NDVI apresenta limitações importantes. O índice pode ser influenciado por solo exposto, cobertura herbácea, umidade, sombra, relevo, saturação em dosséis densos, bordas florestais e mistura espectral, especialmente em APPs estreitas, onde pixels de 10 m podem integrar sinais de vegetação restaurada, curso d'água, estrada, pastagem, rejeito e áreas adjacentes. Assim, valores elevados de NDVI não devem ser interpretados automaticamente como restauração ecológica completa. O índice informa principalmente sobre cobertura verde e vigor vegetativo, mas não mede diretamente riqueza de espécies, diversidade florística, densidade de regenerantes, composição sucessional, estratificação vertical, controle de invasoras ou qualidade estrutural da comunidade florestal (WORTLEY et al., 2013; DIAS et al., 2022; ALMEIDA et al., 2025).

Nesse sentido, índices complementares como o Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), o Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI), o Enhanced Vegetation Index (EVI) e o Two-band Enhanced Vegetation Index (EVI2) podem contribuir para avaliar a coerência da resposta espectral observada pelo NDVI. Esses índices apresentam diferentes sensibilidades à influência do solo, à saturação espectral e à variação da biomassa, sendo úteis para verificar se a trajetória detectada pelo índice principal é consistente com outros indicadores espectrais (HUETE, 1988; QI et al., 1994; HUETE et al., 2002; JIANG et al., 2008; XUE; SU, 2017). Dessa forma, a combinação entre NDVI e índices complementares amplia a robustez da interpretação temporal da cobertura vegetal e reduz o risco de conclusões baseadas em uma única métrica espectral.

A utilização de ecossistemas de referência também é relevante na avaliação de áreas em restauração, pois permite contextualizar a trajetória das áreas restauradas em relação a uma condição local de vegetação mais estável. Contudo, a referência deve ser interpretada de forma criteriosa. Em estudos baseados em sensoriamento remoto, o ambiente de referência pode funcionar como controle positivo espectral, representando uma condição de maior cobertura verde e estabilidade relativa, sem pressupor equivalência florística, estrutural ou funcional completa com as áreas restauradas. Assim, a aproximação espectral entre uma área restaurada e a referência deve ser entendida como indício de convergência da cobertura vegetal, e não como comprovação isolada de restauração ecológica plena (SER, 2019; ALMEIDA et al., 2025).

A diferença espectral entre as unidades restauradas e o ambiente de referência, expressa por ΔNDVI , constitui uma abordagem útil para avaliar a redução do déficit de cobertura verde ao longo do tempo. Valores de ΔNDVI próximos de zero indicam maior aproximação espectral em relação ao ambiente de referência, enquanto valores persistentemente negativos podem sinalizar áreas com menor desempenho relativo, maior heterogeneidade interna ou necessidade de inspeção em campo. Essa abordagem transforma séries temporais anuais em informação aplicada ao manejo, permitindo priorizar áreas para manutenção, replantio, controle de gramíneas, correção de processos erosivos, reforço de cercamentos ou outras ações corretivas.

As imagens obtidas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) complementam essa abordagem ao oferecer maior resolução espacial e permitir interpretação visual mais detalhada da composição da cobertura. Em áreas em restauração, os VANTs podem auxiliar na identificação de solo exposto, cobertura herbácea, dossel arbóreo-arbustivo, sombra, falhas de plantio, bordas e setores com menor desenvolvimento. Estudos recentes demonstram o potencial de imagens de VANTs para o monitoramento de áreas em restauração e para a

discriminação de componentes da cobertura, incluindo gramíneas invasoras e manchas de vegetação em alta resolução (REIS et al., 2019; REZENDE DE ATAÍDE et al., 2024).

Dessa forma, o sensoriamento remoto deve ser compreendido como componente de um sistema integrado de monitoramento, e não como substituto do acompanhamento de campo. Em um primeiro nível, imagens Sentinel-2 e índices espectrais fornecem uma leitura macro da trajetória de cobertura vegetal, identificam déficits espectrais e apontam áreas prioritárias. Em um segundo nível, imagens de VANTs ou sensores de maior resolução refinam a localização espacial de anomalias e reduzem incertezas associadas a pixels mistos. Por fim, a validação de campo permite confirmar as causas dos desvios e definir intervenções adequadas, integrando dados espectrais, evidências visuais e indicadores ecológicos.

Essa integração entre satélite, VANT e campo permite articular diferentes escalas de análise. O Sentinel-2 fornece uma visão ampla, recorrente e comparável da evolução da cobertura vegetal ao longo do tempo, sendo adequado para triagem macro e acompanhamento de grandes áreas. Os VANTs, por sua vez, oferecem detalhamento espacial superior, permitindo observar condições locais que podem não ser individualizadas no pixel orbital, como falhas de plantio, manchas de solo exposto, predominância de gramíneas, bordas, sombras e interferências pontuais. Assim, o satélite contribui para indicar onde observar, enquanto o VANT e o campo auxiliam na interpretação das causas e na definição das ações de manejo.

Um aspecto frequentemente subexplorado nesse tipo de monitoramento é a heterogeneidade espacial interna das áreas restauradas. A leitura baseada apenas na média anual de uma unidade pode mascarar setores com resposta espectral persistentemente inferior ao restante da área, associados a falhas localizadas de implantação, efeito de borda, processos erosivos ou pressões antrópicas pontuais. Nesse sentido, a análise em nível de pixel e a avaliação da variabilidade interna — por meio de medidas de dispersão, escores padronizados e cartas de controle — ampliam a capacidade diagnóstica do monitoramento, permitindo distinguir o avanço médio da cobertura vegetal da efetiva homogeneização do fragmento em formação. Abordagens recentes têm explorado a detecção de anomalias espectrais e a identificação de setores discrepantes como estratégia para direcionar inspeções de campo e antecipar correções de manejo em programas de restauração (ALBUQUERQUE et al., 2021; DIAS et al., 2022; O'DONNELL et al., 2024; KLEINSMANN et al., 2025).

No contexto da reparação ambiental decorrente do rompimento da Barragem de Fundão, essa integração é especialmente relevante, pois as áreas restauradas apresentam diferentes idades de implantação, larguras de APP, históricos de uso, condições geomorfológicas, níveis de deposição de rejeito e pressões externas. Consequentemente, a resposta da vegetação pode

variar entre unidades de trabalho e dentro de uma mesma unidade. A identificação de trajetórias diferenciadas e de anomalias intraunidade pode apoiar a padronização do monitoramento, otimizar custos operacionais, aumentar a transparência do acompanhamento e direcionar equipes de campo para áreas com maior necessidade de intervenção.

Além de sua aplicação operacional, abordagens multitemporais baseadas em sensoriamento remoto apresentam potencial para apoiar o acompanhamento técnico e regulatório de grandes áreas de restauração, especialmente em paisagens afetadas por eventos extremos, como rompimentos de barragens, enchentes, incêndios, deposição de sedimentos ou outros distúrbios de grande magnitude. Em ambientes ripários, onde a recuperação da vegetação está diretamente relacionada à estabilidade das margens, à proteção dos cursos d'água e à recomposição de corredores ecológicos, a triagem por imagens orbitais pode contribuir para identificar áreas prioritárias, orientar auditorias, subsidiar relatórios técnicos e aumentar a transparência na avaliação da efetividade das ações de restauração florestal.

Embora o sensoriamento remoto já tenha sido amplamente utilizado para quantificar a perda florestal associada ao rompimento da Barragem de Fundão (OMACHI et al., 2018), permanece menos explorada a avaliação sistemática da trajetória de recuperação das áreas restauradas e da heterogeneidade interna dessas unidades ao longo do tempo. É nesse intervalo — entre o diagnóstico do impacto e a verificação operacional da recuperação — que se insere a presente dissertação.

Diante desse contexto, esta dissertação foi estruturada em dois capítulos complementares. O primeiro capítulo desenvolveu uma abordagem temporal macro, baseada em imagens anuais Sentinel-2, índices espectrais, comparação com ambiente de referência e apoio visual de imagens obtidas por VANTs, com o objetivo de avaliar a trajetória de recuperação da cobertura vegetal em três Unidades de Trabalho localizadas em APPs impactadas por rejeito de mineração. O segundo capítulo aprofundou a análise em escala intraunidade, utilizando o NDVI em nível de pixel para identificar anomalias espectrais persistentes e setores com desempenho inferior à média da própria unidade. Dessa forma, os capítulos articulam duas escalas de monitoramento: a avaliação geral da trajetória de recuperação e a identificação espacial de setores prioritários para inspeção, validação e tomada de decisão operacional.

O objetivo geral desta dissertação foi avaliar o potencial do sensoriamento remoto para o monitoramento da trajetória de restauração florestal em Áreas de Preservação Permanente impactadas por rejeito de mineração, considerando a evolução temporal da cobertura vegetal, a convergência espectral em relação a ambientes de referência e a identificação de anomalias

internas que possam indicar necessidade de intervenção de manejo. Para alcançar esse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos: i) avaliar a evolução temporal da cobertura vegetal em três Unidades de Trabalho por meio de imagens anuais Sentinel-2 e de índices espectrais; ii) verificar a coerência entre o NDVI e os índices complementares SAVI, MSAVI, EVI e EVI2; iii) avaliar a convergência espectral das unidades restauradas em relação a um ecossistema de referência, por meio do Δ NDVI; e iv) verificar a funcionalidade operacional do NDVI na identificação de anomalias intraunidade, comparando a trajetória de setores com desempenho espectral contrastante dentro de uma mesma unidade e avaliando seu potencial para subsidiar inspeções de campo, validações por VANT e decisões de manejo adaptativo.

2. REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, R. W.; FERREIRA, M. E.; OLSEN, S. I.; TYMUS, J. R. C.; BALIEIRO, C. P.; MANSUR, H.; MOURA, C. J. R.; COSTA, J. V. S.; BRANCO, M. R. C.; GROHMANN, C. H. Forest restoration monitoring protocol with a low-cost remotely piloted aircraft: lessons learned from a case study in the Brazilian Atlantic Forest. *Remote Sensing*, [S. l.], v. 13, n. 12, p. 2401, 2021. DOI: 10.3390/rs13122401.
- ALMEIDA, D. R. A. de; BROADBENT, E. N.; ZAMBRANO, A. M. A.; WILKINSON, B. E.; FERREIRA, M. E.; CHAZDON, R. L. Remote sensing approaches to monitor tropical forest restoration: current methods and future possibilities. *Journal of Applied Ecology*, [S. l.], v. 62, 2025. DOI: 10.1111/1365-2664.14830.
- BERVEGLIERI, A.; IMAI, N. N.; CHRISTOVAM, L. E.; GALO, M. L. B. T.; TOMMASELLI, A. M. G.; HONKAVAARA, E. Analysis of trends and changes in the successional trajectories of tropical forest using the Landsat NDVI time series. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, [S. l.], v. 24, p. 100622, 2021. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100622.
- CAMPANHARO, I. F.; MARTINS, S. V.; VILLA, P. M.; KRUSCHEWSKY, G. C.; DIAS, A. A.; NABETA, F. H. Forest restoration methods, seasonality, and penetration resistance does not influence aboveground biomass stock on mining tailings in Mariana, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, [S. l.], v. 93, p. e20201209, 2021. DOI: 10.1590/0001-3765202120201209.
- COPERNICUS SENTINEL-2. MSI Level-2A BOA Reflectance Product: collection 1. [S. l.]: European Space Agency, 2021. DOI: 10.5270/S2_-zmk9xsj.
- DIAS, T. C.; SILVEIRA, L. F.; PIRONKOVA, Z. I.; FRANCISCO, M. R. Greening and browning trends in a tropical forest hotspot: accounting for fragment size and vegetation indices. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, [S. l.], v. 26, p. 100751, 2022. DOI: 10.1016/j.rsase.2022.100751.
- DRUSCH, M.; DEL BELLO, U.; CARLIER, S.; COLIN, O.; FERNANDEZ, V.; GASCON, F. et al. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, [S. l.], v. 120, p. 25-36, 2012. DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.026.
- GASCON, F.; BOUZINAC, C.; THÉPAUT, O.; JUNG, M.; FRANCESCONI, B.; LOUIS, J. et al. Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status. *Remote Sensing*, [S. l.], v. 9, n. 6, p. 584, 2017. DOI: 10.3390/rs9060584.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
- HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, [S. l.], v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
- JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, [S. l.], v. 112, n. 10, p. 3833-3845, 2008. DOI: 10.1016/j.rse.2008.06.006.
- KLEINSMANN, J.; AHMAD, M.; KOOISTRA, L.; VÅGEN, T. G. Continuous anomaly detection using remote sensing to monitor on-farm restoration in sub-Saharan Africa. *Remote*

Sensing Applications: Society and Environment, [S. l.], v. 39, p. 101644, 2025. DOI: 10.1016/j.rsase.2025.101644.

MARTINS, S. V. Recuperação de áreas degradadas: conceitos e aplicações. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2012.

MARTINS, S. V.; PILOCELLI, A.; KRUSCHEWSKY, G. C.; DIAS, A. A.; NABETA, F. H.; VILLA, P. M. Seed bank and aboveground vegetation of Atlantic Forest re-growing on mining tailings in Mariana: highlighting diversity patterns of functional groups. *Ecological Research*, [S. l.], v. 39, n. 3, p. 289-302, 2024. DOI: 10.1111/1440-1703.12453.

O'DONNELL, M. S.; WHIPPLE, A. L.; INMAN, R. D.; TARBOX, B. C.; MONROE, A. P.; ROBB, B. S.; ALDRIDGE, C. L. Remote sensing for monitoring mine lands and recovery efforts. Reston: U.S. Geological Survey, 2024. 34 p. (Circular, 1525). DOI: 10.3133/cir1525.

OMACHI, C. Y.; SIANI, S. M. O.; CHAGAS, F.; MASCAGNI, M.; CORDEIRO, M.; GARCIA, G.; THOMPSON, C. C.; SIEGLE, E.; THOMPSON, F. L. Atlantic Forest loss caused by the world's largest tailing dam collapse: Fundão Dam, Mariana, Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, [S. l.], v. 12, p. 30-34, 2018. DOI: 10.1016/j.rsase.2018.08.003.

QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A. R.; KERR, Y. H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, [S. l.], v. 48, n. 2, p. 119-126, 1994. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90134-1.

REIS, B. P.; MARTINS, S. V.; FERNANDES FILHO, E. I.; SARCINELLI, T. S.; GLERIANI, J. M.; MARCATTI, G. E.; LEITE, H. G.; HALASSY, M. Forest restoration monitoring through digital processing of high resolution images. *Ecological Engineering*, [S. l.], v. 127, p. 178-186, 2019. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.11.022.

REZENDE DE ATAÍDE, M. V.; BARBOSA RODRIGUES, S.; ROCHA SILVA, T.; SILVA COELHO, A. C.; WIEDERHECKER, A.; MASCIA VIEIRA, D. L. Monitoring invasive exotic grass species in ecological restoration areas of the Brazilian savanna using UAV images. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, [S. l.], v. 36, p. 101328, 2024. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101328.

RODRIGUES, R. R.; LIMA, R. A. F.; GANDOLFI, S.; NAVE, A. G. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. *Biological Conservation*, [S. l.], v. 142, n. 6, p. 1242-1251, 2009. DOI: 10.1016/j.biocon.2008.12.008.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. Greenbelt: NASA/GSFC, 1974. (Type III Final Report).

SER. International principles and standards for the practice of ecological restoration. 2. ed. Washington, DC: Society for Ecological Restoration, 2019.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.

VALTONEN, A.; KORKIATUPA, E.; HOLM, S.; MALINGA, G.; NAKADAI, R. Remotely sensed vegetation greening along a restoration gradient of a tropical forest, Kibale National Park, Uganda. *Land Degradation & Development*, [S. l.], v. 32, n. 18, p. 5166-5177, 2021. DOI: 10.1002/ldr.4096.

VILLA, P. M.; MARTINS, S. V.; OLIVEIRA NETO, S. N. de; RODRIGUES, A. C.; HERNÁNDEZ, E. P.; KIM, D. G. Attributes of stand-age-dependent forest determine

technosol fertility of Atlantic Forest re-growing on mining tailings in Mariana, Brazil. *Journal of Forestry Research*, [S. l.], v. 33, p. 1897-1909, 2022. DOI: 10.1007/s11676-021-01359-z.

WANG, R.; SUN, Y.; ZONG, J.; WANG, Y.; CAO, X.; WANG, Y.; CHENG, X.; ZHANG, W. Remote sensing application in ecological restoration monitoring: a systematic review. *Remote Sensing*, [S. l.], v. 16, n. 12, p. 2204, 2024. DOI: 10.3390/rs16122204.

WORTLEY, L.; HERO, J. M.; HOWES, M. Evaluating ecological restoration success: a review of the literature. *Restoration Ecology*, [S. l.], v. 21, n. 5, p. 537-543, 2013. DOI: 10.1111/rec.12028.

XUE, J.; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. *Journal of Sensors*, [S. l.], v. 2017, p. 1353691, 2017. DOI: 10.1155/2017/1353691.

CAPÍTULO I

Avaliação da trajetória de recuperação da cobertura vegetal em Áreas de Preservação Permanente restauradas sobre rejeito de mineração por imagens anuais Sentinel-2

RESUMO

A restauração florestal ripária em Áreas de Preservação Permanente (APPs) afetadas por rejeitos de mineração demanda métodos capazes de acompanhar a recuperação da cobertura vegetal em escalas compatíveis com programas de reparação ambiental. Este estudo avaliou a trajetória espectral de três Unidades de Trabalho (UTs) restauradas na bacia do rio Doce, Minas Gerais, Brasil, utilizando imagens anuais Sentinel-2 e imagens obtidas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs). O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi adotado como métrica principal, enquanto o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado (MSAVI), o Índice de Vegetação Melhorado (EVI) e o Índice de Vegetação Melhorado de Dois Fatores (EVI2) foram usados como indicadores complementares. As áreas restauradas foram comparadas com um ecossistema de referência por estatísticas anuais, correlação entre índices e diferença espectral (Δ NDVI). Os resultados indicaram aumento da cobertura verde, alta correlação entre o NDVI e os demais índices ($r \approx 0,87-0,93$) e redução do déficit espectral. A UT01 apresentou maior aproximação espectral em 2026 (Δ NDVI = $-0,004$); a UT02 mostrou recuperação gradual; e a UT03 apresentou resposta rápida, influenciada pela pequena largura ripária e por pixels mistos. A convergência espectral média foi estimada em 5,8 anos após a implantação. Conclui-se que imagens anuais Sentinel-2, integradas a VANTs e ao monitoramento de campo, constituem abordagem operacional para acompanhar a restauração ripária sobre rejeitos de mineração, desde que interpretadas como aproximação da cobertura verde, e não como comprovação de restauração ecológica completa.

Palavras-chave: restauração florestal; Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; Sentinel-2; Veículos Aéreos Não Tripulados; rejeito de mineração; rio Doce.

1. INTRODUÇÃO

O rompimento da Barragem de Fundão, ocorrido em novembro de 2015 no município de Mariana, Minas Gerais, mobilizou rejeitos de minério de ferro ao longo do rio Gualaxo do Norte, rio do Carmo e rio Doce, provocando perdas expressivas de vegetação ripária e alterações na matriz socioambiental regional. Técnicas de sensoriamento remoto foram utilizadas para quantificar perdas florestais associadas ao desastre, especialmente por meio do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) em áreas de Floresta Atlântica afetadas pelos rejeitos (OMACHI et al., 2018). Entretanto, após o diagnóstico espacial do impacto, permanece a necessidade de avaliar a trajetória de recuperação das Áreas de Preservação Permanente (APPs) restauradas, verificando se a cobertura vegetal apresenta evolução temporal compatível com a recomposição da vegetação ripária e com a aproximação espectral em relação a ecossistemas de referência.

A restauração florestal em APPs impactadas por rejeitos de mineração apresenta desafios distintos daqueles observados em áreas degradadas convencionais. Nessas condições, a deposição de rejeitos pode formar ou condicionar substratos tecnogênicos, frequentemente associados ao desenvolvimento de tecnossolos, cuja dinâmica física, química, biológica e hidrológica difere daquela observada em solos naturais previamente estruturados (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022; VILLA et al., 2022; MARTINS et al., 2024). A compactação, a baixa estruturação física, a reduzida disponibilidade de matéria orgânica, a instabilidade hidrossedimentológica, a dinâmica erosiva marginal e pressões externas, como entrada de animais, pisoteio, herbivoria, competição com gramíneas e falhas de cercamento, podem limitar o estabelecimento das mudas, retardar o fechamento da cobertura vegetal e aumentar a necessidade de intervenções sucessivas de manejo.

Nesse contexto, o monitoramento da restauração deve combinar indicadores de campo, imagens orbitais, análise estatística e, quando possível, imagens de alta resolução obtidas por plataformas aéreas. Essa integração é necessária porque a recuperação da cobertura verde, embora represente componente importante da restauração, não equivale automaticamente à restauração ecológica completa. O aumento da resposta espectral da vegetação pode indicar redução de solo exposto, incremento da cobertura herbácea, desenvolvimento arbóreo-arbustivo ou fechamento progressivo do dossel, mas não mede diretamente riqueza de espécies, diversidade florística, regeneração natural, composição sucessional, estratificação vertical ou

autossustentabilidade ecológica da comunidade restaurada (WORTLEY et al., 2013; SER, 2019; ALMEIDA et al., 2025).

O uso de imagens orbitais de acesso aberto tem ampliado a capacidade de acompanhamento de áreas restauradas, especialmente em programas de reparação ambiental que demandam monitoramento contínuo, reproduzível e de baixo custo. O sensor MultiSpectral Instrument (MSI) da missão Sentinel-2 oferece bandas de 10 m no visível e no infravermelho próximo, revisita frequente e disponibilidade de produtos de reflectância de superfície, permitindo análises multitemporais padronizadas da cobertura vegetal (DRUSCH et al., 2012; GASCON et al., 2017; COPERNICUS SENTINEL-2, 2021). Em regiões sob influência de clima estacional, como aquelas associadas à Floresta Estacional Semidecidual, a comparação temporal dessas imagens deve considerar a sazonalidade climática e a variação fenológica da vegetação. Assim, a padronização fenológico-sazonal da série temporal, por meio da seleção de imagens em períodos equivalentes do ciclo climático, reduz o risco de interpretar diferenças espectrais naturais como avanço ou retração da restauração.

Entre os índices espectrais aplicados ao acompanhamento da vegetação, o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) destaca-se por sua ampla utilização, simplicidade operacional e relação com biomassa verde, atividade fotossintética e vigor vegetativo (ROUSE et al., 1974; TUCKER, 1979). Em áreas em restauração, o aumento do NDVI pode indicar expansão da cobertura verde, redução de solo exposto, incremento da vegetação herbácea ou arbóreo-arbustiva e avanço do fechamento da cobertura. Apesar disso, o índice pode ser influenciado por solo exposto, cobertura herbácea, umidade, sombra, relevo, saturação em dosséis densos e mistura espectral, especialmente em APPs estreitas, onde pixels de 10 m podem integrar sinais de vegetação restaurada, curso d'água, estrada, pastagem, rejeito e áreas adjacentes.

Essa limitação é particularmente relevante em áreas recém-implantadas, nas quais o uso inicial de misturas de gramíneas e leguminosas para estabilização, proteção e recobrimento do solo pode elevar a resposta espectral da cobertura verde sem representar, necessariamente, avanço proporcional da estrutura arbórea. Por isso, índices complementares como o Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), o Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI), o Enhanced Vegetation Index (EVI) e o Two-band Enhanced Vegetation Index (EVI2) são úteis para verificar a coerência da resposta espectral e reduzir interpretações baseadas em um único indicador. O SAVI e o MSAVI contribuem para reduzir a influência do solo exposto ou parcialmente coberto (HUETE, 1988; QI et al., 1994), enquanto o EVI pode auxiliar na triagem preliminar de áreas onde a resposta inicial do NDVI esteja associada à biomassa herbácea de

recobrimento ou à transição entre cobertura herbácea e arbóreo-arbustiva (HUETE et al., 2002). O EVI2, por sua vez, amplia a aplicabilidade em séries multitemporais ao simplificar a estrutura do EVI sem o uso da banda azul (JIANG et al., 2008).

A utilização de ecossistemas de referência é central para a avaliação de áreas em restauração, pois permite contextualizar a trajetória das unidades restauradas em relação a uma condição local de vegetação mais estável. Neste capítulo, o ambiente de referência foi adotado como controle positivo espectral, representando uma condição de maior cobertura verde e estabilidade relativa. Essa comparação não teve como finalidade afirmar equivalência ecológica plena entre áreas restauradas e fragmento nativo, mas avaliar a redução do déficit espectral ao longo do tempo, expressa pelo ΔNDVI , e verificar se as unidades restauradas apresentaram trajetória compatível com a recomposição progressiva da cobertura vegetal. Assim, a convergência espectral foi interpretada como indicador operacional de acompanhamento da restauração, e não como comprovação isolada de restauração ecológica completa (SER, 2019; ALMEIDA et al., 2025).

As imagens obtidas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) complementam essa abordagem ao oferecer maior resolução espacial e permitir interpretação visual mais detalhada da composição da cobertura. Enquanto o Sentinel-2 fornece uma leitura ampla, temporal e recorrente da trajetória da vegetação, os VANTs permitem observar condições locais que podem não ser individualizadas no pixel orbital, como solo exposto, cobertura herbácea, dossel arbóreo-arbustivo, sombra, falhas de plantio, bordas e setores com menor desenvolvimento. Essa complementaridade é especialmente importante em APPs estreitas e heterogêneas, nas quais pequenas diferenças espaciais podem influenciar de forma significativa a média espectral da unidade.

Este estudo teve como objetivo avaliar a trajetória de recuperação da cobertura vegetal em APPs restauradas sobre rejeito de mineração na bacia do rio Doce, comparando três Unidades de Trabalho (UTs) com um ecossistema de referência. Especificamente, buscou-se: i) analisar a evolução anual do NDVI como indicador principal da cobertura verde; ii) verificar a coerência entre NDVI, SAVI, MSAVI, EVI e EVI2, com atenção ao uso do EVI como triagem complementar em áreas com possível influência de cobertura herbácea inicial; iii) avaliar a convergência espectral das UTs em relação à referência por meio do ΔNDVI ; e iv) discutir o potencial e as limitações da integração entre Sentinel-2, VANTs e interpretação operacional no monitoramento da restauração florestal ripária sobre rejeitos de mineração.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi conduzido em Áreas de Preservação Permanente (APPs) ripárias da bacia do rio Doce, em Minas Gerais, sob domínio da Mata Atlântica, nos municípios de Mariana e Barra Longa. A região apresenta clima do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por inverno seco, verão chuvoso e concentração da precipitação entre outubro e março (ALVARES et al., 2013). Na região, predominam Latossolos Vermelhos distróficos, associados a fitofisionomias de Floresta Estacional Semidecidual (IBGE, 2012).

A sazonalidade climática foi considerada na interpretação dos índices espectrais, pois influencia diretamente a atividade fotossintética, a fenologia, a deciduidade sazonal e a variabilidade anual da cobertura vegetal. Nesse sentido, o climograma regional apresentado na Figura 1 contextualiza o regime climático da área de estudo e fundamenta a necessidade de padronização fenológico-sazonal das imagens utilizadas na análise temporal.

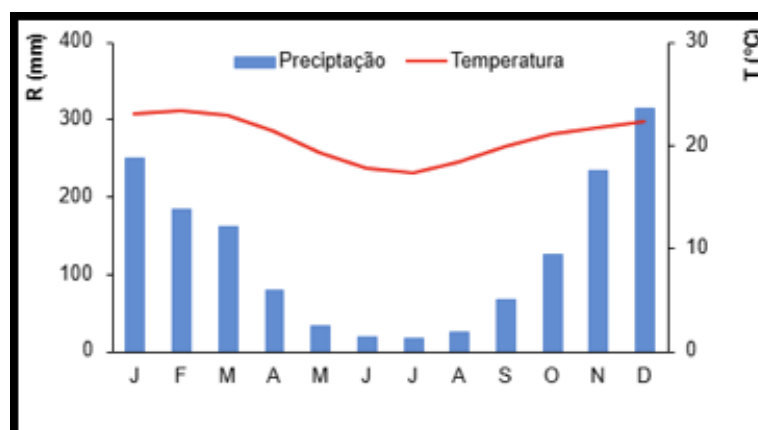


Figura 1 – Climograma regional da área de estudo, representado pelo município de Mariana, MG, com dados médios mensais de precipitação e temperatura. Fonte: adaptado de Alvares et al. (2013).

As unidades avaliadas situam-se no trecho da bacia atingido pelo rompimento da Barragem de Fundão, nos municípios de Mariana e Barra Longa (Figura 2). Para a execução e o monitoramento das ações de restauração, a área afetada foi compartimentada em Unidades de Trabalho (UTs), delimitadas segundo limites de propriedades rurais, largura da APP, contexto geomorfológico, histórico de uso do solo e estratégias de recuperação adequadas a cada condição local.

Foram selecionadas três unidades monitoradas pelo Laboratório de Restauração Florestal da Universidade Federal de Viçosa (LARF-UFV): UT01, UT02 e UT03. Essas

unidades representam diferentes larguras de APP, idades de implantação, contextos de uso do solo e condicionantes ambientais relevantes para a interpretação espectral. A Figura 2 apresenta a localização espacial das unidades avaliadas e do ecossistema de referência, permitindo visualizar sua distribuição na bacia do rio Doce e sua relação com o sistema ripário impactado.

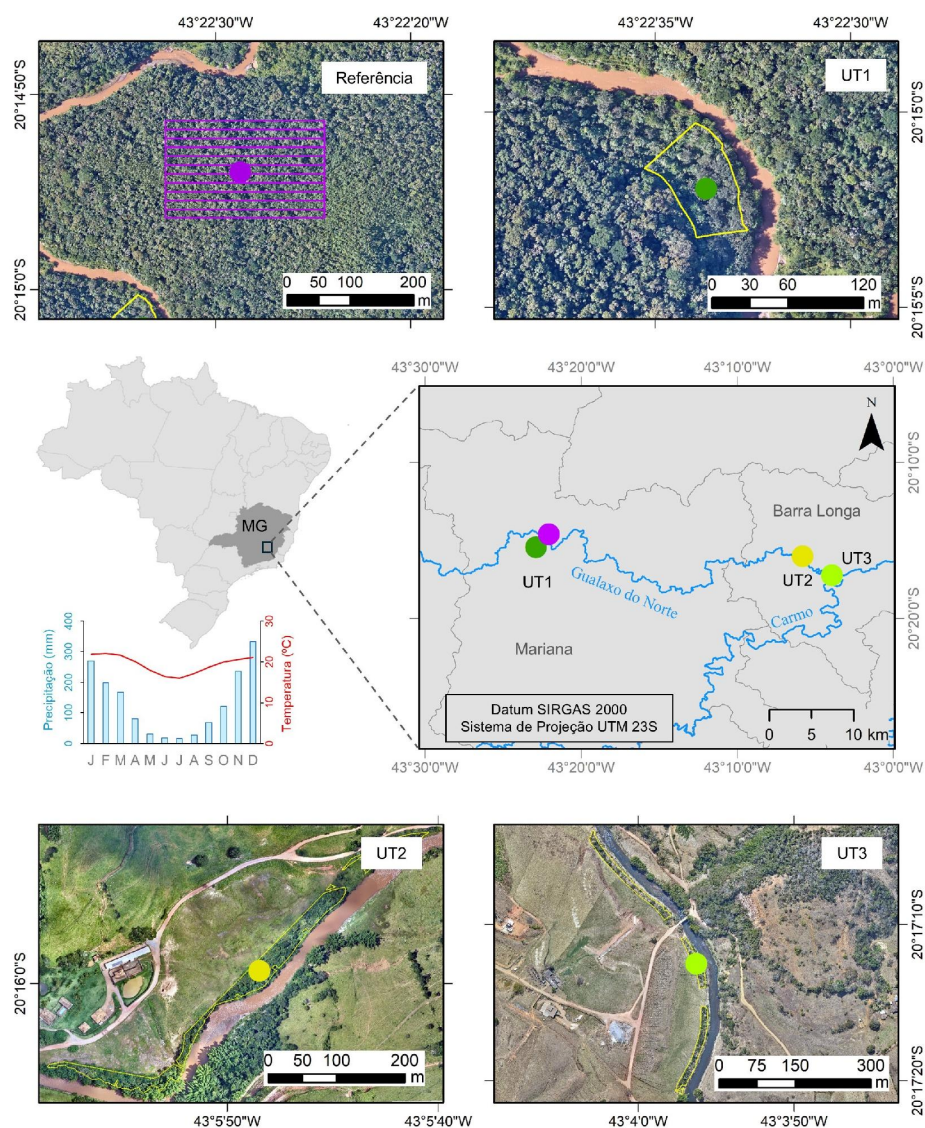


Figura 2 – Localização das unidades avaliadas, UT01, UT02 e UT03, e do ecossistema de referência na bacia do rio Doce, MG. Fonte: elaboração do autor.

As características das três unidades e do ecossistema de referência estão sintetizadas na Tabela 1. Essa síntese é importante porque os valores dos índices espectrais não dependem apenas da cobertura vegetal atual, mas também da largura da APP, do ano de implantação, do uso pretérito, da condição do substrato, da presença de tecnossolo, da compactação, da cobertura herbácea inicial e da proximidade com áreas de borda ou pressão antrópica. Assim, a

Tabela 1 fornece o contexto necessário para interpretar diferenças de trajetória espectral entre as unidades avaliadas.

Tabela 1 – Caracterização das unidades de trabalho e do ecossistema de referência utilizados na interpretação espectral da trajetória de restauração.

Área	Município	Coordenadas	Área	Largura da APP	Implantação	Condição/condicionante principal
UT01	Mariana	20°15'01.9"S; 43°22'33.7"W	3.680 m ²	50 m	2017/2018	Vegetação florestal suprimida pela onda de rejeitos; matriz com maior cobertura florestal.
UT02	Barra Longa	20°15'59.2"S; 43°05'48.0"W	10.400 m ²	30 m	Final de 2020	Planície de inundação, uso pretérito por pastagem, tecnossolo compactado e dinâmica erosiva marginal.
UT03	Barra Longa	20°17'12.4"S; 43°03'56.3"W	6.150 m ²	15 m	Final de 2022	Área rural consolidada, uso pretérito por pastagem e cobertura herbácea inicial com <i>Cynodon dactylon</i> cv. Tifton.
Referência	Mariana / Rio Gualaxo do Norte	20°14'55.34"S; 43°22'29.66"W	2,5 ha	50 m	Controle positivo	Fragmento de vegetação nativa em estágio avançado de sucessão, selecionado por proximidade geográfica e similaridade fitofisionômica.

Para fins de comparação, foi selecionada uma área de referência com vegetação nativa localizada na margem do rio Gualaxo do Norte, a aproximadamente 700 m de altitude. A seleção dessa área seguiu os princípios da Society for Ecological Restoration (SER, 2019), considerando proximidade geográfica, similaridade fitofisionômica e estabilidade relativa da cobertura vegetal. A referência foi adotada como controle positivo para fins de comparação espectral, sem pressupor equivalência florística, estrutural ou funcional completa com as áreas restauradas.

Nas três unidades avaliadas, adotou-se restauração ativa por plantio de mudas de espécies nativas, com altura mínima de 40 cm. As práticas de implantação e manejo incluíram isolamento por cercamento, com arame farpado ou liso e mourões de eucalipto tratado, correção da acidez por calagem, adição de matéria orgânica, adubação química, abertura mecanizada de covas com cerca de 40 cm de profundidade, replantios no período chuvoso, controle de gramíneas competidoras e adubação de cobertura.

A caracterização visual das unidades no período imediatamente posterior ao rompimento e no estágio atual de restauração é apresentada na Figura 3. Essa comparação permite observar diferenças de contexto entre UT01, UT02 e UT03, como largura da APP, intensidade inicial da perturbação, presença de cobertura herbácea, avanço da cobertura arbóreo-arbustiva e recomposição das faixas ripárias. A leitura conjunta da Figura 3 com a Tabela 1 auxilia na interpretação dos resultados espectrais, pois evidencia que as trajetórias de NDVI, EVI e demais índices devem ser analisadas considerando tanto o histórico de implantação quanto os condicionantes locais de cada unidade.



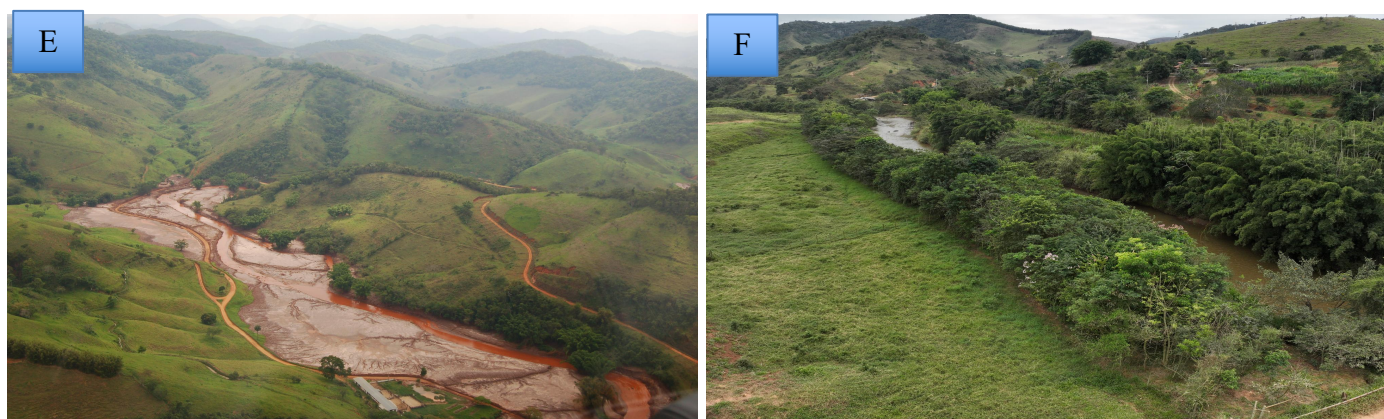


Figura 3 – Sequência comparativa das áreas avaliadas no período pós-rompimento da Barragem de Fundão e em condição atual de restauração florestal, em 2026. As imagens A e B correspondem à Unidade de Trabalho UT01; C e D, à Unidade de Trabalho UT02; e E e F, à Unidade de Trabalho UT03. As imagens à esquerda evidenciam a condição inicial após a deposição de rejeitos, enquanto as imagens à direita demonstram o avanço da cobertura vegetal e a recomposição das faixas ripárias ao longo do processo de restauração. Fonte: acervo do autor/projeto de monitoramento da restauração florestal, adaptado pelo autor.

2.2. Dados Sentinel-2 e seleção das imagens anuais

Foram utilizadas imagens do sensor MultiSpectral Instrument (MSI), a bordo da missão Sentinel-2, em nível de processamento Level-2A, correspondentes a produtos corrigidos atmosféricamente e disponibilizados em reflectância de superfície (Bottom-of-Atmosphere — BOA), provenientes do programa Copernicus da Agência Espacial Europeia (European Space Agency — ESA) (DRUSCH et al., 2012; GASCON et al., 2017; COPENICUS SENTINEL-2, 2021). O acesso e o processamento das imagens foram realizados na plataforma Google Earth Engine (GORELICK et al., 2017), a partir da coleção harmonizada COPENICUS/S2_SR_HARMONIZED, adotada para preservar a continuidade radiométrica da série após a mudança da Processing Baseline 04.00, implementada pela ESA a partir de janeiro de 2022. Utilizaram-se produtos corrigidos atmosféricamente pela rotina Sen2Cor (LOUIS et al., 2016).

A seleção inicial contemplou 133 cenas disponíveis entre 2016 e 2026, abrangendo os tiles 23KPT e 23KQT. As unidades UT01 e UT02 foram cobertas pelo tile 23KPT, enquanto a UT03 localiza-se em área de sobreposição entre os tiles 23KPT e 23KQT. Para reduzir interferências atmosféricas, a triagem de nuvens combinou filtro de metadado por cena, considerando $CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE < 10\%$, com o mascaramento de pixels associados a nuvens opacas e cirrus por meio da banda de qualidade QA60.

Para garantir comparabilidade temporal entre os anos avaliados, foi selecionada uma imagem anual representativa por ano, priorizando-se, sempre que possível, o mês de junho. Essa escolha buscou manter uma janela fenológico-sazonal equivalente ao longo da série temporal, reduzindo a influência de variações naturais associadas à sazonalidade climática, à deciduidade sazonal, à alteração do vigor foliar e às respostas fenológicas da vegetação em ambiente de Floresta Estacional Semidecidual. Quando a imagem de junho não apresentava qualidade adequada, foram priorizadas cenas da mesma janela sazonal, com baixa cobertura de nuvens, ausência ou baixa ocorrência de sombras sobre os polígonos de interesse e maior disponibilidade de pixels válidos nas unidades avaliadas e no ecossistema de referência.

A triagem final combinou os metadados de cobertura de nuvens das cenas com inspeção visual dos polígonos de interesse. Pixels residuais associados a nuvens opacas, cirrus e sombras foram removidos com base nas máscaras de qualidade disponíveis nos produtos Sentinel-2. A opção por uma série anual de imagens, em vez de uma série temporal densa, buscou reduzir a influência de cenas isoladas com contaminação atmosférica e baixa disponibilidade de pixels válidos. Esse cuidado é particularmente relevante em APPs lineares e estreitas, nas quais pequenos deslocamentos, sombras, pixels mistos ou interferências atmosféricas podem afetar a interpretação espectral.

A Tabela 2 sintetiza os principais critérios adotados para a seleção e padronização das imagens Sentinel-2, permitindo verificar a origem dos dados, o nível de processamento, o período avaliado, os filtros de qualidade e os procedimentos utilizados para garantir comparabilidade temporal entre os anos.

Tabela 2 – Síntese dos dados Sentinel-2 utilizados no estudo.

Item	Descrição
Missão/sensor	Sentinel-2 / MultiSpectral Instrument (MSI)
Produto utilizado	Level-2A, reflectância de superfície — Bottom-of-Atmosphere (BOA)
Coleção	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED
Plataforma de processamento	Google Earth Engine
Período avaliado	2016 a 2026
Cenas avaliadas	133 cenas
Critério de nuvens	Cenas com cobertura de nuvens inferior a 10%
Máscara de qualidade	QA60, com remoção de nuvens opacas, cirrus e sombras residuais
Seleção final	Uma imagem anual representativa por ano

Item	Descrição
Janela temporal prioritária	Junho, ou cena mais próxima dentro da mesma janela fenológico-sazonal
Crítérios adicionais	Baixa ocorrência de sombras, inspeção visual dos polígonos e maior disponibilidade de pixels válidos
Unidades cobertas	UT01 e UT02 no tile 23KPT; UT03 em área de sobreposição entre os tiles 23KPT e 23KQT

2.3. Imagens obtidas por Veículos Aéreos Não Tripulados e apoio multiescala

Foram utilizadas imagens de alta resolução espacial obtidas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), previamente ortorretificadas, com Ground Sample Distance (GSD) aproximada de 10 cm. O acervo contemplou campanhas de aerolevantamento fornecidas pela Samarco, com registros em períodos secos e chuvosos, permitindo avaliar qualitativamente a distribuição espacial de solo exposto, cobertura herbácea, dossel arbóreo-arbustivo, sombra, bordas e setores com menor desenvolvimento da vegetação.

As campanhas foram realizadas com equipamento do tipo DJI Mavic 3 Multispectral, também denominado Mavic 3M, que integra uma câmera RGB de 20 MP, sensor CMOS 4/3 e obturador mecânico, além de quatro câmeras multiespectrais de 5 MP nas bandas Green, Red, Red Edge e Near Infrared.

No presente estudo, os produtos utilizados corresponderam principalmente a ortomosaicos RGB de alta resolução, empregados como suporte multiescala à interpretação dos índices orbitais. Essa abordagem permitiu verificar a composição espacial da cobertura observada nos pixels Sentinel-2, especialmente em APPs estreitas, nas quais a resolução espacial de 10 m pode incorporar diferentes alvos espectrais em um mesmo pixel, como vegetação arbórea, gramíneas, solo exposto, sombra, água, estrada ou bordas de uso adjacente.

As imagens obtidas por VANTs foram utilizadas como suporte visual, interpretativo e diagnóstico, e não como base quantitativa principal dos resultados. Essa decisão decorreu do fato de os produtos disponíveis não terem sido acompanhados, de forma padronizada para todas as unidades avaliadas, por validações quantitativas baseadas em matriz de confusão, exatidão global e acurácias por classe. Assim, o uso dos VANTs foi mantido como ferramenta complementar para reduzir incertezas associadas aos pixels mistos, apoiar a interpretação espacial da cobertura vegetal e subsidiar o diagnóstico visual das áreas em restauração, preservando o foco analítico nas métricas espectrais anuais derivadas do Sentinel-2.

2.4. Índices espectrais

Foram calculados cinco índices espectrais a partir das bandas azul, vermelho e infravermelho próximo do Sentinel-2, correspondentes às bandas B2, B4 e B8, respectivamente, com resolução espacial de 10 m. Os índices utilizados foram: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI), Enhanced Vegetation Index (EVI) e Two-band Enhanced Vegetation Index (EVI2).

O NDVI foi adotado como métrica principal de acompanhamento da cobertura verde e do vigor vegetativo, em razão de sua ampla aplicação em estudos de monitoramento da vegetação, restauração ecológica, sucessão florestal e diagnóstico de áreas degradadas (ROUSE et al., 1974; TUCKER, 1979). Os demais índices foram utilizados como indicadores complementares para avaliar a coerência da resposta espectral e reduzir o risco de interpretações baseadas em uma única métrica.

Considerando que parte das áreas recebeu, na fase inicial de restauração, mistura de gramíneas e leguminosas para recobrimento e estabilização do solo, o EVI foi incorporado como análise complementar de triagem para qualificar a interpretação da biomassa verde inicial. Essa etapa teve como finalidade verificar se o aumento do NDVI nos primeiros anos após a implantação poderia estar associado predominantemente à cobertura herbácea de recobrimento, e não necessariamente ao avanço proporcional da estrutura arbórea. Dessa forma, o EVI foi utilizado como controle interpretativo da resposta espectral em áreas com maior influência de biomassa inicial, enquanto o NDVI permaneceu como índice central para avaliação temporal da cobertura verde e da convergência espectral em relação ao ecossistema de referência.

Da mesma forma, SAVI e MSAVI foram utilizados para avaliar a influência do solo exposto e do rejeito mineral em áreas com baixa cobertura vegetal, enquanto o EVI2 permitiu verificar a consistência da resposta espectral sem dependência da banda azul. Todos os índices calculados foram mantidos na análise; entretanto, o NDVI foi adotado como variável central nos gráficos, testes de tendência e avaliação da convergência espectral, devido à sua maior comparabilidade com a literatura, simplicidade de cálculo e facilidade de interpretação operacional. SAVI, MSAVI, EVI e EVI2 foram utilizados para verificar se a trajetória observada pelo NDVI era consistente com índices menos sensíveis ao solo, à cobertura inicial ou à saturação espectral, evitando a repetição de resultados redundantes.

A Tabela 3 apresenta os índices espectrais utilizados, suas respectivas fórmulas, referências metodológicas e função no estudo. Essa organização permite diferenciar o papel do NDVI como indicador principal da cobertura verde e da convergência espectral, bem como o papel dos demais índices como métricas complementares de controle da influência do solo, da biomassa herbácea inicial e da saturação espectral.

Tabela 3 – Índices espectrais aplicados no monitoramento da restauração florestal.

Índice	Fórmula	Referência	Função no estudo
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$(\text{NIR} - \text{Red})/(\text{NIR} + \text{Red})$	Rouse et al. (1974)	Indicador central de vigor vegetativo, cobertura verde e convergência espectral em relação à referência.
Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$[(\text{NIR} - \text{Red})/(\text{NIR} + \text{Red} + \text{L})] \times (1 + \text{L})$	Huete (1988)	Redução da influência do solo/rejeito em áreas com baixa cobertura vegetal.
Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI)	$[2\text{NIR} + 1 - \sqrt{((2\text{NIR} + 1)^2 - 8(\text{NIR} - \text{Red}))}]/2$	Qi et al. (1994)	Ajuste dinâmico da influência do solo em áreas iniciais e heterogêneas.
Enhanced Vegetation Index (EVI)	$G(\text{NIR} - \text{Red})/(\text{NIR} + C_1\text{Red} - C_2\text{Blue} + \text{L})$	Huete et al. (2002)	Triagem complementar da biomassa verde inicial, especialmente em áreas com possível influência de cobertura herbácea de recobrimento.
Two-band Enhanced Vegetation Index (EVI2)	$G(\text{NIR} - \text{Red})/(\text{NIR} + 2,4\text{Red} + \text{L})$	Jiang et al. (2008)	Alternativa ao EVI sem dependência da banda azul, útil para verificar consistência da resposta espectral.

Blue, Red e NIR correspondem, respectivamente, às bandas azul (B2), vermelho (B4) e infravermelho próximo (B8) do Sentinel-2. Para o SAVI, adotou-se $L = 0,5$. Para o EVI e o EVI2, adotaram-se $G = 2,5$, $L = 1$, $C_1 = 6$ e $C_2 = 7,5$.

2.5. Estatísticas, correlação entre índices e convergência espectral

Adotou-se o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000) como datum geodésico e o sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), fuso 23 Sul, para a representação espacial dos dados. As etapas de processamento digital de imagens e elaboração cartográfica foram realizadas no software ArcMap 10.3, enquanto as análises estatísticas foram conduzidas a partir das tabelas de valores espectrais extraídas dos polígonos das unidades avaliadas e do ecossistema de referência.

Os valores dos índices espectrais foram extraídos pixel a pixel nos polígonos da UT01, UT02, UT03 e do ecossistema de referência, considerando apenas pixels válidos após a triagem das imagens anuais. Para cada ano, unidade e índice, foram calculadas estatísticas descritivas, incluindo média, mediana, desvio-padrão, coeficiente de variação, mínimo, máximo, percentil 10 (P10) e percentil 90 (P90). A média foi adotada como síntese central da resposta espectral anual, enquanto o intervalo P10–P90 foi utilizado como medida robusta da heterogeneidade espacial interna.

A coerência entre os índices foi avaliada por correlação de Pearson entre as médias anuais de NDVI, SAVI, MSAVI, EVI e EVI2, considerando conjuntamente o ecossistema de referência e as três unidades avaliadas. Essa etapa permitiu verificar se os índices complementares apresentavam trajetórias consistentes com o NDVI ou se agregavam informação substancialmente distinta à interpretação da restauração.

Além da correlação geral entre índices, foi realizada uma análise complementar específica entre NDVI e EVI, com foco na triagem da resposta espectral inicial das unidades restauradas. Essa avaliação considerou a comparação das trajetórias anuais dos dois índices e a identificação de eventuais divergências nos primeiros anos após a implantação, especialmente em unidades com presença de cobertura herbácea inicial, APP estreita ou maior possibilidade de pixels mistos. A coerência entre NDVI e EVI foi interpretada como reforço à leitura de aumento consistente da cobertura verde, enquanto divergências entre os índices foram tratadas como indicativo de cautela na atribuição da resposta espectral ao avanço arbóreo-florestal.

A evolução temporal pós-implantação foi avaliada por regressão linear simples entre o valor médio anual do índice e o ano de observação. Para o NDVI, também foi calculada a diferença espectral anual em relação ao ecossistema de referência, expressa por:

$$\Delta\text{NDVI} = \text{NDVI da Unidade de Trabalho} - \text{NDVI do ecossistema de referência}$$

Valores negativos de ΔNDVI indicam menor cobertura verde ou menor vigor vegetativo em relação ao fragmento de referência, enquanto valores próximos de zero indicam maior convergência espectral. A convergência foi avaliada pela tendência temporal de ΔNDVI no período pós-implantação de cada unidade. Essa métrica foi interpretada como medida de distância espectral em relação à referência, e não como comprovação direta de restauração ecológica completa.

Adicionalmente, estimou-se de forma exploratória o ano em que a reta ajustada de ΔNDVI atingiria zero, interpretando esse valor como tempo estimado de convergência espectral média. Essa estimativa foi utilizada apenas como métrica operacional de comparação entre as

unidades avaliadas, pois séries curtas, variação climática interanual, pixels mistos, cobertura herbácea inicial e diferenças locais de manejo podem alterar o sinal espectral.

Para o ano de 2026, os valores de NDVI foram comparados entre UT01, UT02, UT03 e o ecossistema de referência por Análise de Variância (ANOVA), seguida do teste de Tukey a 5%. A interpretação dos resultados considerou conjuntamente os valores de p, as tendências gráficas, o Δ NDVI, a distribuição dos valores por unidade, a análise complementar com EVI e o contexto ecológico-operacional de cada área, evitando conclusões baseadas exclusivamente em significância estatística.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A interpretação dos resultados foi organizada como um fluxo de triagem espectral e validação complementar aplicado ao monitoramento da restauração florestal. Inicialmente, as imagens Sentinel-2 foram utilizadas para gerar uma leitura orbital anual, padronizada e comparável da cobertura vegetal nas unidades avaliadas e no ecossistema de referência. A partir dessa base, o Enhanced Vegetation Index (EVI) foi empregado como etapa inicial de triagem, com o objetivo de qualificar a resposta espectral das áreas em fase inicial de restauração, especialmente nos casos em que a biomassa verde poderia estar associada ao recobrimento herbáceo por gramíneas e leguminosas, à redução de solo exposto ou à cobertura vegetal ainda não consolidada em estrutura arbórea.

Após essa triagem inicial, o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) foi utilizado como índice principal para avaliar a evolução anual da cobertura verde, a heterogeneidade interna das unidades e a comparação com o ecossistema de referência. Essa escolha permitiu acompanhar a trajetória temporal das áreas restauradas e calcular o Δ NDVI, utilizado como métrica de distância espectral em relação à referência. Nos casos em que os resultados indicaram comportamento discrepante, elevada variabilidade interna, valores atípicos, superação inesperada da referência ou possibilidade de influência por pixels mistos, a interpretação foi complementada por imagens de VANTs e observações de campo.

Dessa forma, o procedimento adotado combinou cinco etapas principais: i) aquisição e seleção de imagens Sentinel-2; ii) aplicação do EVI como triagem inicial da biomassa verde e da possível influência herbácea; iii) avaliação da evolução temporal da cobertura vegetal por NDVI; iv) análise da convergência espectral em relação ao ecossistema de referência por meio do Δ NDVI; e v) validação complementar por VANTs e campo em situações de resposta estatística anômala ou de interpretação espectral incerta.

3.1. Dinâmica estrutural observada por VANTs

A análise visual por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) foi utilizada como apoio multiescala à interpretação dos índices orbitais, permitindo observar, em maior detalhe espacial, a composição da cobertura vegetal nas áreas restauradas. Essa etapa foi especialmente relevante para diferenciar solo exposto, cobertura herbácea, dossel arbóreo-arbustivo e sombra, componentes que podem influenciar a resposta espectral registrada pelos pixels Sentinel-2.

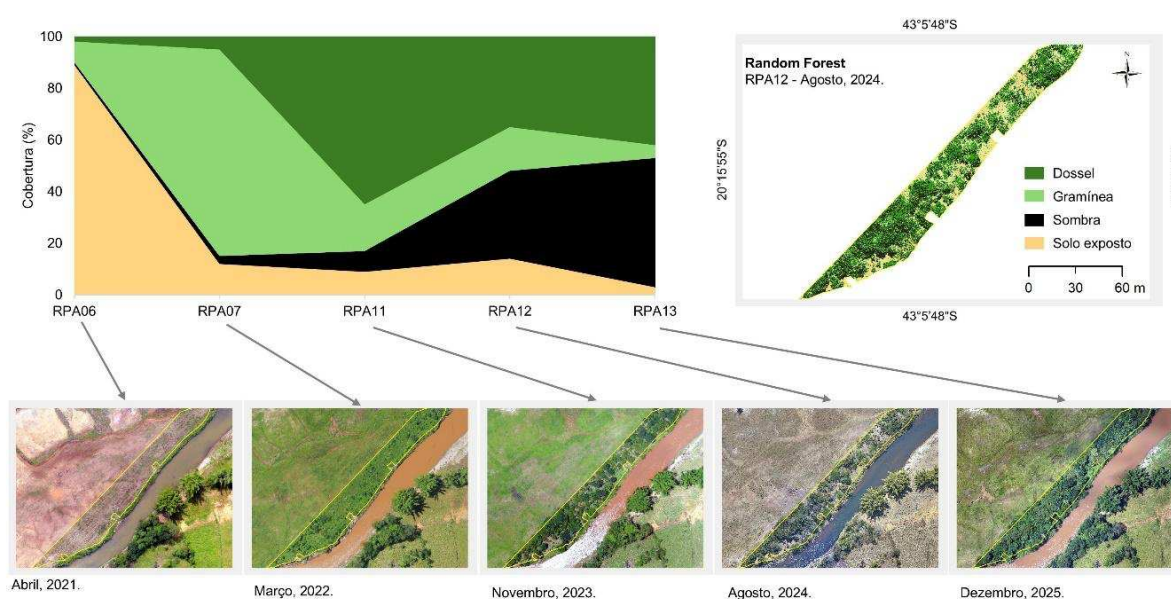


Figura 4 – Monitoramento da UT02 com VANTs e classificação da cobertura do solo. A sequência evidencia redução de solo exposto, expansão de cobertura herbácea, incremento de dossel e aumento de sombra ao longo do processo restaurativo.

As imagens obtidas por VANTs da UT02 evidenciaram transformação progressiva da cobertura do solo entre 2021 e 2025. No início da série, a área apresentava predominância de solo exposto, compatível com o estágio inicial de implantação em substrato tecnogênico associado à deposição de rejeitos. A partir de 2022, observou-se expansão da cobertura herbácea, seguida por incremento do dossel arbóreo-arbustivo e aumento da classe sombra nos anos mais recentes. Esse padrão é coerente com a sequência esperada em restauração ativa sobre substratos expostos: estabilização inicial por cobertura herbácea, redução da erosão superficial e posterior consolidação gradual do componente lenhoso.

A evidência obtida por VANTs foi coerente com a trajetória dos índices Sentinel-2, sobretudo pelo aumento do NDVI após 2023 na UT02. Estudos demonstram que imagens de VANTs podem discriminar componentes de cobertura importantes em áreas de restauração,

incluindo gramíneas invasoras e manchas de vegetação em alta resolução (REZENDE DE ATAÍDE et al., 2024). No presente estudo, essa evidência foi utilizada para interpretar a origem ecológica do sinal espectral: parte do aumento do NDVI decorre da redução do solo exposto e parte pode estar associada à cobertura herbácea inicial, reforçando a necessidade de cautela antes de atribuir todo incremento espectral ao avanço do dossel arbóreo.

3.2. *Triagem espectral inicial com EVI e coerência entre índices de vegetação*

A primeira etapa da análise espectral consistiu na aplicação do Enhanced Vegetation Index (EVI) como índice complementar de triagem. Essa etapa teve como objetivo avaliar se a resposta espectral inicial das unidades restauradas poderia estar associada à biomassa herbácea de recobrimento, à redução de solo exposto ou à transição entre cobertura herbácea e arbóreo-arbustiva. Essa distinção é relevante porque, em áreas recém-implantadas, o aumento da cobertura verde detectado por sensoriamento remoto pode refletir gramíneas e leguminosas utilizadas na estabilização inicial do solo, e não necessariamente o avanço proporcional do dossel arbóreo.

Após essa triagem, a coerência entre os índices foi avaliada por meio das correlações entre NDVI, SAVI, MSAVI, EVI e EVI2. A Tabela 4 apresenta a correlação entre os índices espectrais, permitindo verificar se a trajetória observada pelo NDVI foi coerente com os demais indicadores. A Tabela 5 complementa essa leitura ao apresentar os valores médios dos índices em 2026, possibilitando comparar a resposta espectral final da série entre a referência, a UT01, a UT02 e a UT03.

Tabela 4 – Correlação de Pearson entre as médias anuais dos índices de vegetação calculados para o ecossistema de referência e as unidades avaliadas entre 2016 e 2026.

Índice	NDVI	SAVI	MSAVI	EVI	EVI2
NDVI	1.000	0.925	0.910	0.865	0.912
SAVI	0.925	1.000	0.997	0.979	0.999
MSAVI	0.910	0.997	1.000	0.981	1.000
EVI	0.865	0.979	0.981	1.000	0.982
EVI2	0.912	0.999	1.000	0.982	1.000

Tabela 5 – Médias anuais dos índices em 2026, utilizadas como síntese macro da resposta espectral final da série.

Índice	Referência	UT01	UT02	UT03
NDVI	0.772	0.768	0.689	0.806
SAVI	0.488	0.512	0.468	0.558
MSAVI	0.485	0.516	0.462	0.577
EVI	0.580	0.609	0.560	0.653
EVI2	0.495	0.525	0.475	0.582

A comparação entre os índices mostrou elevada coerência interna da resposta espectral. O NDVI apresentou correlação positiva com SAVI ($r = 0,925$), MSAVI ($r = 0,910$), EVI ($r = 0,865$) e EVI2 ($r = 0,912$), enquanto SAVI, MSAVI, EVI e EVI2 apresentaram correlações ainda mais elevadas entre si. Esse resultado indica que, para a escala anual e para as áreas avaliadas, os índices descreveram a mesma trajetória geral de aumento da cobertura verde, embora com magnitudes diferentes.

Os valores de EVI em 2026 indicaram diferenças relevantes entre as unidades. A referência apresentou EVI médio de 0,580, enquanto a UT01 alcançou 0,609, a UT02 atingiu 0,560 e a UT03 apresentou 0,653. A UT01 mostrou valor próximo ou ligeiramente superior à referência, coerente com sua maior idade de implantação e maior consolidação da cobertura vegetal. A UT02 permaneceu abaixo da referência, indicando que, embora tenha apresentado avanço da cobertura verde, ainda mantém resposta espectral compatível com uma área em recuperação ativa. Já a UT03 apresentou EVI superior ao da referência, resultado que deve ser interpretado com cautela devido à largura reduzida da APP, à possibilidade de pixels mistos e à influência de cobertura herbácea, especialmente associada ao Tifton e a alvos adjacentes.

Essa leitura inicial pelo EVI contribuiu para qualificar a interpretação do NDVI. Em áreas mais jovens ou com forte cobertura herbácea de recobrimento, valores elevados de índices de vegetação podem refletir biomassa verde inicial, redução de solo exposto ou vigor herbáceo, e não necessariamente fechamento do dossel arbóreo. Assim, o EVI funcionou como etapa de triagem, indicando onde a resposta espectral deveria ser interpretada com maior cautela antes da análise principal baseada no NDVI.

Em termos práticos, a elevada coerência entre índices justifica apresentar o NDVI como eixo gráfico principal e os demais índices como evidência complementar. Essa opção evita repetição desnecessária de figuras e concentra a discussão na interpretação ecológica e operacional da trajetória. A abordagem é compatível com estudos que utilizam séries temporais de índices para avaliar greening e browning em florestas tropicais, nos quais diferentes índices podem manter a direção geral da tendência, mas diferir na sensibilidade à saturação,

fragmentação e intensidade das mudanças (DIAS et al., 2022). Assim, os valores de SAVI, MSAVI, EVI e EVI2 reforçam a robustez do padrão observado pelo NDVI, mas não alteram a principal conclusão: as áreas restauradas apresentaram incremento progressivo de cobertura verde e redução do déficit espectral em relação à referência.

3.3. Evolução anual do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Após a triagem inicial com o EVI e a verificação da coerência entre os índices espectrais, o NDVI foi utilizado como eixo principal da análise temporal. Essa etapa teve como finalidade avaliar a evolução anual da cobertura verde nas unidades restauradas, considerando a média anual, a amplitude P10–P90 e a comparação com o ecossistema de referência. Assim, enquanto o EVI auxiliou na interpretação das respostas iniciais potencialmente influenciadas por biomassa herbácea, o NDVI permitiu acompanhar a consolidação da cobertura vegetal ao longo da série temporal.

A Figura 5 apresenta a média anual de NDVI e o intervalo P10–P90, permitindo observar simultaneamente a tendência central e a heterogeneidade interna de cada unidade. Essa leitura é importante porque a média indica a resposta espectral geral, enquanto a amplitude entre percentis permite identificar variações internas que podem estar associadas a bordas, pixels mistos, solo exposto, cobertura herbácea ou diferenças locais de desenvolvimento da vegetação.

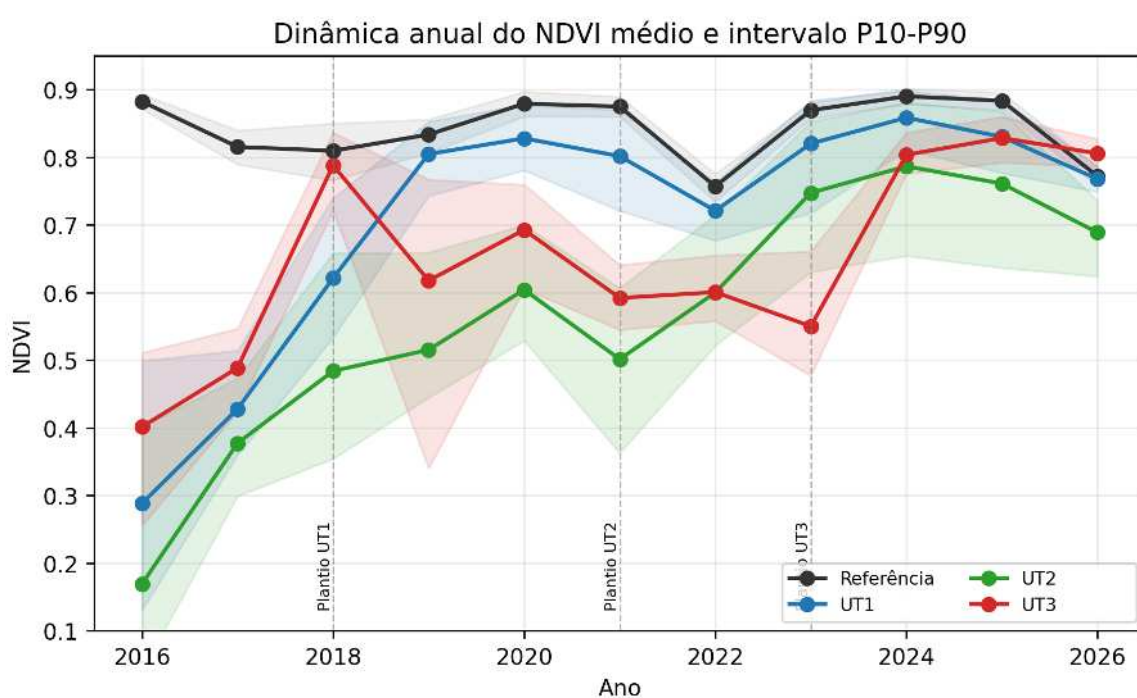


Figura 5 – Dinâmica anual do NDVI médio e intervalo P10–P90 nas unidades avaliadas e no ecossistema de referência, com marcação aproximada do ano de implantação de cada unidade.

A área de referência apresentou comportamento espectral relativamente estável ao longo da série, com médias anuais elevadas e baixa variabilidade espacial, especialmente nos anos finais. Essa estabilidade é fundamental para interpretar a referência como controle positivo de cobertura verde, embora não implique equivalência florística ou funcional entre o fragmento e as áreas em restauração. A literatura aponta que fragmentos tropicais podem apresentar tendências de greening ou browning influenciadas por tamanho, borda, saturação dos índices e histórico de uso, o que reforça a importância de utilizar a referência como parâmetro espectral, e não como prova isolada de restauração ecológica plena (DIAS et al., 2022).

A UT01 apresentou aumento expressivo após a implantação, passando de NDVI médio de 0,621 em 2018 para valores superiores a 0,80 entre 2019 e 2025, e 0,768 em 2026. Embora a regressão pós-implantação não tenha apresentado significância estatística ao nível de 5%, a aproximação progressiva da referência e a sobreposição parcial dos intervalos P10–P90 indicam consolidação da cobertura verde. Esse comportamento é compatível com estudos de trajetórias sucessionais em florestas tropicais, nos quais séries temporais de NDVI captam mudanças de estrutura e vigor associadas ao avanço da sucessão, ainda que a resposta possa ser não linear e influenciada por variações climáticas anuais (BERVEGLIERI et al., 2021; VALTONEN et al., 2021).

Na interpretação da UT01, deve-se considerar que os valores iniciais de NDVI podem ter sido influenciados pelo recobrimento inicial com gramíneas e leguminosas, empregado para estabilização do solo e redução de processos erosivos após a implantação. Além disso, o período de restrições operacionais associado à pandemia de COVID-19 pode ter afetado a continuidade de algumas ações de manutenção e acompanhamento em campo, condição que deve ser considerada como possível fator de variação operacional na leitura da trajetória inicial. Ainda assim, a manutenção de valores elevados ao longo da série, associada à aproximação da referência em 2026, sugere que o incremento espectral não se restringiu apenas à cobertura herbácea inicial, mas acompanhou o avanço da cobertura vegetal ao longo do processo restaurativo.

A UT02 passou de NDVI médio de 0,501 em 2021 para 0,689 em 2026, com aceleração aparente após 2023. Essa trajetória é coerente com as imagens de VANTs, que evidenciam redução de solo exposto e incremento de cobertura arbóreo-arbustiva. A evolução mais lenta em relação à UT01 pode ser explicada pelo histórico de pastagem, implantação mais recente, tecnossolo compactado, processos erosivos marginais e instabilidade de taludes. A resposta da UT02 reforça que o NDVI é sensível à recuperação da cobertura verde, mas o ritmo de aumento

depende do contexto geomorfológico, do histórico de uso e da persistência de fatores de degradação.

A UT03 aumentou de 0,550 em 2023 para 0,806 em 2026. A resposta rápida pode indicar avanço da cobertura verde, mas sua interpretação exige cautela porque a APP possui apenas 15 m de largura. Nessa condição, pixels Sentinel-2 de 10 m podem integrar vegetação restaurada, pastagem adjacente, solo exposto, sombra, leito do curso d'água e cobertura herbácea externa à faixa de APP. Além disso, a presença de *Cynodon dactylon* cv. Tifton, dentro ou no entorno da área avaliada, pode elevar temporariamente os valores de NDVI sem representar, isoladamente, fechamento do dossel arbóreo. Essa limitação é coerente com a literatura, que alerta para saturação, mistura espectral e dependência do contexto em interpretações de índices de vegetação em ambientes tropicais heterogêneos (DIAS et al., 2022; ALMEIDA et al., 2025).

3.4. Convergência espectral em relação à referência

Com base na trajetória anual do NDVI, avaliou-se a convergência espectral das unidades restauradas em relação ao ecossistema de referência por meio do ΔNDVI . Essa etapa representa a transição da análise de evolução da cobertura para a análise de aproximação espectral, permitindo verificar se as unidades não apenas aumentaram seus valores de NDVI, mas também reduziram a distância em relação a uma condição local de vegetação mais estável. Quando os resultados indicaram comportamento discrepante, como superação pontual da referência, elevada dispersão interna ou possibilidade de influência por pixels mistos, a interpretação foi complementada por imagens de VANTs e evidências de campo.

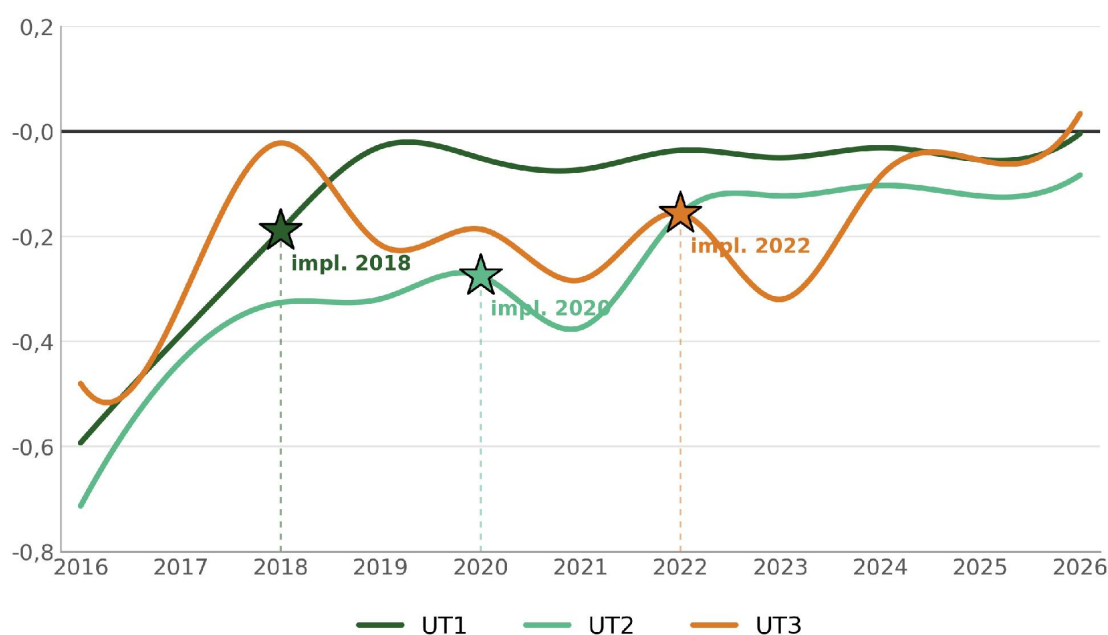


Figura 6 – Convergência espectral anual em relação ao ecossistema de referência, expressa por $\Delta\text{NDVI} = \text{NDVI}$ da unidade de trabalho – NDVI da referência. Valores próximos de zero indicam maior aproximação espectral.

Tabela 6 – Tendência temporal pós-implantação do NDVI e estimativa exploratória de convergência espectral média.

UT	Período	NDVI inicial	NDVI 2026	Inclinação NDVI/ano	p	Δ inicial	Δ 2026	Ano $\Delta=0$	Anos até $\Delta=0$
UT01	2018-2026	0.621	0.768	0.012	0.206	-0.188	-0.004	2026.7	8.7
UT02	2021-2026	0.501	0.689	0.042	0.116	-0.374	-0.083	2027.1	6.1
UT03	2023-2026	0.550	0.806	0.079	0.224	-0.319	0.034	2025.5	2.5

A análise de ΔNDVI reforça a trajetória de convergência das unidades restauradas. A UT01 reduziu o déficit de -0,188 em 2018 para -0,004 em 2026. Nesse ano, o teste de Tukey indicou ausência de diferença estatística entre UT01 e referência, sugerindo elevada aproximação espectral. A utilização de um indicador de diferença em relação à referência é metodologicamente útil porque permite avaliar não apenas o aumento absoluto da vegetação, mas também a redução do distanciamento espectral em relação a uma condição-alvo. Abordagens recentes de monitoramento de restauração também têm utilizado séries de NDVI observadas e de referência para quantificar impacto e anomalias após intervenções de restauração (KLEINSMANN et al., 2025).

A UT02 apresentou redução mais lenta do déficit, passando de -0,374 em 2021 para -0,083 em 2026. A projeção linear indicou convergência espectral média próxima de 2027, equivalente a aproximadamente 6,1 anos após a implantação. Esse resultado deve ser interpretado como estimativa exploratória, pois a regressão utiliza poucos anos pós-implantação e a área apresenta forte dinâmica hidrossedimentológica. Ainda assim, a tendência é consistente com a substituição progressiva de solo exposto por cobertura vegetal e com a literatura que demonstra aumento de índices de vegetação ao longo de gradientes de restauração tropical (VALTONEN et al., 2021).

A UT03 apresentou Δ NDVI positivo em 2026 (+0,034), com convergência estimada pela regressão entre 2025 e 2026. Apesar do resultado aparentemente favorável, a interpretação é limitada pela faixa ripária estreita e pela elevada possibilidade de pixels mistos. Portanto, a superação da média da referência em um ano específico não deve ser interpretada como restauração ecológica completa. O valor pode refletir vigor sazonal da cobertura herbácea, contribuição de áreas adjacentes, influência de Tifton no entorno da APP ou composição espectral diferente da vegetação de referência. Essa condição reforça a necessidade de avaliação complementar por VANTs ou por sensores de menor tamanho de pixel, especialmente em APPs estreitas, nas quais o pixel de 10 m do Sentinel-2 pode incorporar alvos externos à faixa restaurada.

Considerando as três unidades, o tempo médio estimado para atingir Δ NDVI próximo de zero foi de aproximadamente 5,8 anos após a implantação. Essa média representa apenas uma inferência operacional de convergência espectral da cobertura verde. Ela não substitui indicadores ecológicos de campo, mas fornece referência útil para planejamento, auditoria e priorização de áreas que permanecem com déficit espectral persistente. A principal contribuição desse resultado é transformar a série anual de NDVI em uma métrica simples de acompanhamento: áreas que não reduzem o déficit em relação à referência podem ser priorizadas para inspeção, manutenção, replantio ou controle de fatores de degradação.

3.5. Tempo de aproximação espectral a 80% e 90% da referência

Além da estimativa de convergência pelo Δ NDVI, foi avaliado o tempo aproximado para que cada unidade atingisse patamares equivalentes a 80% e 90% do valor médio de NDVI do ecossistema de referência. Essa análise foi utilizada como indicador operacional de acompanhamento, pois permite transformar a trajetória espectral em uma métrica simples de planejamento, sem estabelecer prazo fixo de restauração ecológica. Considerando o NDVI da

referência em 2026 (0,772), os limiares de 80% e 90% corresponderam, respectivamente, a valores aproximados de 0,618 e 0,695.

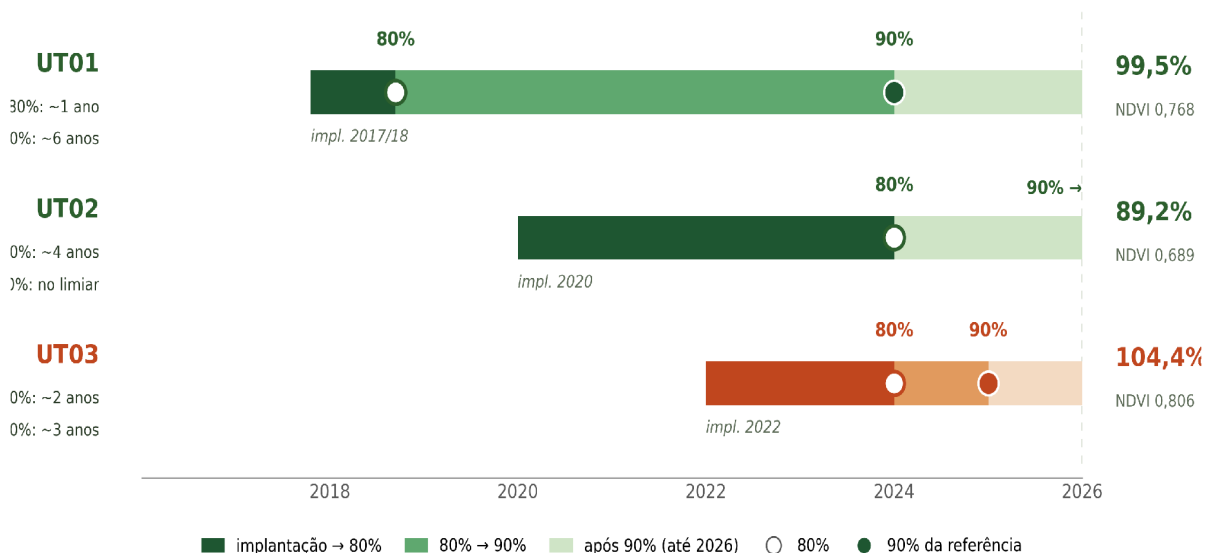


Figura 7 – Tempo de aproximação espectral das unidades avaliadas aos patamares de 80% e 90% do NDVI do ecossistema de referência. Os limiares correspondem, respectivamente, a NDVI de aproximadamente 0,618 e 0,695, calculados com base no valor médio da referência em 2026.

A UT01 atingiu o patamar de 80% da referência aproximadamente no primeiro ano após a implantação e alcançou o patamar de 90% em cerca de seis anos. Esse comportamento indica trajetória de consolidação da cobertura vegetal, compatível com sua maior idade de implantação e com a presença de matriz com maior cobertura florestal no entorno. Entretanto, a interpretação dos anos iniciais deve considerar a influência do recobrimento com gramíneas e leguminosas, que pode ter contribuído para elevação inicial do NDVI antes da plena consolidação do componente arbóreo.

A UT02 atingiu o patamar de 80% da referência em aproximadamente quatro anos após a implantação e permaneceu próxima ao limiar de 90% em 2026, quando alcançou cerca de 89,2% do valor da referência. Esse resultado indica recuperação ativa, porém ainda incompleta em termos de aproximação espectral. A permanência ligeiramente abaixo do limiar de 90% é coerente com o contexto da unidade, marcado por implantação mais recente, planície de inundação, uso pretérito por pastagem, tecnossolo compactado e dinâmica erosiva marginal.

A UT03 atingiu o patamar de 80% em aproximadamente dois anos e o de 90% em cerca de três anos após a implantação, superando o valor médio da referência em 2026. Embora esse

resultado indique resposta espectral rápida, ele deve ser interpretado com cautela. A APP de 15 m de largura está sujeita à influência de pixels mistos, uma vez que o pixel de 10 m do Sentinel-2 pode incorporar vegetação restaurada, cobertura herbácea, áreas adjacentes, sombra, solo exposto ou leito do curso d'água. Assim, a superação do patamar de referência pode refletir vigor da cobertura herbácea ou contribuição espectral externa à APP, reforçando a necessidade de validação por VANTs e inspeção de campo.

De forma geral, a análise dos limiares de 80% e 90% da referência complementa a leitura do ΔNDVI ao oferecer um indicador prático para acompanhamento operacional. Enquanto o ΔNDVI expressa a distância espectral anual em relação ao fragmento de referência, os limiares percentuais ajudam a comunicar o estágio relativo de aproximação das unidades restauradas. Esses valores, contudo, devem ser tratados como parâmetros auxiliares de manejo, e não como critérios isolados de sucesso da restauração.

3.6. Distribuição recente dos valores de NDVI e implicações para o monitoramento

Após a análise das médias anuais e da convergência espectral, a distribuição recente dos valores de NDVI foi avaliada para verificar a heterogeneidade interna das unidades no ciclo final da série. Essa abordagem é relevante porque unidades com médias semelhantes podem apresentar distribuições distintas, indicando diferenças na homogeneidade da cobertura vegetal, presença de setores com menor desenvolvimento ou influência de pixels mistos.

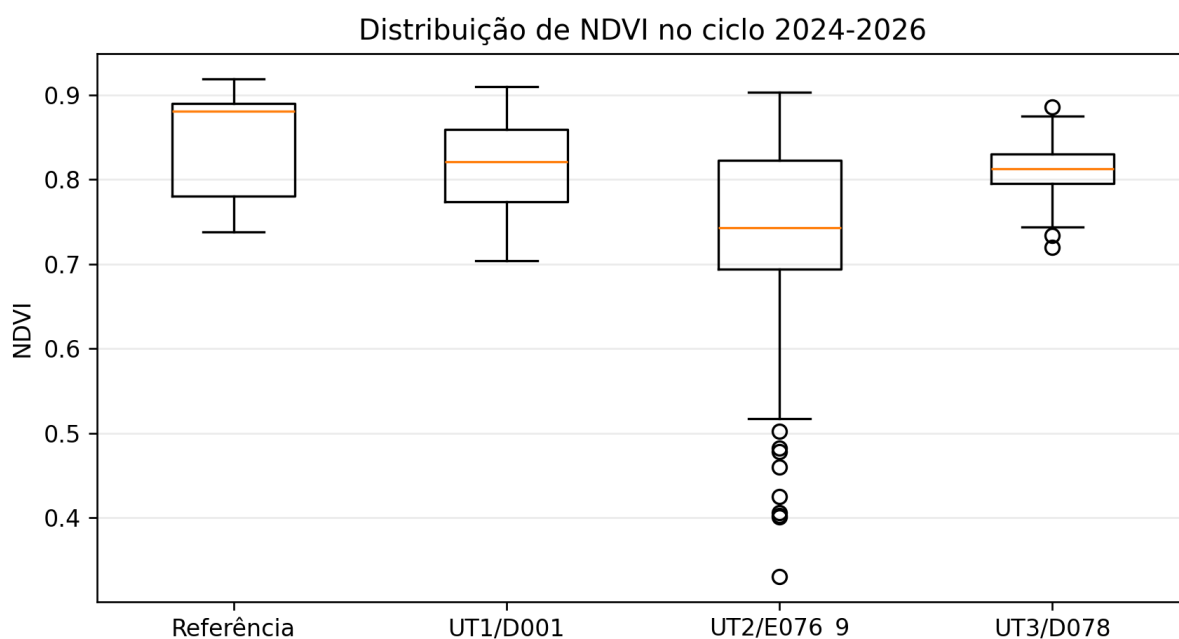


Figura 8 – Distribuição dos valores de NDVI no ciclo 2024–2026 para as unidades avaliadas e o ecossistema de referência, evidenciando diferenças de variabilidade e presença de valores atípicos.

No ciclo 2024–2026, a referência e a UT01 apresentaram distribuições de NDVI mais próximas, com menor dispersão relativa. A UT02 manteve maior amplitude e maior ocorrência de valores baixos, refletindo mosaico interno de cobertura e persistência de trechos menos consolidados. A UT03 apresentou distribuição elevada em 2026, mas com interpretação condicionada pela estreiteza da APP, pela influência de cobertura herbácea e por alvos adjacentes. A leitura conjunta da média, dos percentis e da inspeção por VANTs foi essencial para evitar uma avaliação baseada apenas no valor médio anual.

Os resultados confirmam o potencial das imagens anuais Sentinel-2 como ferramenta de monitoramento de baixo custo, padronizável e reprodutível em programas de restauração pós-desastre. Esse enquadramento dialoga com estudos recentes que têm aplicado sensoriamento remoto, modelagem espacial e aprendizado de máquina ao monitoramento de reabilitação florestal, restauração em propriedades rurais e mapeamento de vegetação em recuperação (BUTHELEZI et al., 2024; KLEINSMANN et al., 2025). No contexto do rio Doce, a abordagem proposta complementa o diagnóstico inicial de perda florestal realizado após o rompimento de Fundão (OMACHI et al., 2018), avançando para a avaliação da trajetória de recuperação.

A abordagem proposta não substitui o monitoramento ecológico de campo. Indicadores como sobrevivência, densidade de regenerantes, riqueza, diversidade, composição florística e estratificação vertical permanecem indispensáveis para avaliar a restauração em sentido ecológico. O NDVI e os índices correlatos são mais adequados para acompanhar cobertura verde, vigor vegetativo e anomalias temporais. Assim, o ganho técnico do método está em reduzir custos de triagem, aumentar a transparência do acompanhamento e direcionar inspeções de campo para áreas com menor convergência espectral, maior heterogeneidade interna ou resposta estatística anômala, em consonância com a literatura recente sobre monitoramento remoto da restauração tropical (ALMEIDA et al., 2025; WANG et al., 2024).

4. CONCLUSÕES

As bases corrigidas e padronizadas confirmaram trajetória espectral positiva nas três Unidades de Trabalho avaliadas, com aumento do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) no período pós-implantação e redução do déficit espectral em relação ao ecossistema de referência. A UT01 apresentou maior aproximação espectral, atingindo valores semelhantes

aos da referência em 2026. A UT02 demonstrou recuperação gradual, condicionada por maior instabilidade hidrossedimentológica, histórico de pastagem, tecnossolo compactado e persistência de setores menos consolidados. A UT03 apresentou resposta rápida, porém com interpretação limitada pela menor largura da APP, pela influência potencial de pixels mistos e pela presença de cobertura herbácea, especialmente associada ao *Cynodon dactylon* cv. Tifton e a áreas adjacentes.

O estudo estruturou uma metodologia de triagem e acompanhamento da evolução de áreas em restauração florestal, baseada na integração entre imagens Sentinel-2, índices espectrais, análise estatística, imagens obtidas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) e validação de campo. Nesse fluxo, o Enhanced Vegetation Index (EVI) mostrou-se útil como índice complementar nas etapas iniciais da restauração, especialmente para qualificar respostas associadas à revegetação inicial, ao recobrimento herbáceo, à presença de gramíneas e leguminosas, à redução de solo exposto e à estabilização inicial do substrato. Após essa triagem, o NDVI mostrou-se mais adequado como métrica principal para acompanhar a evolução temporal da cobertura vegetal, avaliar a heterogeneidade interna das unidades e mensurar a aproximação espectral em relação ao ambiente de referência.

Os índices complementares Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI), EVI e Two-band Enhanced Vegetation Index (EVI2) apresentaram elevada correlação com o NDVI, reforçando a coerência da resposta espectral observada. Essa correlação justificou a adoção do NDVI como eixo principal dos gráficos, testes de tendência e análise de convergência, enquanto os demais índices atuaram como suporte interpretativo. Assim, os índices não foram tratados como excludentes, mas como componentes de um fluxo metodológico ajustado à transição entre revegetação inicial, consolidação da cobertura arbóreo-arbustiva e aproximação progressiva da referência.

A comparação com o ecossistema de referência, expressa pelo Δ NDVI, demonstrou potencial para transformar séries anuais de sensoriamento remoto em indicadores operacionais de acompanhamento. A redução do déficit espectral permitiu diferenciar unidades com maior convergência, como a UT01, daquelas ainda em recuperação ativa, como a UT02, e daquelas com resposta rápida, porém sujeita a maior incerteza interpretativa, como a UT03. Os limiares de 80% e 90% do valor médio da referência também se mostraram úteis como parâmetros auxiliares de planejamento, comunicação técnica e priorização de manejo, desde que interpretados como indicadores espectrais, e não como critérios isolados de sucesso ecológico.

A heterogeneidade espacial observada entre e dentro das unidades deve ser interpretada como característica esperada em áreas ripárias em restauração, especialmente em ambientes

sobre rejeitos, APPs estreitas e contextos com diferentes pressões externas. Portanto, variações internas de NDVI, valores atípicos ou respostas espectrais diferenciadas não indicam, isoladamente, falha da restauração. Em situações de resposta estatística anômala, elevada variabilidade interna, superação inesperada da referência ou possibilidade de influência por pixels mistos, a interpretação deve ser complementada por imagens de maior resolução, VANTs, inspeções de campo e indicadores ecológicos de sobrevivência, regeneração natural, riqueza, diversidade, composição florística e estrutura da vegetação.

Assim, o principal impacto desta pesquisa está em propor uma metodologia aplicável à triagem, priorização e acompanhamento temporal de grandes áreas em restauração florestal, transformando dados espectrais em informações úteis para a tomada de decisão baseada em dados. A abordagem permite identificar áreas com boa trajetória de recuperação, áreas com déficit espectral persistente e áreas com respostas anômalas que demandam validação complementar, contribuindo para o melhor direcionamento operacional das equipes de campo, a priorização de manutenções, replantios e ações corretivas, e o uso mais eficiente dos recursos disponíveis para ampliar a cobertura vegetal e aumentar a efetividade dos programas de restauração florestal em áreas impactadas por rejeitos de mineração.

5. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. R. A. de; BROADBENT, E. N.; ZAMBRANO, A. M. A.; WILKINSON, B. E.; FERREIRA, M. E.; CHAZDON, R. L. Remote sensing approaches to monitor tropical forest restoration: current methods and future possibilities. *Journal of Applied Ecology*, [S. l.], v. 62, 2025. DOI: 10.1111/1365-2664.14830.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, [S. l.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- BUTHELEZI, M. N. M.; LOTTERING, R. T.; PEERBHAY, K. Y.; MUTANGA, O. A machine learning approach to mapping suitable areas for forest vegetation in the eThekweni municipality. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, [S. l.], v. 35, art. 101208, 2024. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101208.
- CAMPANHARO, I. F.; MARTINS, S. V.; VILLA, P. M.; KRUSCHEWSKY, G. C.; DIAS, A. A.; NABETA, F. H. Forest restoration methods, seasonality, and penetration resistance does not influence aboveground biomass stock on mining tailings in Mariana, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, [S. l.], v. 93, p. e20201209, 2021. DOI: 10.1590/0001-3765202120201209.
- DRUSCH, M.; DEL BELLO, U.; CARLIER, S.; COLIN, O.; FERNANDEZ, V.; GASCON, F. et al. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services.

- Remote Sensing of Environment, [S. l.], v. 120, p. 25-36, 2012. DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.026.
- GASCON, F.; BOUZINAC, C.; THÉPAUT, O.; JUNG, M.; FRANCESCONI, B.; LOUIS, J. et al. Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status. Remote Sensing, [S. l.], v. 9, n. 6, p. 584, 2017. DOI: 10.3390/rs9060584.
- GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, [S. l.], v. 202, p. 18-27, 2017. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
- HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, [S. l.], v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
- IBGE. Manual técnico da vegetação brasileira. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012. (Manuais Técnicos em Geociências, 1).
- IUSS WORKING GROUP WRB. World Reference Base for Soil Resources 2022: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. Vienna: International Union of Soil Sciences, 2022.
- JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. Remote Sensing of Environment, [S. l.], v. 112, n. 10, p. 3833-3845, 2008. DOI: 10.1016/j.rse.2008.06.006.
- LOUIS, J.; DEBAECKER, V.; PFLUG, B.; MAIN-KNORN, M.; BIENIARZ, J.; MUELLER-WILM, U.; GASCON, F. Sentinel-2 Sen2Cor: L2A product generation and performance. In: LIVING PLANET SYMPOSIUM, 2016, Praga. **Proceedings** [...]. Praga: ESA, 2016. p. 9-13.
- MARTINS, S. V. Recuperação de áreas degradadas: conceitos e aplicações. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2012.
- MARTINS, S. V.; PILOCELLI, A.; KRUSCHEWSKY, G. C.; DIAS, A. A.; NABETA, F. H.; VILLA, P. M. Seed bank and aboveground vegetation of Atlantic Forest re-growing on mining tailings in Mariana: highlighting diversity patterns of functional groups. Ecological Research, [S. l.], v. 39, n. 3, p. 289-303, 2024. DOI: 10.1111/1440-1703.12453.
- OMACHI, C. Y.; SIANI, S. M. O.; CHAGAS, F.; MASCAGNI, M.; CORDEIRO, M.; GARCIA, G.; THOMPSON, C. C.; SIEGLE, E.; THOMPSON, F. L. Atlantic Forest loss caused by the world's largest tailing dam collapse: Fundão Dam, Mariana, Brazil. Remote Sensing Applications: Society and Environment, [S. l.], v. 12, p. 30-34, 2018. DOI: 10.1016/j.rsase.2018.08.003.
- QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A. R.; KERR, Y. H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, [S. l.], v. 48, n. 2, p. 119-126, 1994. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90134-1.
- REIS, B. P.; MARTINS, S. V.; FERNANDES FILHO, E. I.; SARCINELLI, T. S.; GLERIANI, J. M.; MARCATTI, G. E.; LEITE, H. G.; HALASSY, M. Forest restoration monitoring through digital processing of high resolution images. Ecological Engineering, [S. l.], v. 127, p. 178-186, 2019. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.11.022.

RODRIGUES, R. R.; LIMA, R. A. F.; GANDOLFI, S.; NAVE, A. G. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. *Biological Conservation*, [S. l.], v. 142, n. 6, p. 1242-1251, 2009. DOI: 10.1016/j.biocon.2008.12.008.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. Greenbelt: NASA/GSFC, 1974. (Type III Final Report).

SER. International principles and standards for the practice of ecological restoration. 2. ed. Washington, DC: Society for Ecological Restoration, 2019.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.

VILLA, P. M.; MARTINS, S. V.; PILOCELLI, A.; KRUSCHEWSKY, G. C.; DIAS, A. A.; NABETA, F. H. Attributes of stand-age-dependent forest determine technosol fertility of Atlantic Forest re-growing on mining tailings in Mariana, Brazil. **Journal of Forestry Research**, [S. l.], v. 33, p. 103-116, 2022. DOI: 10.1007/s11676-021-01359-z.

WANG, R.; SUN, Y.; ZONG, J.; WANG, Y.; CAO, X.; WANG, Y.; CHENG, X.; ZHANG, W. Remote sensing application in ecological restoration monitoring: a systematic review. *Remote Sensing*, [S. l.], v. 16, n. 12, p. 2204, 2024. DOI: 10.3390/rs16122204.

WORTLEY, L.; HERO, J. M.; HOWES, M. Evaluating ecological restoration success: a review of the literature. *Restoration Ecology*, [S. l.], v. 21, n. 5, p. 537-543, 2013. DOI: 10.1111/rec.12028.

XUE, J.; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. *Journal of Sensors*, [S. l.], v. 2017, p. 1353691, 2017. DOI: 10.1155/2017/1353691.

CAPÍTULO II

Aplicabilidade do NDVI na identificação de anomalias intraunidade em áreas em restauração florestal impactadas por rejeito de mineração, Barra Longa, MG

RESUMO

O estudo avaliou a aplicabilidade do NDVI na identificação de anomalias intraunidade em áreas de restauração florestal impactadas pelo rejeito da barragem de Fundão, em Barra Longa, MG, tomando como referência a comparação entre a evolução da cobertura de copa no setor anômalo da UT02 e nos demais pixels da unidade, com a UT03 como contraste comparativo. As áreas, anteriormente ocupadas predominantemente por pastagens, passaram por intervenções de bioengenharia, plantio de espécies pioneiras do grupo de recobrimento, replantios anuais e manutenções regulares. A UT02 apresentou aumento do NDVI médio entre 2018 e 2025, porém sem redução estatisticamente significativa da variabilidade interna, e a análise em nível de pixel identificou um setor persistentemente inferior localizado em trecho adjacente à estrada, cuja trajetória mais lenta pode estar relacionada a efeito de borda e/ou à entrada de animais de produção. Na UT03, não foi identificado núcleo anômalo persistente, e a comparação entre 2022 e 2025 indicou aumento da média do NDVI acompanhado de redução da variabilidade interna. Os resultados mostram que os pixels anômalos da UT02 constituíram parâmetro empírico para avaliar a efetividade do NDVI em discriminar trajetórias contrastantes de desenvolvimento da copa das árvores dentro da mesma unidade. Conclui-se que o NDVI, a partir de dados gratuitos e de disponibilidade anual do Sentinel-2, é ferramenta útil para o monitoramento operacional da restauração, podendo subsidiar protocolos de inspeção, validação e tomada de decisão voltados à correção de desvios e à padronização do fragmento florestal, com apoio complementar de drones ou sensores de maior resolução quando houver viabilidade do projeto.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; restauração florestal; efeito de borda; anomalia espectral; Sentinel-2; análise em nível de pixel.

1. INTRODUÇÃO

O rompimento da Barragem de Fundão, ocorrido em 5 de novembro de 2015, no município de Mariana, Minas Gerais, desencadeou impactos diretos sobre Áreas de Preservação Permanente (APPs) da bacia do rio Doce (SAMARCO, [s.d.]; FUNDAÇÃO RENOVA, 2021). Nas áreas analisadas neste estudo, localizadas em Barra Longa, MG, no contexto do rio Gualaxo do Norte, houve deposição de rejeitos sobre APPs anteriormente inseridas em propriedades de uso agropecuário. Tratava-se de áreas já antropizadas, nas quais a vegetação primária havia sido previamente suprimida e substituída, predominantemente, por pastagens. Assim, o rompimento agravou a condição ambiental dessas áreas ao recobrir superfícies já alteradas com rejeitos, intensificando a instabilidade física do terreno e demandando ações de contenção, estabilização e recomposição da cobertura vegetal.

Em resposta a esse cenário, foram adotadas intervenções iniciais de bioengenharia de solos, estabilização de taludes e revegetação primária com misturas de espécies herbáceas e leguminosas, seguidas por ações de restauração florestal e adequação ambiental das APPs conforme o Novo Código Florestal. Essas intervenções buscaram reduzir a exposição do rejeito, controlar processos erosivos, estabilizar o substrato e criar condições para o estabelecimento gradual da vegetação arbóreo-arbustiva. Entretanto, em ambientes ripários impactados por rejeitos de mineração, a evolução da cobertura vegetal pode ocorrer de forma heterogênea, especialmente sob influência de compactação, baixa estruturação do substrato, erosões marginais, instabilidade de taludes, entrada de animais, pisoteio, herbivoria, falhas de cercamento, proximidade de estradas, efeito de borda e competição com gramíneas.

Nesse contexto, o monitoramento assume papel decisivo, pois não deve se limitar à avaliação da evolução média da vegetação, mas subsidiar a tomada de decisão em programas de restauração de larga escala. Na literatura de restauração florestal, o monitoramento é entendido como etapa indispensável para verificar trajetórias, comparar resultados e orientar correções de manejo (VIANI et al., 2017; VIANI et al., 2018; MARTINS; RICARDO, 2025). Esse entendimento é compatível com a produção técnico-científica desenvolvida em áreas atingidas pelo rejeito de Mariana e com a crescente demanda por indicadores operacionais capazes de apoiar decisões rápidas, direcionar recursos e priorizar intervenções em campo (PILOCELLI, 2020; ALVES, 2022; WANG et al., 2024).

O Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) é um dos índices mais difundidos para o monitoramento da vegetação por sensoriamento remoto. Sua formulação combina as bandas do vermelho e do infravermelho próximo para rastrear variações na biomassa

fotossinteticamente ativa e no vigor da cobertura vegetal (TUCKER, 1979). Em séries multitemporais, especialmente com imagens Sentinel-2, o NDVI permite acompanhar áreas extensas de forma recorrente, padronizada e de baixo custo, sendo útil para avaliar ganho ou perda relativa de cobertura verde em áreas restauradas (LIU et al., 2019; HU et al., 2022; WANG et al., 2024).

Entretanto, a interpretação do NDVI exige cautela. Em áreas heterogêneas, a média anual de uma unidade pode indicar trajetória positiva e, ao mesmo tempo, mascarar setores internos com resposta espectral persistentemente inferior. Além disso, a resolução espacial do sensor pode introduzir efeitos de pixels mistos, sobretudo em APPs lineares, estreitas ou próximas a estradas, cursos d'água, pastagens e bordas de uso antrópico (ALBUQUERQUE et al., 2021; O'DONNELL et al., 2024). Assim, a simples leitura agregada da unidade pode ser insuficiente para detectar trechos afetados por falhas de plantio, solo exposto, erosões, entrada de animais, competição com gramíneas ou menor desenvolvimento da cobertura arbóreo-arbustiva.

Dessa forma, a análise intraunidade representa uma abordagem complementar ao monitoramento convencional por médias gerais. Ao avaliar a distribuição dos pixels e comparar setores internos de uma mesma unidade, torna-se possível identificar anomalias espectrais persistentes, localizar trechos com menor desempenho e diferenciar áreas que acompanham a trajetória geral da restauração daquelas que exigem validação complementar. Essa abordagem transforma o NDVI em uma ferramenta de triagem espacial, capaz de indicar onde o monitoramento de campo deve ser priorizado e quais setores podem demandar manutenção, replantio, controle de erosão, reforço de cercamento ou outras ações corretivas.

No caso da UT02, a evolução média do NDVI indicava recuperação positiva, mas a inspeção da série temporal e as observações de campo apontavam a permanência de um setor com resposta espectral inferior em trecho adjacente à estrada. A localização desse setor sugere a atuação de fatores como efeito de borda, entrada de animais de produção, pisoteio, exposição localizada do solo e possíveis processos erosivos, capazes de limitar o avanço da cobertura vegetal em comparação com o restante da unidade. Esses pixels com resposta espectral persistentemente inferior constituíram parâmetro empírico para avaliar a efetividade do NDVI na discriminação de diferenças internas de evolução da cobertura vegetal. A UT03, por apresentar comportamento visualmente mais homogêneo, foi utilizada como contraste comparativo.

Diante desse contexto, este capítulo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do NDVI na identificação de anomalias intraunidade em áreas de restauração florestal impactadas

por rejeitos de mineração, no município de Barra Longa, MG. Especificamente, buscou-se: i) comparar a trajetória temporal do NDVI entre unidades em restauração; ii) avaliar a variabilidade interna da cobertura vegetal por meio de métricas estatísticas aplicadas em nível de pixel; iii) identificar setores com desempenho espectral persistentemente inferior ao restante da unidade; iv) verificar se esses setores podem estar associados a pressões antrópicas ou ambientais, como borda, estrada, entrada de animais, exposição do solo ou processos erosivos; e v) discutir o potencial do NDVI, integrado a imagens de VANTs e inspeções de campo, como ferramenta de triagem, priorização e tomada de decisão operacional em programas de restauração florestal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo, contexto ambiental e unidades analisadas

O estudo foi conduzido em Áreas de Preservação Permanente (APPs) impactadas pelo rompimento da Barragem de Fundão, ocorrido em 5 de novembro de 2015, em Mariana, Minas Gerais, Brasil. As unidades analisadas localizam-se no município de Barra Longa, MG, no contexto do rio Gualaxo do Norte, inseridas na bacia hidrográfica do rio Doce, sob domínio da Mata Atlântica. A região apresenta clima do tipo Cwa, segundo Köppen-Geiger, caracterizado por inverno seco, verão chuvoso e concentração da precipitação entre outubro e março. Predominam Latossolos Vermelhos distróficos, relevo variável e fitofisionomia associada à Floresta Estacional Semidecidual. A sazonalidade climática foi considerada relevante para a interpretação das séries temporais, uma vez que influencia a atividade fotossintética, a resposta espectral da vegetação e a variação intra-anual dos índices de vegetação.

O trabalho foi estruturado com a UT02 como unidade principal de interpretação e a UT03 como unidade de contraste comparativo. Ambas correspondem a APPs associadas a cursos d'água impactados pela deposição de rejeitos. Antes do rompimento, tratava-se de áreas já antropizadas, inseridas em propriedades rurais de uso agropecuário e ocupadas predominantemente por pastagens, uma vez que a vegetação ciliar havia sido previamente suprimida. Assim, o desastre recobriu superfícies já alteradas com rejeitos, impondo novo cenário de instabilidade física, necessidade de contenção, estabilização do substrato e adequação ambiental para posterior restauração florestal.

A UT02 situa-se nas coordenadas 20°15'59.2"S e 43°05'48.0"W, a aproximadamente 410 m de altitude. Possui área total de 10.400 m² e corresponde a uma faixa marginal de 30 m. A área caracteriza-se como planície de inundação historicamente utilizada como pastagem e

desprovida de vegetação ciliar antes do rompimento. A implantação da restauração ocorreu no final de 2020, após intervenções mecânicas intensivas, incluindo subsolagem e escarificação, com o objetivo de promover a descompactação do tecnossolo formado pela deposição de rejeitos. Também foram utilizadas técnicas de bioengenharia para estabilização superficial do substrato. A presença de trecho adjacente à estrada foi considerada fator relevante para a interpretação dos pixels anômalos detectados na análise intraunidade.

A UT03 localiza-se nas coordenadas 20°17'12.4"S e 43°03'56.3"W, a aproximadamente 380 m de altitude. A unidade possui 6.150 m², relevo suavemente ondulado, declividade entre 2% e 5% e faixa marginal de 15 m. Antes do desastre, também era utilizada como pastagem e não possuía vegetação ciliar estabelecida. A implantação do plantio florestal ocorreu no final de 2022, após fases preliminares de estabilização e cobertura herbácea. A estratégia inicial incluiu o estabelecimento de cobertura vegetal para rápida proteção do solo, com destaque para *Cynodon dactylon* cv. Tifton, posteriormente manejada para favorecer o desenvolvimento das espécies arbóreas. A UT03 foi utilizada como contraste por apresentar comportamento visualmente mais homogêneo e ausência de núcleo anômalo persistente semelhante ao observado na UT02. A diferença de largura entre as APPs foi reconhecida como limitação comparativa, embora ambas apresentem contexto ambiental e histórico operacional suficientemente próximos para subsidiar o contraste analítico proposto.

2.2. Contexto operacional da restauração florestal

A restauração florestal das APPs impactadas pelo rompimento foi conduzida em contexto de elevada complexidade ambiental, logística e social. As áreas apresentavam superfícies recobertas por rejeitos de mineração, alterações na morfologia do terreno e diferentes níveis de degradação pré-existentes associados ao uso agropecuário anterior. Em função da magnitude do impacto e da necessidade de estabilização física do material depositado, as ações foram organizadas em etapas sucessivas.

Inicialmente, foram executadas intervenções voltadas à reconformação da calha dos cursos d'água, controle de erosão, drenagem, contenção de sedimentos e bioengenharia de solos. Em seguida, foram utilizadas misturas de leguminosas e espécies herbáceas para promover cobertura inicial, reduzir exposição do rejeito e aumentar a estabilidade superficial do substrato. Após essa fase de estabilização e revegetação inicial, teve início a restauração florestal propriamente dita, baseada predominantemente no plantio de espécies nativas.

A implantação ocorreu de forma escalonada, conforme as condições operacionais, climáticas e ambientais observadas em campo. Foram priorizadas inicialmente espécies do grupo de recobrimento, responsáveis pela rápida ocupação do espaço e formação de sombreamento inicial, posteriormente complementadas por espécies do grupo de diversidade, visando ao aumento gradual da complexidade estrutural e ecológica. As atividades de manutenção incluíram controle de formigas cortadeiras, coroamento, adubação de cobertura, replantio, manutenção de cercamentos e, quando necessário, irrigação de suporte em períodos de estiagem.

Nesse contexto, o monitoramento operacional foi essencial para identificar falhas de implantação, mortalidade de mudas, entrada de animais, limitações de acesso, processos erosivos e diferenças no desenvolvimento da vegetação entre setores. A análise temporal do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) foi utilizada como ferramenta complementar ao monitoramento de campo, permitindo avaliar a evolução da cobertura vegetal em escala ampliada e apoiar a priorização de vistorias, manutenções e ações corretivas.

2.3. Base de dados Sentinel-2 e delimitação analítica

As bases corrigidas disponibilizadas para este estudo incluíram séries anuais de índices de vegetação calculados para o ambiente de referência, UT02 e UT03. Em consonância com o objetivo desta análise, foram utilizadas exclusivamente as séries de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) da UT02 e da UT03, adotadas, respectivamente, como unidade principal e unidade comparativa. Essa delimitação decorre do foco na avaliação intraunidade, na identificação de pixels com desempenho espectral persistentemente inferior e na comparação entre uma área com setor crítico reconhecido em campo e outra com comportamento espacial mais homogêneo.

A base bruta da UT02 continha 100 pixels fixos, enquanto a base da UT03 continha 43 pixels fixos, ambas com registros anuais entre 2016 e 2026. A adoção de pixels fixos permitiu acompanhar a trajetória espectral dos mesmos pontos ao longo do tempo, reduzindo variações associadas à mudança de amostragem espacial entre anos. Dessa forma, cada pixel foi tratado como uma unidade observacional recorrente, possibilitando avaliar não apenas a média da área, mas também a dispersão dos valores, a persistência de respostas inferiores e a existência de setores com comportamento distinto do restante da unidade.

Para a comparação temporal principal, foram considerados os registros de 2018 a 2025, intervalo comum às duas unidades e adequado para avaliar a evolução espectral das áreas

restauradas. Na UT03, adicionalmente, a análise antes/depois considerou o período de 2022 a 2025, correspondente à fase posterior à implantação do plantio florestal. Esse recorte permitiu diferenciar a leitura exploratória da série temporal avaliada do período diretamente associado ao avanço da cobertura arbóreo-arbustiva nessa unidade.

Os dados empregados correspondem a séries anuais de NDVI previamente derivadas de imagens Sentinel-2, extraídas em períodos equivalentes do ano e submetidas a controle de nuvens, sombras e diferenças fenológico-sazonais em ambiente SIG. O NDVI foi obtido a partir das bandas do vermelho e do infravermelho próximo, correspondentes, no Sentinel-2, às bandas B4 e B8, ambas com resolução espacial de 10 m. Essa resolução é compatível com aplicações de monitoramento operacional em áreas restauradas, embora exija cautela em APPs estreitas, bordas, trechos próximos a cursos d'água, estradas e áreas de transição, onde pode ocorrer mistura espectral.

A utilização de imagens Sentinel-2 foi considerada adequada em razão da gratuidade dos dados, da ampla cobertura espacial, da recorrência temporal e da disponibilidade de bandas apropriadas ao cálculo do NDVI. Essas características tornam a série útil para programas de restauração em larga escala, nos quais o baixo custo, a repetibilidade e a padronização metodológica são fundamentais para acompanhar a evolução da cobertura vegetal, identificar setores críticos e orientar decisões operacionais.

A investigação foi conduzida como análise aplicada de uma base anual pré-processada, e não como reprocessamento integral das cenas orbitais originais. Embora os arquivos disponibilizados não tenham sido acompanhados pelo inventário completo das cenas, metadados orbitais e parâmetros detalhados de todo o fluxo de processamento, as informações fornecidas indicam que a série foi gerada com critérios consistentes de temporalidade, controle de nuvens, remoção de sombras e comparabilidade sazonal. Essa delimitação preserva a rastreabilidade metodológica, evita extrapolações sobre etapas não documentadas e concentra a análise na interpretação estatística e operacional da série de NDVI em nível de pixel.

Dessa forma, a base utilizada permitiu estruturar uma abordagem de triagem intraunidade baseada em dados espectrais anuais, possibilitando comparar a trajetória das unidades, avaliar a heterogeneidade interna, identificar pixels com valores sistematicamente inferiores e relacionar esses padrões a fatores observados em campo, como proximidade de estrada, efeito de borda, entrada de animais, exposição do solo, erosão localizada ou menor desenvolvimento da cobertura vegetal.

2.4. Índice analisado e métricas estatísticas

O Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) foi adotado como variável principal deste estudo por sua ampla aplicação no monitoramento da vegetação e por representar, de forma indireta, a presença, o vigor e a densidade relativa da biomassa fotossinteticamente ativa. O índice foi calculado pela expressão:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

em que NIR corresponde à reflectância no infravermelho próximo e Red à reflectância no vermelho. Para a missão Sentinel-2, o NDVI é obtido a partir das bandas B8 (NIR, 10 m) e B4 (Red, 10 m).

Em áreas em restauração florestal, valores mais elevados de NDVI tendem a indicar maior presença de biomassa verde, continuidade da cobertura vegetal e melhor condição estrutural do componente vegetado. Assim, o índice foi interpretado como indicador associado ao avanço do recobrimento vegetal, ao fechamento progressivo da cobertura de copas e à redução relativa de superfícies dominadas por solo exposto, rejeito ou vegetação rasteira descontínua.

Para cada unidade e ano, foram calculadas estatísticas descritivas do NDVI, incluindo média, desvio-padrão (DP), coeficiente de variação (CV) e ganho líquido por pixel. A média foi utilizada para representar a condição espectral geral da unidade, enquanto o DP e o CV foram empregados como medidas de heterogeneidade interna. O ganho líquido por pixel foi calculado como a diferença entre o NDVI final e o NDVI inicial do período analisado. Na UT02, esse ganho foi calculado entre 2018 e 2025. Na UT03, além da leitura exploratória da série 2018–2025, foi calculado o ganho entre 2022 e 2025, representando o período posterior à implantação do plantio florestal.

2.5. Análise pixel a pixel e identificação das anomalias intraunidade

A análise intraunidade foi conduzida a partir da base de dados pixel a pixel, com o objetivo de identificar setores cujo desempenho espectral fosse persistentemente inferior ao comportamento médio da própria unidade. Essa abordagem permitiu diferenciar a tendência geral de recuperação da UT02 de padrões localizados de menor desenvolvimento da cobertura vegetal.

Para reduzir a subjetividade na identificação de anomalias, calculou-se o escore-z anual de cada pixel em relação à distribuição dos valores de NDVI da própria unidade em cada ano. Em seguida, foi calculado o escore-z médio de cada pixel ao longo da série temporal de 2018 a

2025. Considerou-se como núcleo estatístico anômalo o conjunto de pixels com escore-z médio menor ou igual a -1,5, limiar adotado como regra padronizada de triagem por representar desvio negativo consistente em relação ao comportamento médio da unidade.

Na UT02, esse procedimento identificou os pixels 94, 96 e 100 como núcleo estatístico anômalo. O pixel 97 foi incorporado ao setor anômalo expandido em razão de sua contiguidade espacial com o trecho de menor desenvolvimento observado em campo, localizado próximo à estrada, e da manutenção de valores sistematicamente baixos ao longo da série. Dessa forma, o setor anômalo expandido da UT02 foi composto pelos pixels 94, 96, 97 e 100.

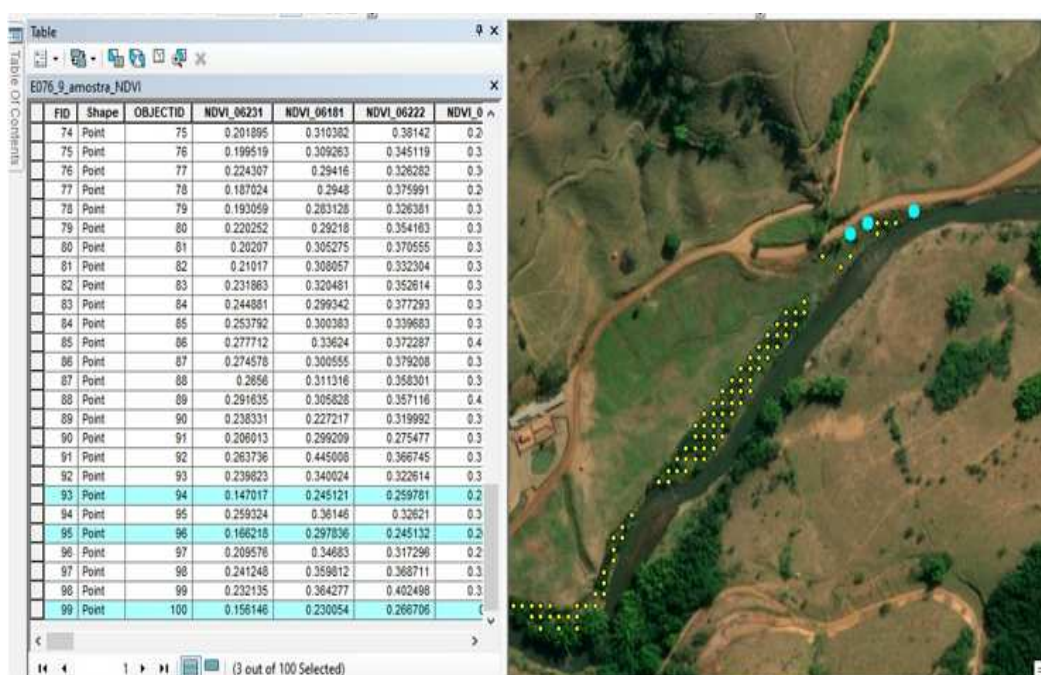


Figura 9 – Localização do setor anômalo expandido da UT02, composto pelos pixels 94, 96, 97 e 100, em trecho adjacente à estrada e associado a menor desempenho espectral ao longo da série temporal de NDVI.

Na UT03, o mesmo procedimento foi aplicado para fins comparativos. Além do escore-z médio, registrou-se, para cada pixel, o número de anos em que os valores permaneceram abaixo de -1,5 e -2,0 desvios-padrão, permitindo distinguir desvios negativos pontuais de padrões persistentes de baixo desempenho. Essa comparação permitiu avaliar se a UT03 apresentava comportamento interno semelhante ao núcleo anômalo da UT02 ou se sua distribuição espectral era mais homogênea.

2.6. Tendências temporais, validação complementar e interpretação operacional

Foram ajustadas regressões lineares simples entre ano e NDVI médio para quatro recortes analíticos: **i)** UT02 como um todo; **ii)** setor anômalo expandido da UT02; **iii)** demais pixels da UT02, excluído o setor anômalo; e **iv)** UT03 como um todo. Para cada ajuste, foram registrados o coeficiente angular da reta, o coeficiente de determinação (R^2) e o valor de p. Essa comparação permitiu distinguir a trajetória média global da unidade da trajetória específica do setor com resposta espectral persistentemente inferior.

Além das regressões, a interpretação considerou a trajetória média do NDVI, a variabilidade interna expressa pelo DP e pelo CV, o comportamento individual dos pixels ao longo da série e cartas I-AM antes/depois, utilizadas para avaliar mudanças de média e variabilidade. As cartas I-AM foram empregadas como análise complementar para verificar alterações no comportamento dos pixels entre os períodos avaliados, auxiliando na identificação de deslocamentos de média, maior dispersão ou persistência de valores inferiores.

As anomalias estatísticas identificadas pela análise pixel a pixel foram interpretadas como sinais de triagem, e não como diagnóstico definitivo da causa da limitação. Por isso, a avaliação foi complementada por observações de campo e imagens obtidas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), utilizadas para verificar a coerência espacial dos pixels anômalos e apoiar a interpretação de possíveis fatores associados, como proximidade de estrada, efeito de borda, entrada de animais, pisoteio, exposição localizada do solo, falhas de cobertura, erosão marginal ou menor desenvolvimento da vegetação.



Figura 10 – Voo de VANT utilizado como validação complementar dos pixels anômalos da UT02 e da condição geral das demais áreas avaliadas, permitindo verificar a distribuição espacial da cobertura vegetal, a presença de solo exposto, bordas, acessos, trechos de menor desenvolvimento e possíveis fatores de pressão local.

Todas as análises estatísticas foram realizadas em ambiente Python, com apoio das bibliotecas numpy, scipy e matplotlib. A interpretação final integrou os resultados estatísticos, a distribuição espacial dos pixels, a validação por VANTs e as evidências de campo, visando avaliar o potencial do NDVI como ferramenta de triagem intraunidade e apoio à tomada de decisão operacional em programas de restauração florestal.

3. RESULTADOS

Os resultados são apresentados de forma sequencial, partindo da trajetória média das unidades avaliadas e avançando para a análise intraunidade em nível de pixel. Essa organização permite demonstrar que a média anual do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) é útil para indicar a evolução geral da cobertura vegetal, mas pode ocultar setores internos com desempenho inferior. Assim, a análise pixel a pixel foi utilizada como ferramenta de triagem para identificar anomalias espectrais persistentes, comparar a UT02 com a UT03 e subsidiar a interpretação operacional por meio de campo e VANTs.

3.1. Trajetória média da UT02

A UT02 apresentou trajetória positiva de recuperação da cobertura vegetal ao longo da série avaliada. O NDVI médio da unidade passou de 0,484 em 2018 para 0,761 em 2025, correspondendo a um ganho absoluto de 0,277 e a um crescimento relativo de 57,2%. A regressão linear da média anual foi positiva e estatisticamente significativa, com inclinação de 0,046 NDVI por ano, $R^2 = 0,807$ e $p = 0,002$, evidenciando tendência consistente de aumento da cobertura verde.

Na comparação entre 2018 e 2025, 98 dos 100 pixels monitorados apresentaram ganho líquido positivo, com variação entre -0,019 e 0,463 e ganho médio de 0,277. Em escala agregada, esses resultados indicam avanço da restauração e aumento da biomassa verde na unidade.

A Figura 11 sintetiza visualmente essa trajetória agregada da UT02, destacando o aumento do NDVI médio entre 2018 e 2025, o ganho absoluto, o crescimento relativo e a inclinação positiva da regressão. Essa leitura permite confirmar a recuperação da unidade em escala geral, antes da avaliação da variabilidade interna.

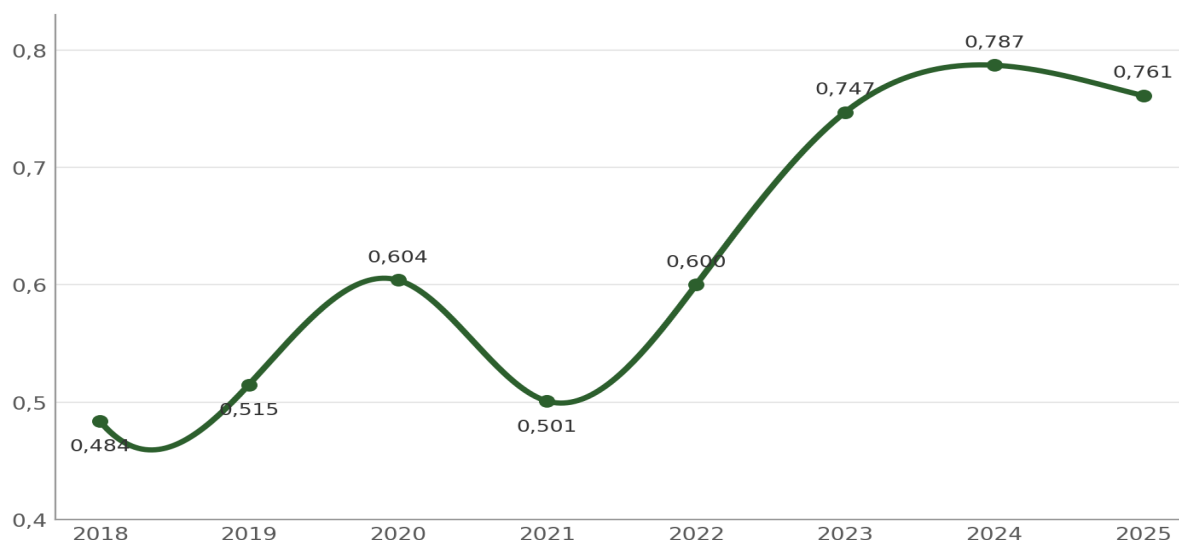


Figura 11 – Trajetória temporal do NDVI médio da UT02 entre 2018 e 2025, com indicação do ganho absoluto, crescimento relativo e inclinação da regressão. Fonte: elaboração do autor.

Apesar da recuperação significativa em escala agregada, a média anual não revelou toda a variabilidade interna da unidade. Parte dos pixels apresentou desempenho inferior ao padrão médio da UT02, indicando que a evolução positiva da área, em termos agregados, conviveu com setores localizados que não acompanharam a mesma velocidade de recuperação. Esse resultado demonstra que a média é adequada para representar a tendência geral, mas insuficiente para identificar trechos críticos que podem demandar manejo específico.

Dessa forma, a análise em nível de pixel foi necessária para revelar “o que a média esconde”: uma heterogeneidade interna operacionalmente relevante. Em áreas em restauração, alguma variabilidade espacial é esperada, inclusive em trajetórias sucessionais naturais. Entretanto, padrões persistentes de baixo desempenho devem ser tratados como sinais de triagem para direcionar validações complementares, inspeções de campo e eventuais ações corretivas.

3.2. Setor anômalo: identificação e divergência da unidade

A aplicação do critério padronizado de escore-z médio $\leq -1,5$ permitiu identificar os pixels 94, 96 e 100 como núcleo estatístico anômalo da UT02. O pixel 97 foi incorporado ao setor anômalo expandido por apresentar contiguidade espacial com o trecho de menor desenvolvimento observado em campo, localizado em área adjacente à estrada, além de manter valores sistematicamente baixos ao longo da série. Assim, o setor anômalo expandido foi composto pelos pixels 94, 96, 97 e 100.

A Figura 12 apresenta o contraste temporal entre o setor anômalo expandido e os demais pixels da UT02. Essa comparação é central para demonstrar que a recuperação média da

unidade não ocorreu de forma uniforme, pois o setor anômalo manteve trajetória inferior ao restante da área ao longo da série.

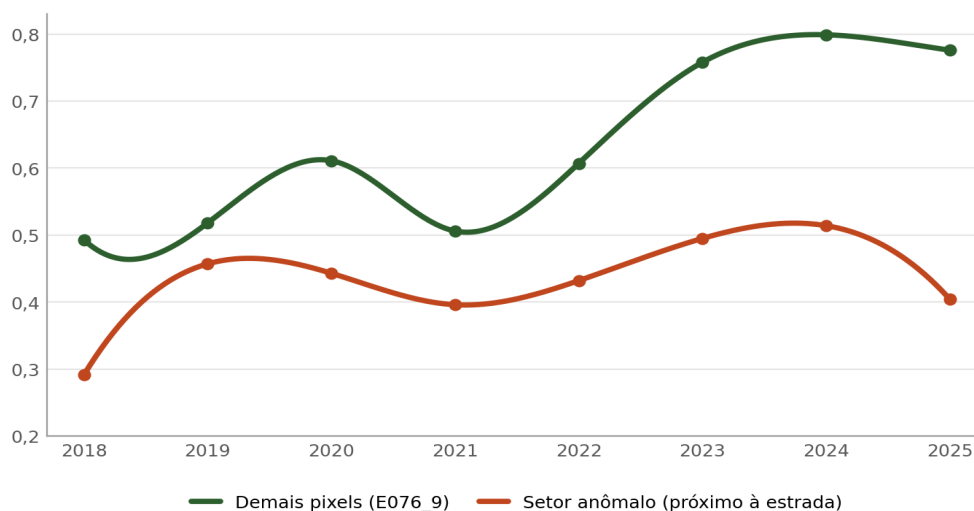


Figura 12 – Trajetória temporal do NDVI médio dos demais pixels da UT02 e do setor anômalo expandido, evidenciando a divergência entre a recuperação agregada da unidade e o comportamento do trecho crítico. Fonte: elaboração do autor.

O contraste entre o setor anômalo e os demais pixels da UT02 demonstrou diferença clara de trajetória. Enquanto os demais pixels apresentaram inclinação de aproximadamente 0,047 NDVI por ano, com $R^2 = 0,808$ e $p = 0,002$, o setor anômalo apresentou inclinação de apenas 0,015 NDVI por ano, com $R^2 = 0,296$ e $p = 0,163$, sem significância estatística. Esses resultados indicam que o setor anômalo evoluiu em ritmo substancialmente mais lento do que o restante da unidade.

O contraste interno também aumentou ao longo da série. Em 2018, a diferença entre o setor anômalo e os demais pixels era de 0,202; em 2025, essa diferença atingiu 0,372. Embora o contraste não tenha crescido de forma estritamente monotônica em todos os anos, a ampliação observada a partir de 2023 indica que os demais pixels aceleraram sua recuperação espectral, enquanto o setor anômalo permaneceu em patamar inferior.

Para detalhar essa divergência, a Tabela 7 apresenta, ano a ano, os valores médios de NDVI do setor anômalo expandido, dos demais pixels da UT02 e o contraste interno entre esses dois recortes. Essa comparação permite verificar se a diferença entre o setor crítico e o restante da unidade foi pontual ou persistente ao longo da série.

Tabela 7 – Comparação anual entre o setor anômalo expandido e os demais pixels da UT02.

Ano	Setor anômalo UT02	Demais pixels UT02	Contraste interno
2018	0,290	0,492	0,202
2019	0,454	0,518	0,064

Ano	Setor anômalo UT02	Demais pixels UT02	Contraste interno
2020	0,442	0,611	0,169
2021	0,396	0,506	0,110
2022	0,433	0,607	0,174
2023	0,494	0,758	0,264
2024	0,510	0,798	0,288
2025	0,404	0,776	0,372

Fonte: elaboração do autor.

A Tabela 7 demonstra que o contraste interno aumentou de 0,202 em 2018 para 0,372 em 2025. Embora tenha ocorrido oscilação entre os anos, a ampliação observada a partir de 2023 indica que os demais pixels avançaram para patamares mais elevados de NDVI, enquanto o setor anômalo permaneceu em condição espectral inferior.

Sob a ótica operacional, o resultado mais relevante não é atribuir causalidade única à anomalia, mas demonstrar que o NDVI permitiu localizar um setor com resposta espectral persistentemente inferior. A posição do setor anômalo, próxima à estrada, sugere hipóteses como efeito de borda, acesso, entrada de animais, pisoteio, herbivoria, exposição localizada do solo ou processos erosivos. Essas hipóteses, contudo, devem ser verificadas por inspeção de campo e imagens de maior resolução, não sendo possível atribuir causalidade definitiva apenas com base no índice espectral.

Assim, o setor anômalo não representa ausência de recuperação da UT02 como um todo, mas sim a presença de um foco específico de menor desempenho dentro de uma unidade em recuperação. Esse achado reforça o papel do NDVI como ferramenta de **triagem intraunidade**, capaz de indicar onde a equipe técnica deve priorizar validação, manutenção, replantio, controle de erosão, reforço de cercamento ou outras ações de manejo adaptativo.

3.3. Trajetória da UT03 e contraste comparativo

A UT03 apresentou comportamento distinto da UT02. Considerando a série de 2018 a 2025, a unidade exibiu trajetória agregada oscilatória, com NDVI médio variando entre 0,550 e 0,829, sem tendência direcional significativa para o conjunto do período, com inclinação de 0,009 NDVI por ano, $R^2 = 0,045$ e $p = 0,615$.

Entretanto, no período posterior à implantação florestal, a UT03 apresentou evolução expressiva. O NDVI médio passou de 0,601 em 2022 para 0,829 em 2025, com ganho médio de 0,228 em nível de pixel. Nesse intervalo, todos os 43 pixels apresentaram ganho positivo.

Após 2022, a unidade também exibiu baixa variabilidade interna, com coeficientes de variação de 7,60%, 12,03%, 3,57% e 3,32% entre 2022 e 2025.

A Tabela 8 sintetiza a trajetória anual do NDVI médio e do coeficiente de variação da UT02 e da UT03. Essa síntese permite comparar, simultaneamente, a evolução da cobertura verde e a heterogeneidade interna das duas unidades ao longo da série temporal.

Tabela 8 – Estatísticas anuais resumidas do NDVI das unidades UT02 e UT03.

Ano	UT02 NDVI médio	UT02 CV (%)	UT03 NDVI médio	UT03 CV (%)
2018	0,484	24,36	0,788	5,62
2019	0,515	16,19	0,618	29,41
2020	0,604	12,93	0,693	9,32
2021	0,501	21,41	0,592	6,69
2022	0,600	13,23	0,601	7,60
2023	0,747	12,08	0,550	12,03
2024	0,787	12,13	0,804	3,57
2025	0,761	13,92	0,829	3,32

Fonte: elaboração do autor a partir das planilhas brutas corrigidas da UT02 e da UT03.

A leitura da Tabela 8 evidencia que a UT02 apresentou aumento expressivo do NDVI médio, mas manteve coeficientes de variação relativamente elevados nos anos finais, indicando persistência de heterogeneidade interna. A UT03, por sua vez, apresentou redução acentuada do CV após 2023, com valores de 3,57% em 2024 e 3,32% em 2025, sugerindo comportamento espacial mais homogêneo no período pós-implantação florestal.

A análise pixel a pixel da UT03 confirmou a ausência de núcleo anômalo persistente sob o mesmo critério aplicado à UT02. O menor escore-z médio entre os 43 pixels foi -1,156, acima do limiar de $z \text{ médio} \leq -1,5$ adotado para definir anomalia persistente. Os pixels 32, 40, 22 e 30 apresentaram os menores escores-z médios da série, mas todos exibiram ganho positivo de NDVI entre 2022 e 2025, respectivamente de 0,337, 0,228, 0,418 e 0,235.

A Tabela 9 resume os principais indicadores da análise pixel a pixel da UT03, permitindo verificar se a unidade comparativa apresentou padrão semelhante ao núcleo anômalo identificado na UT02.

Tabela 9 – Indicadores da análise de pixels da UT03.

Indicador	Valor
Número de pixels analisados	43
Menor escore-z médio observado	-1,156
Pixels com $z \text{ médio} \leq -1,5$	0
Pixels com ganho positivo (2022-2025)	43

Indicador	Valor
Pixels com ganho negativo (2022-2025)	0
Ganho médio por pixel (2022-2025)	0,228

Fonte: elaboração do autor a partir da planilha bruta corrigida da UT03.

Os indicadores da Tabela 9 mostram que nenhum dos 43 pixels da UT03 atingiu o limiar de z médio $\leq -1,5$, e todos apresentaram ganho positivo entre 2022 e 2025. Esse resultado diferencia a UT03 da UT02, pois indica ausência de núcleo anômalo persistente sob o mesmo procedimento estatístico.

Embora a UT03 não tenha apresentado núcleo anômalo persistente, a Tabela 10 detalha os pixels com menores escores- z médios da unidade. Essa análise permite diferenciar pixels com desempenho relativamente inferior dentro da distribuição da UT03 de uma anomalia estatística persistente.

Tabela 10 – Principais pixels da UT03 com menor escore- z médio e ganho de NDVI entre 2022 e 2025.

Pixel	z médio	Anos com $z \leq -1,5$	Anos com $z \leq -2,0$	Ganho 2022-2025
32	-1,156	4	1	0,337
40	-1,045	3	0	0,228
22	-0,934	3	2	0,418
30	-0,766	2	1	0,235

Fonte: elaboração do autor a partir da planilha bruta corrigida da UT03.

A Tabela 10 evidencia que os pixels 32, 40, 22 e 30 apresentaram os menores escores- z médios, mas todos permaneceram acima do limiar de anomalia persistente e apresentaram ganho positivo de NDVI entre 2022 e 2025. Portanto, esses pixels representam heterogeneidade pontual ou episódica, e não um setor persistentemente deprimido comparável ao observado na UT02.

Esses resultados indicam que a UT03 apresentou heterogeneidade pontual e episódica, mas não um setor persistentemente deprimido comparável ao da UT02. O histograma de ganhos por pixel entre 2022 e 2025 reforça essa interpretação, pois todos os pixels apresentaram ganho positivo, com valores entre 0,113 e 0,418.

A Figura 13 complementa essa interpretação ao apresentar a distribuição dos ganhos de NDVI por pixel na UT03 entre 2022 e 2025. Essa visualização permite verificar se os ganhos foram concentrados em poucos pixels ou distribuídos de forma generalizada na unidade.

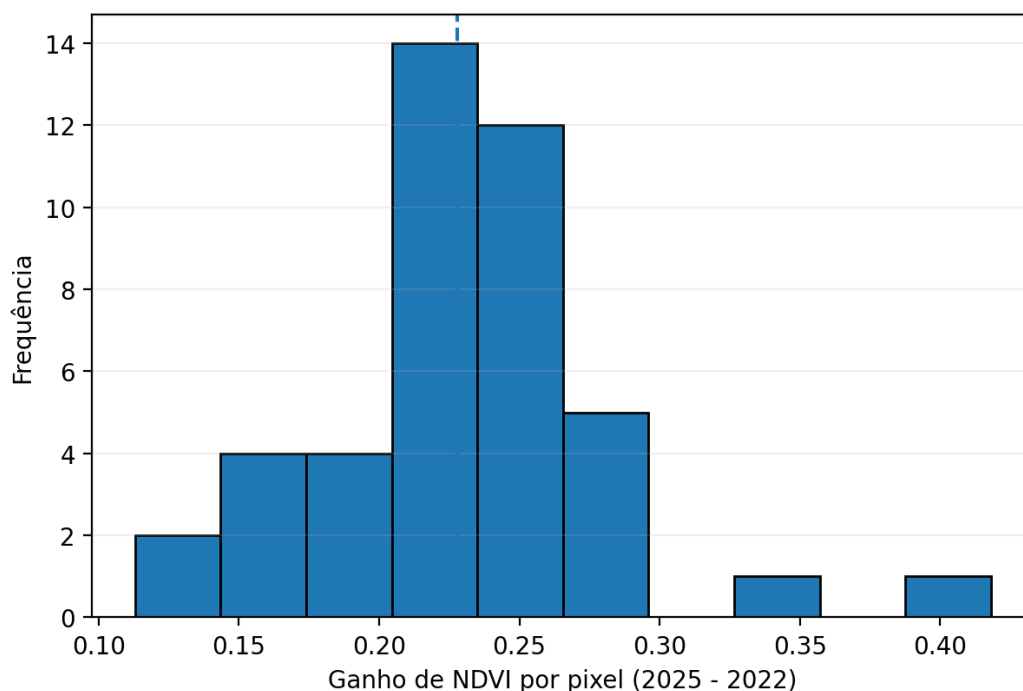


Figura 13 – Distribuição do ganho de NDVI por pixel na UT03 entre 2022 e 2025. Fonte: elaboração do autor.

A distribuição integralmente positiva dos ganhos reforça que a UT03 apresentou avanço generalizado da cobertura vegetal após a implantação florestal, sem formação de núcleo anômalo persistente sob o critério estatístico adotado.

3.4. Síntese comparativa entre UT02 e UT03

A comparação entre UT02 e UT03 reforça que flutuações entre pixels são esperadas em séries temporais de NDVI, especialmente em áreas em restauração sujeitas a variações ambientais, operacionais e fenológicas. Entretanto, tais flutuações não equivalem necessariamente à formação de um setor anômalo persistente.

Na UT02, a recuperação média positiva coexistiu com um setor de menor desempenho, especialmente localizado e estatisticamente identificado. Na UT03, apesar de oscilações anuais e de pixels com valores pontualmente inferiores, não foi identificado núcleo anômalo persistente sob o mesmo critério. Assim, a UT03 funcionou como contraste comparativo ao demonstrar que heterogeneidade pontual não deve ser confundida com anomalia intraunidade persistente.

Esse contraste reforça a principal contribuição analítica do capítulo: o NDVI em nível de pixel permite separar três situações distintas: **i)** recuperação média da unidade; **ii)** heterogeneidade interna esperada; e **iii)** setor anômalo com relevância operacional. Essa

diferenciação é essencial para evitar interpretações simplistas da restauração baseadas apenas na média anual da unidade.

3.5. Estabilidade, variabilidade interna e cartas I-AM

A análise complementar por cartas I-AM permitiu avaliar simultaneamente a mudança de média e o comportamento da variabilidade interna nas unidades analisadas. Essa etapa foi importante para distinguir aumento médio da cobertura vegetal de homogeneização espacial do processo restaurativo.

Antes da análise por cartas I-AM, a evolução anual do coeficiente de variação permitiu uma leitura preliminar da heterogeneidade interna das unidades. A Figura 14 apresenta o comportamento do CV ao longo da série para a UT02, para o setor anômalo expandido da UT02 e para a UT03, permitindo avaliar se o aumento médio do NDVI foi acompanhado por redução da variabilidade espacial.

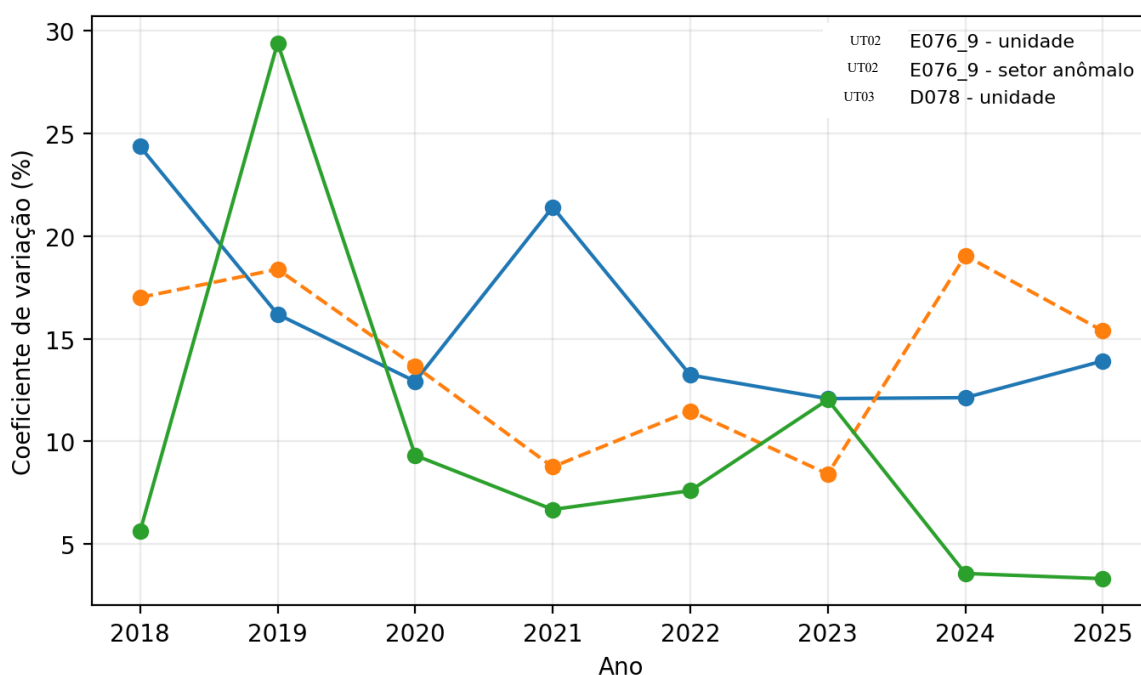


Figura 14 – Coeficiente de variação anual da UT02, do setor anômalo expandido da UT02 e da UT03. Fonte: elaboração do autor.

Na UT02, a comparação entre 2018 e 2025 indicou aumento estatisticamente significativo da média do NDVI, com $p < 0,001$, passando de 0,48404 para 0,76109. Entretanto, não houve mudança estatisticamente significativa do desvio-padrão, com $p = 0,077$. Esse resultado indica que o avanço médio da cobertura vegetal não foi acompanhado por

homogeneização proporcional da variabilidade espacial interna, o que é coerente com a permanência do setor anômalo identificado pela análise pixel a pixel.

Na UT03, a comparação entre 2022 e 2025 também indicou aumento estatisticamente significativo da média do NDVI, com $p < 0,001$, passando de 0,60058 para 0,82850. Diferentemente da UT02, houve redução significativa do desvio-padrão, com $p = 0,025$, indicando ganho de cobertura vegetal acompanhado por maior uniformidade interna após a implantação da fase arbórea da restauração.

A Figura 15 apresenta a carta I-AM da UT02, permitindo visualizar a mudança de média entre 2018 e 2025 e a permanência de variabilidade interna relevante no processo.

Carta I-AM comparativa: 2018 versus 2025

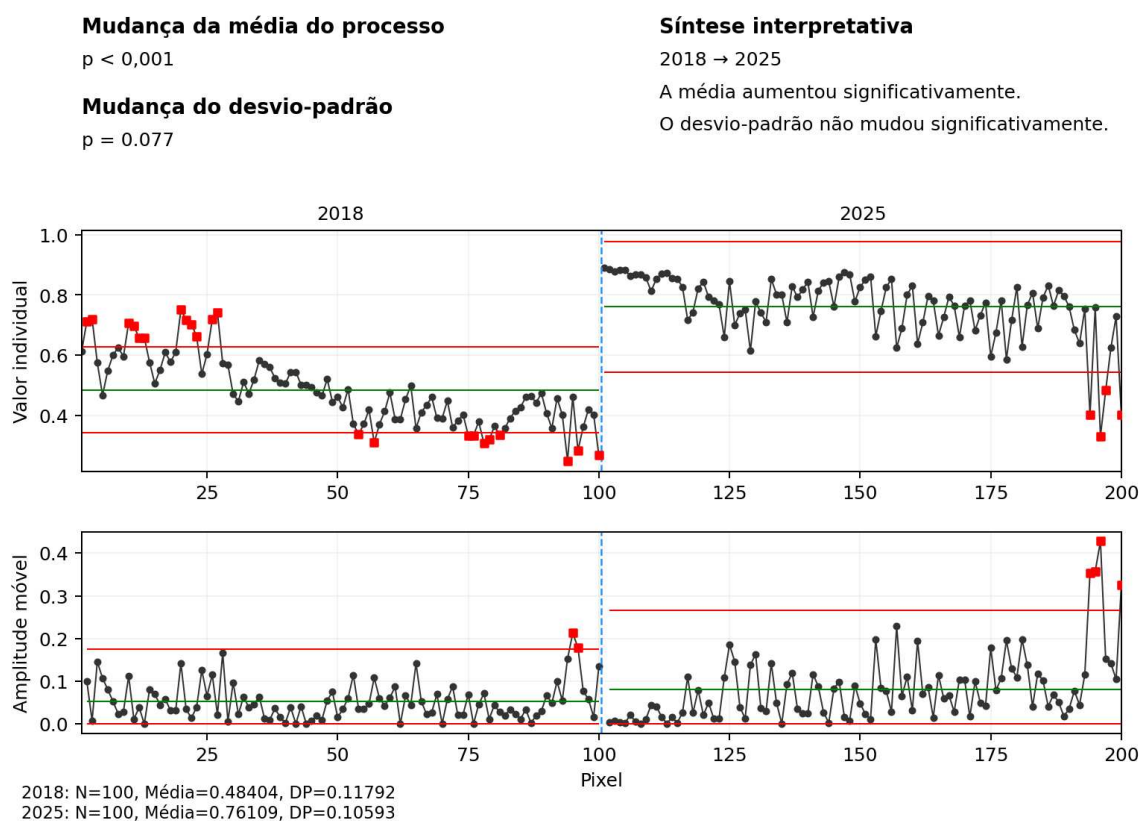


Figura 15 – Carta I-AM comparativa da UT02 entre 2018 e 2025. Fonte: elaboração do autor.

A Figura 16 apresenta a carta I-AM da UT03, evidenciando o aumento da média do NDVI entre 2022 e 2025 acompanhado de redução significativa da variabilidade interna.

Carta I-AM comparativa: 2022 versus 2025

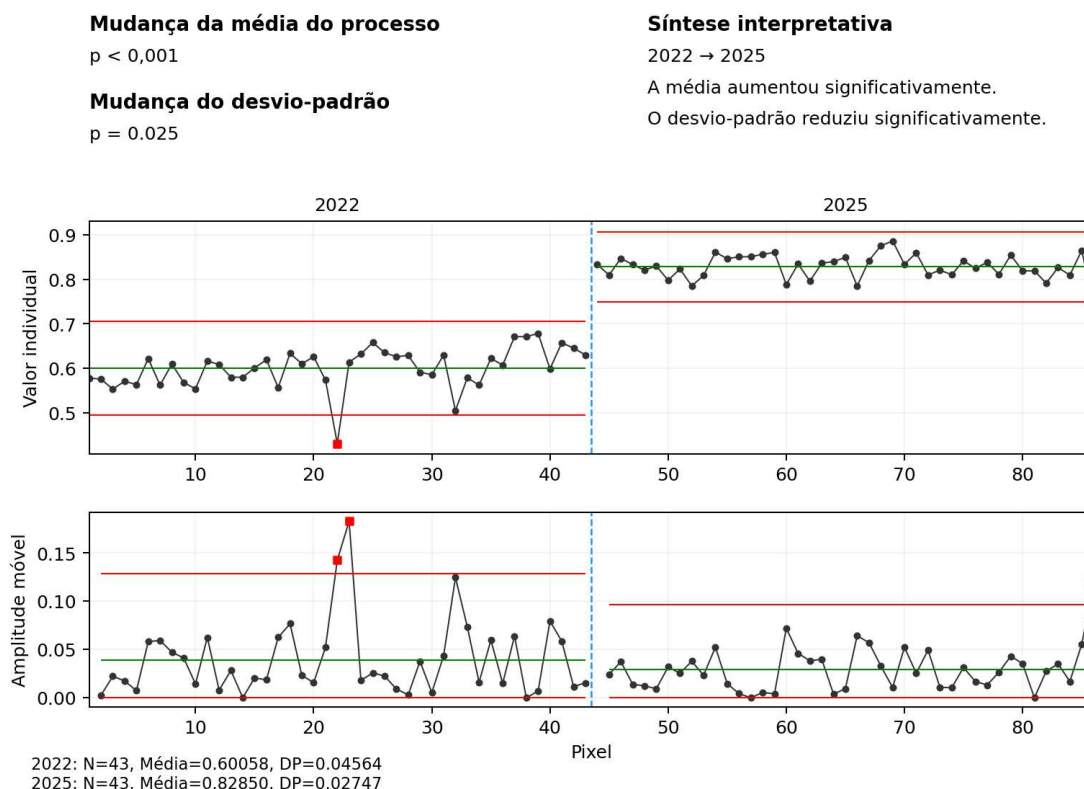


Figura 16 – Carta I-AM comparativa da UT03 entre 2022 e 2025. Fonte: elaboração do autor.

Em conjunto, as cartas I-AM reforçam que o aumento da média do NDVI não deve ser interpretado isoladamente como uniformização espacial da unidade restaurada. Na UT02, o ganho médio coexistiu com heterogeneidade relevante; na UT03, o aumento da média ocorreu acompanhado de maior homogeneidade. Assim, a associação entre estatísticas descritivas, regressões temporais, análise pixel a pixel e cartas I-AM ampliou a capacidade diagnóstica do monitoramento.

3.6. Implicações operacionais do monitoramento intraunidade

Os resultados demonstram que o NDVI, quando analisado em nível de pixel, pode ser utilizado como ferramenta de triagem intraunidade em programas de restauração florestal. A abordagem permitiu identificar que a UT02 apresentou recuperação significativa em escala agregada, mas também revelou um setor interno com resposta espectral inferior e persistente, cuja interpretação demanda validação complementar.

A integração entre análise estatística, imagens de VANTs e inspeções de campo é fundamental para transformar a anomalia espectral em diagnóstico operacional. O NDVI indica

onde há desvio; o campo e os VANTs ajudam a verificar por que esse desvio ocorre. Essa lógica evita tanto a generalização indevida de que a unidade falhou quanto a interpretação excessivamente otimista baseada apenas na média.

No caso da UT02, a presença de um setor anômalo próximo à estrada indica a necessidade de avaliar fatores como borda, acesso, entrada de animais, cercamento, pisoteio, herbivoria, exposição do solo e erosão localizada. Esses fatores, quando confirmados, podem orientar ações de manejo, como manutenção localizada, reforço de cercas, controle de processos erosivos, replantio, condução da regeneração ou ações de educação ambiental junto aos proprietários e comunidades locais.

Dessa forma, o principal resultado aplicado do capítulo é demonstrar que o monitoramento por NDVI pode ultrapassar a leitura média da unidade e apoiar a tomada de decisão baseada em dados. A análise intraunidade transforma a série temporal de pixels em informação operacional, permitindo priorizar vistorias, direcionar recursos e aumentar a eficiência das ações de restauração florestal.

4. DISCUSSÃO

Os resultados demonstram que o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) é útil não apenas para acompanhar a trajetória média da restauração, mas também para revelar contrastes intraunidade com relevância operacional. Em áreas restauradas sobre rejeito, nas quais a cobertura vegetal tende a se organizar de forma espacialmente heterogênea, a leitura baseada exclusivamente em médias anuais pode ocultar setores com baixo desempenho persistente. Nesse sentido, a combinação entre tendência temporal, variabilidade interna, análise em nível de pixel e cartas de controle amplia a capacidade diagnóstica do índice e aproxima sua aplicação das demandas práticas de monitoramento em programas de restauração florestal em larga escala (VIANI et al., 2017; VIANI et al., 2018; WANG et al., 2024).

Na UT02, a média anual do NDVI indicou recuperação positiva da cobertura vegetal entre 2018 e 2025. Entretanto, a análise pixel a pixel mostrou que esse avanço não ocorreu de forma homogênea. O setor anômalo expandido manteve valores persistentemente inferiores ao restante da unidade e apresentou taxa de incremento aproximadamente três vezes menor que a dos demais pixels, sem tendência estatisticamente significativa. As cartas I-AM corroboraram essa interpretação ao indicar aumento significativo da média do NDVI, mas ausência de mudança estatisticamente significativa no desvio-padrão do processo. Em termos práticos, a unidade avançou em cobertura vegetal, mas manteve heterogeneidade interna relevante, compatível com a permanência de um setor crítico.

A comparação com a UT03 reforça o caráter específico da anomalia observada na UT02. Embora a UT03 tenha apresentado oscilações ao longo da série completa, não foi identificado núcleo anômalo persistente sob o mesmo critério estatístico. No período posterior à implantação florestal, todos os pixels apresentaram ganho positivo de NDVI, e as cartas I-AM indicaram aumento significativo da média acompanhado de redução significativa da variabilidade interna. Esse contraste demonstra que flutuações espaciais e temporais são esperadas em séries de NDVI, especialmente em áreas em restauração, mas não equivalem necessariamente à formação de uma anomalia persistente.

A interpretação ecológica e operacional do setor anômalo da UT02 é coerente com a verificação de campo de um trecho com desenvolvimento inferior localizado próximo à estrada. Embora o estudo não tenha por objetivo atribuir causalidade única ao padrão observado, a posição do setor é compatível com hipóteses como efeito de borda, acesso de animais de produção, pisoteio, herbivoria, exposição localizada do solo, compactação e processos erosivos. Essas hipóteses devem ser confirmadas por inspeções de campo e imagens de maior resolução, pois o NDVI indica a existência e a persistência do desvio, mas não identifica, isoladamente, sua causa.

Esse argumento ganha consistência quando considerado o contexto operacional comum das duas unidades. Tanto a UT02 quanto a UT03 foram conduzidas sob lógica geral de restauração voltada ao estabelecimento de cobertura vegetal, com plantio de espécies pioneiras do grupo de recobrimento, replantios e manutenções. Assim, a divergência observada na UT02 sugere limitação local, e não falha generalizada da estratégia restaurativa. Nesse sentido, os pixels anômalos funcionaram como parâmetro empírico para avaliar a efetividade do NDVI em discriminar diferenças internas no avanço da cobertura vegetal, especialmente em setores sujeitos a perturbações localizadas. Essa interpretação é compatível com estudos sobre restauração em áreas mineradas, revegetação de substratos tecnogênicos e consolidação de tecnossolos em processo de recuperação (CAMPANHARO et al., 2021a; CAMPANHARO et al., 2021b; VILLA et al., 2022; MARTINS et al., 2024).

Do ponto de vista metodológico, os resultados evidenciam potencialidades e limitações do uso do Sentinel-2. A resolução espacial de 10 m é adequada para triagem, análise multitemporal e comparação entre anos, especialmente por se tratar de uma fonte gratuita, recorrente e aplicável a grandes extensões. Contudo, em APPs lineares, estreitas ou com forte heterogeneidade entre vegetação, solo exposto, rejeito, estrada e curso d'água, pode ocorrer mistura espectral. Por isso, o NDVI derivado do Sentinel-2 deve ser entendido como ferramenta de rastreio e priorização, e não como diagnóstico final. Quando houver viabilidade técnica e

financeira, imagens obtidas por VANTs e sensores orbitais de maior resolução, como PlanetScope, SPOT e WorldView, podem refinar a delimitação espacial das anomalias, reduzir incertezas associadas a pixels mistos e subsidiar protocolos de inspeção e validação (ALBUQUERQUE et al., 2021; ROBINSON et al., 2022; O'DONNELL et al., 2024).

Outra limitação relevante decorre do uso de séries anuais de NDVI previamente processadas, sem inventário completo das cenas e de todos os metadados orbitais. Essa condição não invalida a análise aplicada, mas restringe a incorporação de variáveis auxiliares, como chuva, declividade, textura do substrato, umidade do solo e histórico detalhado de manejo. Tais fatores poderiam explicar parte da variabilidade interanual e melhorar a interpretação causal dos desvios detectados. Portanto, estudos futuros devem integrar dados espectrais, variáveis ambientais, registros operacionais, imagens de maior resolução e validações de campo sistematizadas.

Em contextos pós-desastre, como o rompimento da Barragem de Fundão, a identificação rápida de setores com menor cobertura vegetal possui importância adicional. Embora o NDVI não meça diretamente turbidez, sólidos em suspensão ou material particulado, trechos com baixa cobertura podem indicar maior suscetibilidade à erosão e ao carreamento de sedimentos para os cursos d'água, especialmente em bacias hidrográficas com usos múltiplos da água. Assim, o uso recorrente de imagens gratuitas e padronizadas permite direcionar equipes de restauração, manutenção de bioengenharia, controle de erosão, fiscalização e educação ambiental para áreas mais sensíveis.

Em termos aplicados, os resultados sustentam a adoção de um protocolo hierárquico de monitoramento em programas de restauração de larga escala. O NDVI oferece triagem espacial rápida, comparável e de baixo custo; a análise pixel a pixel identifica setores com desempenho inferior; as cartas I-AM verificam se o ganho médio é acompanhado por redução da variabilidade; e os VANTs e o campo permitem confirmar as causas dos desvios e definir ações corretivas. Essa integração transforma dados espectrais em inteligência operacional, apoiando a tomada de decisão baseada em dados, a priorização de recursos e o manejo adaptativo das áreas em restauração.

Dessa forma, o NDVI deve ser entendido como ferramenta complementar ao monitoramento ecológico de campo, capaz de antecipar o reconhecimento de setores críticos e orientar intervenções voltadas à homogeneização da cobertura vegetal em APPs restauradas sobre rejeito. A principal contribuição do capítulo não está apenas na identificação de um setor anômalo na UT02, mas na demonstração de uma metodologia de triagem intraunidade que

permite distinguir recuperação média, heterogeneidade esperada e anomalias persistentes com relevância operacional.

5. CONCLUSÕES

A análise da série temporal de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) demonstrou que a restauração florestal na UT02 promoveu avanço da cobertura vegetal ao longo do período avaliado, porém de forma espacialmente heterogênea. Embora a unidade tenha apresentado evolução positiva em termos agregados, a abordagem em nível de pixel permitiu identificar um setor com resposta espectral persistentemente inferior ao restante da área, configurando uma anomalia intraunidade associada a um trecho de menor desenvolvimento localizado próximo à estrada. A comparação com a UT03 reforçou essa interpretação ao demonstrar que oscilações espaciais podem ocorrer em áreas restauradas sem, necessariamente, resultar na formação de um núcleo anômalo persistente sob o mesmo critério estatístico.

Os resultados evidenciaram que, na UT02, o aumento da média do NDVI não foi acompanhado por redução estatisticamente significativa da variabilidade interna, indicando que o ganho médio de cobertura vegetal não representou homogeneização espacial proporcional da unidade. Na UT03, por outro lado, o ganho médio observado entre 2022 e 2025 ocorreu com redução significativa do desvio-padrão e avanço positivo de todos os pixels após a implantação do plantio florestal. Esses achados demonstram que a análise espacial detalhada do NDVI amplia a capacidade diagnóstica do monitoramento, superando as limitações da leitura baseada apenas em médias anuais.

Do ponto de vista metodológico, os pixels anômalos funcionaram como parâmetro empírico para avaliar a efetividade do NDVI na discriminação de diferenças internas na evolução da cobertura vegetal. Assim, o índice não se restringe à geração de dados espectrais, mas pode fundamentar um procedimento sistemático de triagem, detecção, verificação e acompanhamento de anomalias intraunidade, integrando análise estatística, interpretação espacial, validação por campo e, quando disponível, imagens obtidas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) ou sensores de maior resolução espacial.

Do ponto de vista aplicado, a metodologia proposta contribui para transformar o monitoramento da restauração em um processo de tomada de decisão baseada em dados. A identificação precoce de setores com baixo desempenho permite direcionar inspeções, priorizar manutenções, orientar replantios, reforçar cercamentos, controlar processos erosivos e otimizar o uso dos recursos operacionais. Dessa forma, o NDVI em nível de pixel mostrou-se uma

ferramenta útil para diferenciar recuperação média, heterogeneidade esperada e anomalias persistentes com relevância para o manejo adaptativo.

Em contextos reparatórios como o do rompimento da Barragem de Fundão, nos quais a restauração florestal está vinculada ao cumprimento de compromissos técnicos, ambientais e institucionais, esse tipo de monitoramento assume relevância adicional. Conclui-se que o NDVI constitui instrumento relevante para o monitoramento operacional de áreas restauradas sobre rejeito de mineração, desde que interpretado de forma integrada às observações de campo e complementado, sempre que possível, por produtos de maior resolução espacial. Essa integração aumenta a precisão na delimitação de anomalias locais, calibra os resultados obtidos com o Sentinel-2 e orienta ações corretivas voltadas à padronização da cobertura vegetal e à consolidação dos fragmentos florestais em formação.

6. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, R. W.; FERREIRA, M. E.; OLSEN, S. I.; TYMUS, J. R. C.; BALIEIRO, C. P.; MANSUR, H.; MOURA, C. J. R.; COSTA, J. V. S.; BRANCO, M. R. C.;

GROHMANN, C. H. Forest restoration monitoring protocol with a low-cost remotely piloted aircraft: lessons learned from a case study in the Brazilian Atlantic Forest. **Remote Sensing**, Basel, v. 13, n. 12, art. 2401, 2021. DOI: 10.3390/rs13122401.

ALVES, William Victor Lisboa. **Restauração florestal em áreas atingidas pelo rejeito da barragem de Fundão, Minas Gerais, Brasil**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022.

BRANCALION, Pedro Henrique Santin; VIANI, Ricardo Augusto Gorne; RODRIGUES, Ricardo Ribeiro; GANDOLFI, Sergius. Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração. In: MARTINS, Sebastião Venâncio (ed.). **Restauração ecológica de ecossistemas degradados**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2015. p. 262-292.

CAMPANHARO, Ítalo Favoreto. **Evaluation of forest restoration techniques in area with Fundão dam tailing in Mariana, Minas Gerais, Brazil**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

CAMPANHARO, Ítalo Favoreto; MARTINS, Sebastião Venâncio; VILLA, Pedro Manuel; KRUSCHEWSKY, Gabriel Correa; DIAS, Andreia Aparecida; NABETA, Fabio Haruki. Forest restoration methods, seasonality, and penetration resistance does not influence aboveground biomass stock on mining tailings in Mariana, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S. l.], v. 93, art. e20201209, 2021a. DOI: 10.1590/0001-3765202120201209.

CAMPANHARO, Ítalo Favoreto; MARTINS, Sebastião Venâncio; VILLA, Pedro Manuel; KRUSCHEWSKY, Gabriel Correa; DIAS, Andreia Aparecida; NABETA, Fabio Haruki. Functional composition enhances aboveground biomass stock undergoing active forest restoration on mining tailings in Mariana, Brazil. **Restoration Ecology**, Malden, v. 29, n. 8, art. e13413, 2021b. DOI: 10.1111/rec.13413.

CNES. **SPOT**. Paris, 2025. Disponível em: <https://cnes.fr/en/projects/spot>. Acesso em: 22 mar. 2026.

ESA. **Sentinel-2**. Paris, [s.d.]. Disponível em: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2. Acesso em: 22 mar. 2026.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Programa de recuperação de áreas de preservação permanente e de recarga hídrica degradadas da bacia do Rio Doce (PG-26)**. Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <https://gis.fundacaorenova.org/assets/programas/descricao/PG26.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2026.

HU, J.; YE, B.; LI, Z.; LIANG, Y. Remote sensing monitoring of vegetation reclamation in mining tailings. **Remote Sensing**, Basel, v. 14, n. 22, art. 5634, 2022. DOI: 10.3390/rs14225634.

LIU, C.-C.; CHEN, Y.-H.; WU, Y.-M.; YEH, C.-M.; HO, H. Assessment of forest restoration with multitemporal remote sensing imagery. **Scientific Reports**, London, v. 9, art. 7279, 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-43544-5.

MAGNAGO, Leandro Freitas de Souza; MARTINS, Sebastião Venâncio; VENZKE, Tiago da Silva; IVANAUSKAS, Natália Macedo. Os processos e estágios sucessionais da Mata Atlântica como referência para a restauração florestal. In: MARTINS, Sebastião Venâncio (ed.). **Restauração ecológica de ecossistemas degradados**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2015. p. 70-101.

MARTINS, Sebastião Venâncio. **Recuperação de áreas degradadas: ações em áreas de preservação permanente, voçorocas, taludes rodoviários e de mineração**. 3. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2013.

MARTINS, Sebastião Venâncio. Alternative forest restoration techniques. In: VIANA, H. F. S.; GARCÍA-MOROTE, F. A. (ed.). **New perspectives in forest science**. London: IntechOpen, 2018. p. 131-148. DOI: 10.5772/intechopen.72908.

MARTINS, Sebastião Venâncio; MIRANDA NETO, A.; RIBEIRO, T. M. Uma abordagem sobre diversidade e técnicas de restauração ecológica. In: MARTINS, Sebastião Venâncio (ed.). **Restauração ecológica de ecossistemas degradados**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2015. p. 19-41.

MARTINS, Sebastião Venâncio; PILOCELLI, Aline; KRUSCHEWSKY, Gabriel Correa; DIAS, Andreia Aparecida; NABETA, Fabio Haruki; VILLA, Pedro Manuel. Seed bank and aboveground vegetation of Atlantic Forest re-growing on mining tailings in Mariana: highlighting diversity patterns of functional groups. **Ecological Research**, [S. l.], v. 39, n. 3, p. 289-302, 2024. DOI: 10.1111/1440-1703.12453.

MARTINS, Sebastião Venâncio; RICARDO, Patrícia Aparecida Laviola. **Protocolo LARF de monitoramento de projetos de restauração florestal: Mata Atlântica**. Viçosa: UFV, 2025. 1 folheto eletrônico, 23 p. (Boletim de Extensão, 91). ISSN 1415-692X.

MARTINS, Sebastião Venâncio; VILLA, Pedro Manuel; NABETA, Fabio Haruki; SILVA, Leonardo Ferreira da; KRUSCHEWSKY, Gabriel Correa; DIAS, Andreia Aparecida. Study on site preparation and restoration techniques for forest restoration in mining tailings of Mariana, Brazil. **Research in Ecology**, [S. l.], v. 2, n. 3, p. 140-147, 2020. DOI: 10.30564/re.v2i3.2052.

O'DONNELL, M. S.; WHIPPLE, A. L.; INMAN, R. D.; TARBOX, B. C.; MONROE, A. P.; ROBB, B. S.; ALDRIDGE, C. L. **Remote sensing for monitoring mine lands and recovery efforts**. Reston: U.S. Geological Survey, 2024. (Circular, 1525). DOI: 10.3133/cir1525.

OLIVEIRA, Renata Evangelista de; ENGEL, Vera Lex; LOIOLA, Priscilla de Paula; MORAES, Luiz Fernando Duarte de; VISMARA, Edgar de Souza. Top 10 indicators for evaluating restoration trajectories in the Brazilian Atlantic Forest. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 127, art. 107652, 2021. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107652.

PILOCELLI, Aline. **Bioindicadores para monitoramento da restauração de áreas impactadas pelo rompimento da barragem de Fundão, Mariana, Minas Gerais**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

PLANET. **PlanetScope product specifications**. San Francisco, 2026. Disponível em: <https://docs.planet.com/data/imagery/planetscope/>. Acesso em: 22 mar. 2026.

RICARDO, Patrícia Aparecida Laviola. **Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração florestal em Brumadinho, MG**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023.

ROBINSON, J. M.; HARRISON, P. A.; MAVOA, S.; BREED, M. F. Existing and emerging uses of drones in restoration ecology. **Methods in Ecology and Evolution**, London, v. 13, n. 9, p. 1899-1911, 2022. DOI: 10.1111/2041-210X.13912.

SAMARCO. **Rompimento**. Belo Horizonte, [s.d.]. Disponível em: <https://www.samarco.com/rompimento/>. Acesso em: 22 mar. 2026.

TUCKER, Compton J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.

VIANI, Ricardo Augusto Gorne; HOLL, Karen D.; PADOVEZI, Aurelio; STRASSBURG, Bernardo B. N.; FARAH, Fabiano T.; GARCIA, Livia C.; CHAVES, Rafael B.; RODRIGUES, Ricardo Ribeiro; BRANCALION, Pedro Henrique Santin. Protocol for monitoring tropical forest restoration: perspectives from the Atlantic Forest Restoration Pact in Brazil. **Tropical Conservation Science**, Thousand Oaks, v. 10, p. 1-8, 2017. DOI: 10.1177/1940082917697265.

VIANI, Ricardo Augusto Gorne; BARRETO, Tiago Enes; FARAH, Fabiano Turini; RODRIGUES, Ricardo Ribeiro; BRANCALION, Pedro Henrique Santin. Monitoring young tropical forest restoration sites: how much to measure? **Tropical Conservation Science**, Thousand Oaks, v. 11, p. 1-8, 2018. DOI: 10.1177/1940082918780916.

VILLA, Pedro Manuel; MARTINS, Sebastião Venâncio; PILOCELLI, Aline; KRUSCHEWSKY, Gabriel Correa; DIAS, Andreia Aparecida; NABETA, Fabio Haruki. Attributes of stand-age-dependent forest determine technosol fertility of Atlantic Forest re-growing on mining tailings in Mariana, Brazil. **Journal of Forestry Research**, Beijing, v. 33, p. 103-116, 2022. DOI: 10.1007/s11676-021-01359-z.

WANG, R.; SUN, Y.; ZONG, J.; WANG, Y.; CAO, X.; WANG, Y.; CHENG, X.; ZHANG, W. Remote sensing application in ecological restoration monitoring: a systematic review. **Remote Sensing**, Basel, v. 16, n. 12, art. 2204, 2024. DOI: 10.3390/rs16122204.

XUE, J.; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. **Journal of Sensors**, Cairo, v. 2017, art. 1353691, 2017. DOI: 10.1155/2017/1353691.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou que o sensoriamento remoto, especialmente a partir de imagens anuais Sentinel-2 e do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), constitui ferramenta relevante para o acompanhamento da restauração florestal em Áreas de Preservação Permanente impactadas por rejeito de mineração. A análise multitemporal permitiu identificar padrões de recuperação da cobertura vegetal, comparar unidades restauradas com um ecossistema de referência e reconhecer diferenças associadas à idade de implantação, largura da APP, contexto operacional e heterogeneidade interna das áreas avaliadas.

No Capítulo I, os resultados indicaram que as três Unidades de Trabalho apresentaram trajetória positiva de recuperação espectral após a implantação das ações de restauração, com elevada coerência entre o NDVI e os índices complementares Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI), Enhanced Vegetation Index (EVI) e Two-band Enhanced Vegetation Index (EVI2). A UT01 demonstrou maior estabilidade e maior aproximação espectral em relação ao ambiente de referência; a UT02 apresentou evolução consistente após 2023, corroborada pelas imagens obtidas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), que evidenciaram redução de solo exposto e aumento do componente arbóreo-arbustivo; e a UT03 apresentou resposta rápida, embora sua interpretação exija cautela devido à largura reduzida da APP, à possibilidade de pixels mistos e à influência inicial de cobertura herbácea. O tempo médio estimado de convergência espectral, de aproximadamente 5,8 anos após a implantação, deve ser entendido como indicador operacional de planejamento, e não como diagnóstico de restauração ecológica completa.

No Capítulo II, a análise em nível de pixel demonstrou que o NDVI pode ser utilizado não apenas para avaliar médias gerais das unidades, mas também para identificar setores internos com desenvolvimento inferior ao restante da área. Na UT02, a persistência de pixels com valores reduzidos de NDVI permitiu reconhecer um setor anômalo adjacente à estrada, cuja evolução espectral foi mais lenta que a dos demais pixels da unidade. A UT03, utilizada como contraste comparativo, não apresentou núcleo anômalo persistente sob o mesmo critério estatístico. Esse resultado evidencia o potencial do NDVI como ferramenta de triagem operacional, capaz de direcionar vistorias de campo e apoiar decisões relacionadas à manutenção, replantio, proteção contra animais, correção de falhas de cercamento e controle de fatores de degradação.

A principal contribuição prática do estudo está na demonstração de que imagens anuais Sentinel-2, por serem gratuitas, recorrentes e de processamento acessível, podem apoiar

programas de restauração em larga escala, otimizando tempo e custos de monitoramento. Entretanto, os resultados reforçam que o NDVI deve ser utilizado como parte de um protocolo mais amplo. O índice informa principalmente sobre cobertura verde e vigor vegetativo, mas não permite avaliar diretamente indicadores ecológicos essenciais, como riqueza de espécies, diversidade, densidade de regenerantes, composição florística, presença de invasoras, herbivoria, mortalidade e estrutura sucessional. Assim, a aproximação espectral em relação à referência deve ser interpretada como convergência da cobertura verde, e não como comprovação isolada de restauração ecológica plena.

Dessa forma, a integração entre sensoriamento remoto orbital, imagens de VANTs e avaliações de campo representa a abordagem mais consistente para o monitoramento da restauração florestal em áreas impactadas por rejeitos. O Sentinel-2 é adequado para triagem, acompanhamento temporal e identificação de anomalias em escala macro; os VANTs contribuem com maior detalhamento espacial e com a interpretação de pixels mistos; e o monitoramento *in loco* permite verificar possíveis causas dos desvios, avaliar indicadores ecológicos e orientar ações corretivas. Essa abordagem multiescalar fortalece a tomada de decisão baseada em dados e contribui para maior efetividade técnica, ambiental e operacional dos programas de restauração.

No contexto do rompimento da Barragem de Fundão, a restauração florestal das APPs representa instrumento central para a mitigação dos impactos ambientais, a recomposição da proteção ripária e o restabelecimento gradual das funções ecológicas dessas áreas. A análise das imagens históricas permite inferir que as unidades avaliadas, apesar do histórico prévio de uso agropecuário e da deposição de rejeitos, encontram-se em trajetória de recuperação da cobertura vegetal, graças às ações de restauração florestal adotadas pela mineradora Samarco. Essa recuperação contribui para o cumprimento da legislação ambiental aplicável às APPs, para a proteção dos recursos hídricos, para a recomposição da paisagem ripária e, em médio e longo prazo, para serviços ambientais associados à estabilização do solo, conectividade ecológica, formação de micro habitats, incremento potencial de carbono e regulação microclimática local.

A integração entre monitoramento remoto, inspeções de campo, manutenção de bioengenharia e ações rápidas de manejo amplia a capacidade de resposta dos programas de restauração. Quando anomalias são identificadas precocemente, torna-se possível corrigir falhas, reforçar cercamentos, controlar processos erosivos, reduzir a entrada de animais de produção e orientar replantios antes que a degradação se consolide. Esse fluxo de informação favorece a redução da heterogeneidade interna das Unidades de Trabalho e cria melhores condições para o avanço da sucessão ecológica, o incremento de espécies do grupo de

diversidade e o atingimento de indicadores associados à cobertura, riqueza, estrutura e funcionalidade do fragmento restaurado.

A estimativa do tempo médio de aproximação espectral em relação ao ambiente de referência pode orientar cronogramas de manutenção, definição do momento mais adequado para enriquecimento com espécies de diversidade, priorização de áreas com menor resposta espectral e dimensionamento de recursos humanos e financeiros. Contudo, a confirmação da autossuficiência do fragmento exige integração com indicadores ecológicos de campo, como riqueza, diversidade, regeneração natural, sobrevivência, estratificação, controle de invasoras, ausência de fatores de degradação recorrentes e evidências de continuidade dos processos sucessionais.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros ampliem o número de unidades avaliadas, incorporem séries com maior frequência intra-anual, integrem dados de campo sobre riqueza, sobrevivência, regeneração natural e cobertura de copa, e avaliem diferentes limiares de convergência espectral em relação a ambientes de referência. Recomenda-se, ainda, incorporar de forma permanente ações de educação ambiental e sensibilização como componente complementar do monitoramento, uma vez que a redução de pressões antrópicas é decisiva para a continuidade da trajetória restaurativa. Esses avanços podem contribuir para transformar o NDVI e outros índices espectrais em instrumentos cada vez mais robustos para planejamento, fiscalização, priorização de recursos e avaliação da efetividade da restauração florestal em contextos reparatórios.

APÊNDICE A – FIGURAS COMPLEMENTARES DE MONITORAMENTO

As figuras a seguir foram organizadas como material complementar para apoiar a leitura integrada dos resultados da dissertação, reunindo a síntese visual da trajetória espectral das unidades restauradas, a evidência multitemporal por VANT e a evolução da cobertura do solo na área monitorada.

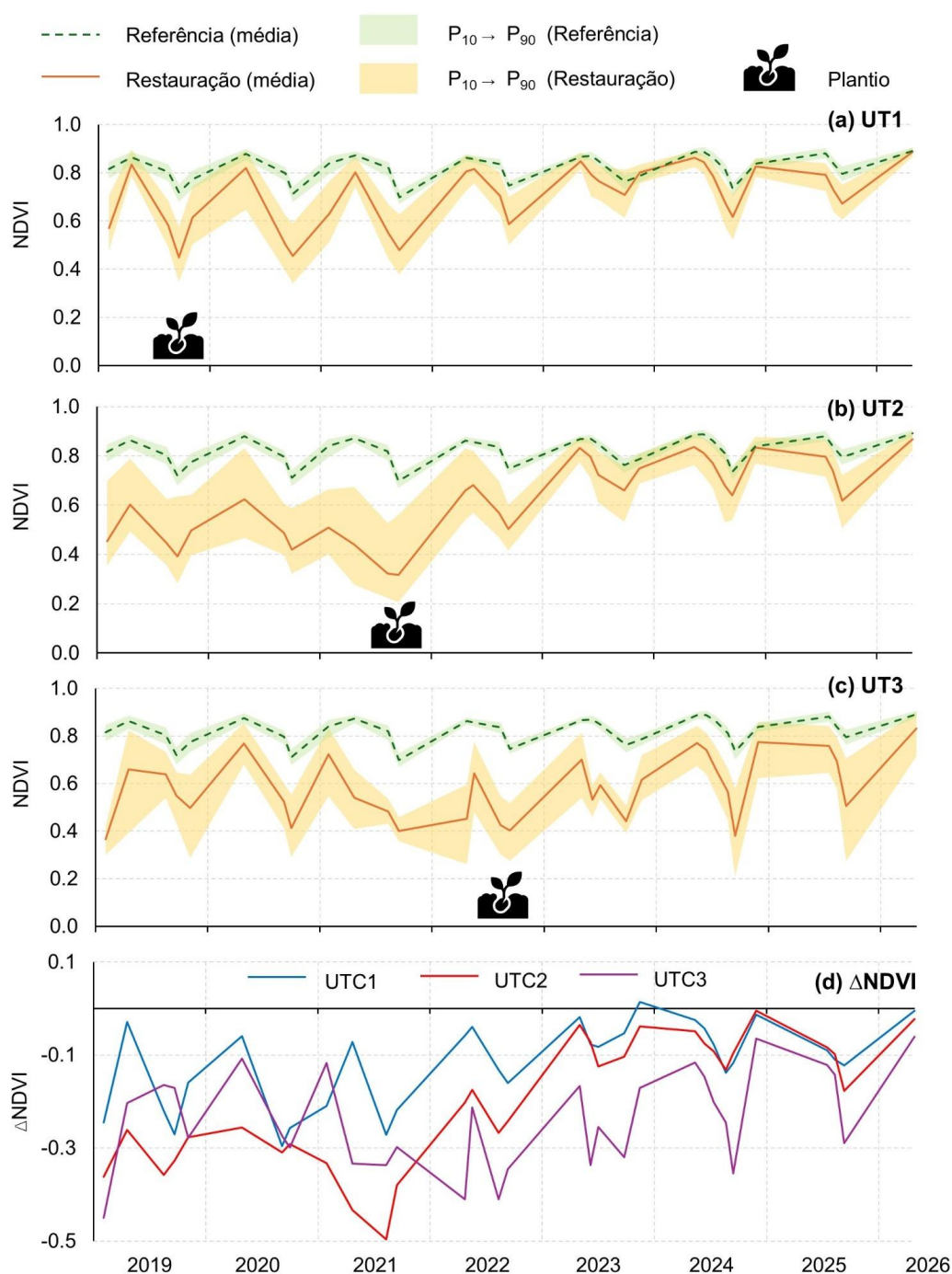


Figura A1 – Síntese gráfica da dinâmica temporal do NDVI nas três unidades restauradas e do déficit espectral em relação ao ecossistema de referência (Δ NDVI), evidenciando a trajetória de convergência da restauração.

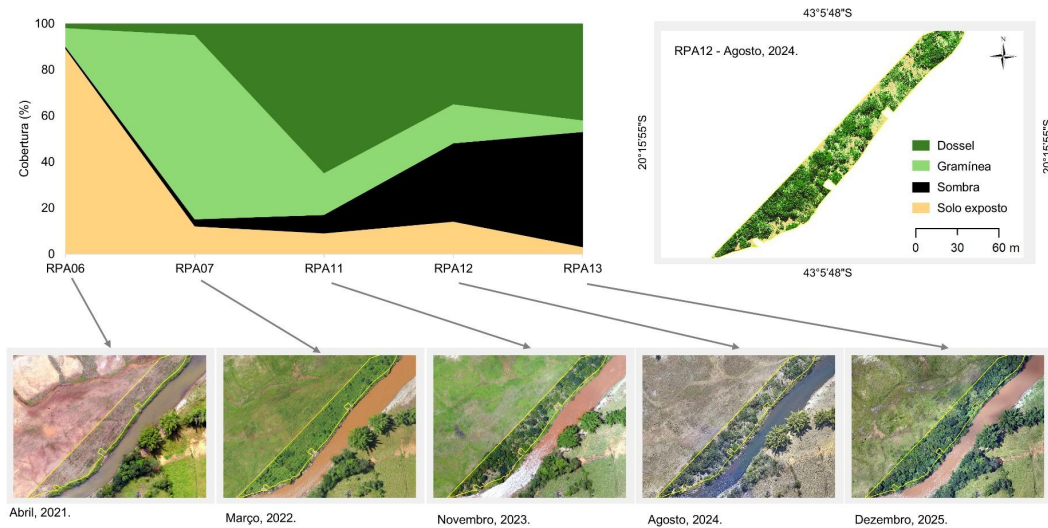


Figura A2 – Monitoramento multitemporal por VANT da UT02, com classificação supervisionada por Random Forest e sequência de imagens aéreas entre 2021 e 2025, indicando redução de solo exposto e incremento de cobertura vegetal.

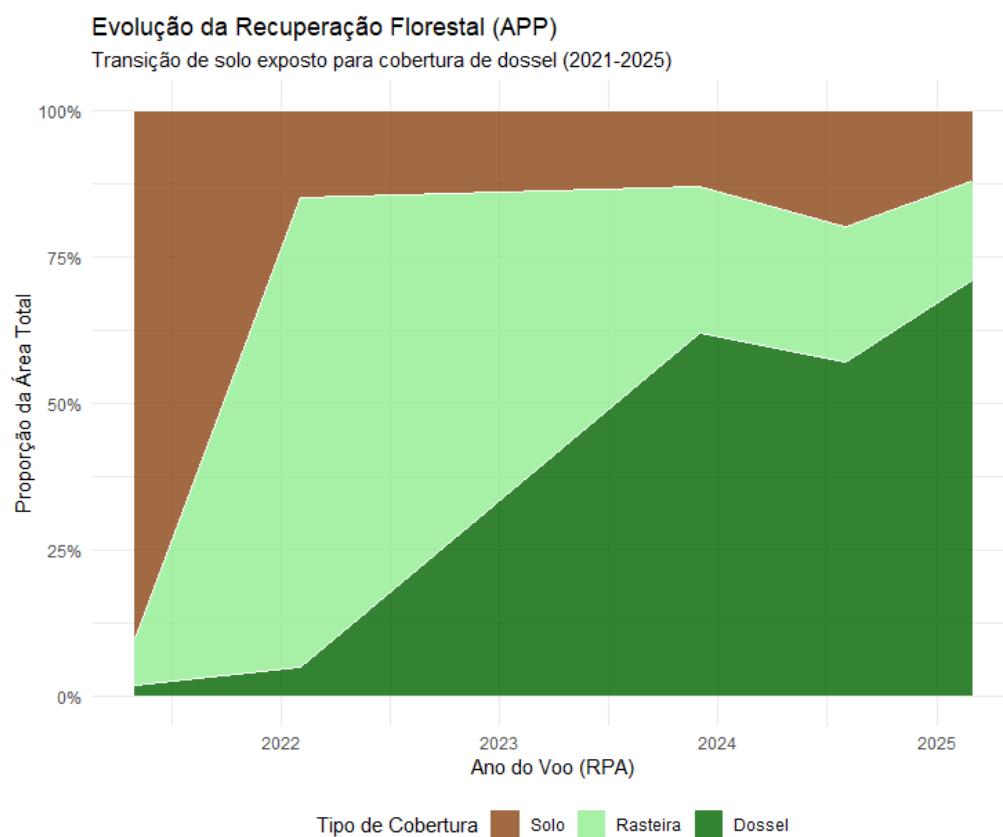


Figura A3 – Evolução da proporção de cobertura do solo na APP monitorada por VANT entre 2021 e 2025, demonstrando a transição de solo exposto para cobertura rasteira e posterior aumento do dossel arbóreo-arbustivo.