

DINÂMICA TEMPORAL E ESPACIAL DO PLANTIO DE EUCALIPTO NO EIXO MUNICIPAL CURVELO-CORINTO, MINAS GERAIS, BRASIL

Temporal and spatial dynamics of eucalyptus plantation in the municipal axis
Curvelo-Corinto, Minas Gerais, Brazil

Polítacito Ricardo de Oliveira Santos

Geógrafo, Mestre em Geografia pela PUC Minas, Brasil

<https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

politacito@gmail.com

Luiz Eduardo Panisset Travassos

Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq (PQ-2). Doutor em Geografia e Doutor em Carstologia, Professor do Departamento de Geografia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e Professor Permanente do Programa de Pós-Graduação em Geografia da PUC Minas, Brasil

<https://orcid.org/0000-0001-6264-2429>

luizepanisset@gmail.com

Jorge Batista de Souza

Doutor em Geografia, Professor do Departamento de Geografia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e Professor Permanente do Programa de Pós-Graduação em Geografia da PUC Minas, Brasil

<https://orcid.org/0000-0002-3884-9865>

profjbatista@gmail.com

Bruno Durão Rodrigues

Doutor em Geografia, Professor do Departamento de Geografia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e Professor Permanente do Programa de Pós-Graduação em Geografia da PUC Minas, Brasil

<https://orcid.org/0000-0001-5939-9595>

profbrunodurao@gmail.com

Rodrigo Corrêa Teixeira

Professor do Departamento de Relações Internacionais da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e Professor Permanente do Programa de Pós-Graduação em Geografia da PUC Minas, Brasil

<https://orcid.org/0000-0002-9107-0498>

rodrigocorreateixeira@gmail.com

Artigo recebido em dez/2023 e aceito em mar/2024

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar a dinâmica espacial e temporal da plantação de eucalipto nos períodos de 1996, 2006, 2016 e 2023. A área de estudo está localizada na região central do estado de Minas Gerais, englobando os municípios de Curvelo, Morro da Garça, Inimutaba e Corinto. Percebe-se uma falta de informações nas escalas espaciais e temporais em relação à expansão da atividade, o

que leva a um debate superficial e prematuro sobre as consequências da mesma. A relevância do estudo na região deve-se à fragilidade natural e ambiental dos sistemas cársticos frente ao avanço da expansão do eucalipto. Para identificar o plantio de eucalipto, foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 5 e 8, além de visitas de campo. A pesquisa revelou um aumento significativo da plantação de eucalipto na área de estudo, bem como a necessidade de novos estudos sobre os impactos decorrentes da presença do eucalipto no carste e em áreas importantes para a gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Plantio de Eucalipto; Sistemas Cársticos; Curvelo-Corinto; Minas Gerais; Brasil.

ABSTRACT

This work aims to analyze the spatial and temporal dynamics of eucalyptus plantations in the periods of 1996, 2006, 2016, and 2023. The study area is located in the central region of Minas Gerais, encompassing the municipalities of Curvelo, Morro da Garça, Inimutaba, and Corinto. There is a lack of information at spatial and temporal scales regarding the expansion of this activity, leading to a superficial and premature debate about its consequences. The study's relevance in the region is due to the natural and environmental fragility of karstic systems in the face of the advancing expansion of eucalyptus. Images from Landsat 5 and 8 satellites were used to identify eucalyptus plantations, in addition to field visits. The research revealed a significant increase in eucalyptus plantations in the study area, as well as the need for further studies on the impacts resulting from the presence of eucalyptus in karst and areas crucial for water resource management.

Keywords: Eucalyptus Plantation; Karstic Systems; Curvelo-Corinto; Minas Gerais; Brazil.

1. INTRODUÇÃO

Esta pesquisa surge como resultado da preocupação dos autores em relação ao desenvolvimento temporal e espacial das florestas plantadas de eucalipto no eixo municipal Curvelo-Corinto, Minas Gerais, Brasil. No contexto da gestão territorial municipal, questionamentos emergem por parte dos gestores e da sociedade a respeito da expansão da silvicultura na área. Nesse sentido, há muitas discussões sobre os impactos socioambientais deste plantio, tanto na esfera acadêmico-científica quanto no planejamento territorial. Entretanto, observa-se uma falta de informações concretas sobre a expansão desse tipo de cultivo, o que poderia subsidiar uma melhor gestão do território e debates mais aprofundados na sociedade.

Do ponto de vista geológico, é fundamental considerar a localização dos municípios em relação ao carste carbonático e sua grande vulnerabilidade natural e ambiental frente aos impactos antrópicos. Geralmente, pouca atenção é dada às dinâmicas desse tipo de relevo, especialmente quando se apresenta encoberto como na região.

O eucalipto, uma espécie exótica originária da Austrália, possui características que o diferenciam de outras espécies, especialmente para uso no reflorestamento de áreas degradadas ou na atividade industrial. A espécie apresenta alta taxa de crescimento e fácil adaptação às mais diversas condições edafoclimáticas brasileiras, fatores que favorecem seu desenvolvimento em larga escala

(LIMA, 1996; CASTRO *et al.*, 2016; CUNHA *et al.*, 2021). Com a expansão da silvicultura pelo território brasileiro, surgiram questionamentos em relação às consequências ambientais das florestas plantadas, bem como os impactos sociais para as comunidades tradicionais (Silva, 2005).

No Brasil, o sucesso do cultivo de eucalipto foi impulsionado pelo seu uso como biomassa combustível (por exemplo, lenha e carvão) e, posteriormente, como insumo para a fabricação de celulose e papel (FOELKEL, 2005). Conforme a Indústria Brasileira de Árvores (2017), em 2016, a cultura de eucalipto ocupava 5,7 milhões de hectares da área de árvores plantadas do país, localizadas principalmente em Minas Gerais (24%), São Paulo (17%) e Mato Grosso do Sul (15%). Ainda conforme a IBA (2017), se levarmos em conta as árvores plantadas, o Brasil possui 9 milhões de hectares plantados de eucalipto, pinus e demais espécies para a produção de painéis de madeira, pisos laminados, celulose, papel, produção energética e biomassa, sendo responsáveis por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais no País.

Em Minas Gerais, a partir da década de 1980, a cultura surgiu em função dos trabalhos desenvolvidos pelo Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF), por meio do zoneamento de áreas específicas para a inserção da espécie no estado. Além disso, neste mesmo período, a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) influenciou o reflorestamento e a expansão das culturas de eucalipto na região.

Diante da expansão das áreas plantadas, percebe-se uma ausência de informação nas escalas temporal e espacial, especialmente em áreas tão importantes para o abastecimento humano como as regiões cárnicas. Tal ausência potencializa um debate superficial e, ao mesmo tempo, prematuro sobre as consequências da cultura do eucalipto nessas áreas. Portanto, a gestão municipal carece de informações suficientes sobre a dinâmica do território, além dos possíveis impactos socioambientais gerados pela atividade.

De acordo com Resende (2012), analisar a "geografia" dessa cultura contribui para o planejamento, organização, controle e uso do território estadual e municipal. Além disso, favorece a definição de políticas públicas mais adequadas à realidade do estado e para a efetividade da gestão do território pelos governos estaduais e municipais. Para auxiliar nesta tarefa, o geoprocessamento tem um papel relevante, uma vez que facilita o gerenciamento das informações espaciais e temporais, além de permitir a elaboração de diagnósticos e prognósticos a fim de subsidiar a tomada de decisões (JACINTHO, 2003).

Quanto ao desenvolvimento de atividades antrópicas no Carste, os debates são ainda mais escassos. De acordo com Ford e Williams (2007), o relevo cárstico se desenvolve tradicionalmente em terrenos compostos por rochas carbonáticas, como o calcário e o dolomito. Essa paisagem foi de primordial importância para o desenvolvimento de inúmeras civilizações e, ainda hoje, é determinante

no abastecimento de diversos países e regiões com suas águas subterrâneas e outros recursos naturais. O carste pode ser identificado na superfície por meio de grandes paredões rochosos e feições associadas, bem como no subsolo com o desenvolvimento de vastos sistemas de cavernas e aquíferos.

O carste pode ser classificado como exposto, exumado ou encoberto. De forma simples, um pacote carbonático que foi exposto aos elementos climáticos e ainda se encontra em estágio inicial é considerado um carste exposto. Segundo Travassos *et al.* (2014; 2019), ao se desenvolver, o carste exposto pode ser coberto por solo residual. Se este tiver sua cobertura removida pela erosão, será denominado carste exumado. Sweeting (1973), Jennings (1985) e Veress (2016) afirmam que o carste encoberto é aquele cuja rocha carbonática é coberta por solo, vegetação ou rocha inconsolidada. No caso de regiões alpinas, existe o glaciocarste, alternadamente encoberto por gelo, solo e material inconsolidado. Salomon *et al.* (1995), Knez *et al.* (2003) e Ford e Williams (2007) chamam de criptocarste (Nicod, 1976) o carste encoberto. Na região de estudo desta pesquisa, o carste é predominantemente encoberto, pois se apresenta totalmente enterrado ou coberto por sedimentos.

Diante da necessidade de identificar a ocupação territorial da cultura do eucalipto no eixo municipal Curvelo-Corinto, em Minas Gerais, o trabalho visa analisar a dinâmica espacial e temporal da plantação de eucalipto nos períodos de 1996, 2006 e 2016.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 1) está localizada na região central do estado de Minas Gerais, abrangendo os municípios de Curvelo, Morro da Garça, Inimutaba e Corinto, com uma área total de 675.324 hectares (IBGE, 2017). A região se estende por duas bacias hidrográficas: a bacia do Rio Paraopeba e a bacia do Rio das Velhas. O acesso à área de estudo é feito pelas rodovias BR-040, sentido Brasília, e pela BR-135, sentido Curvelo-Corinto. A população total dos municípios é de 114.347 habitantes, concentrados principalmente em núcleos urbanos. Embora o setor de serviços domine a economia local, a agropecuária é uma das principais atividades desenvolvidas na região (IBGE, 2017).

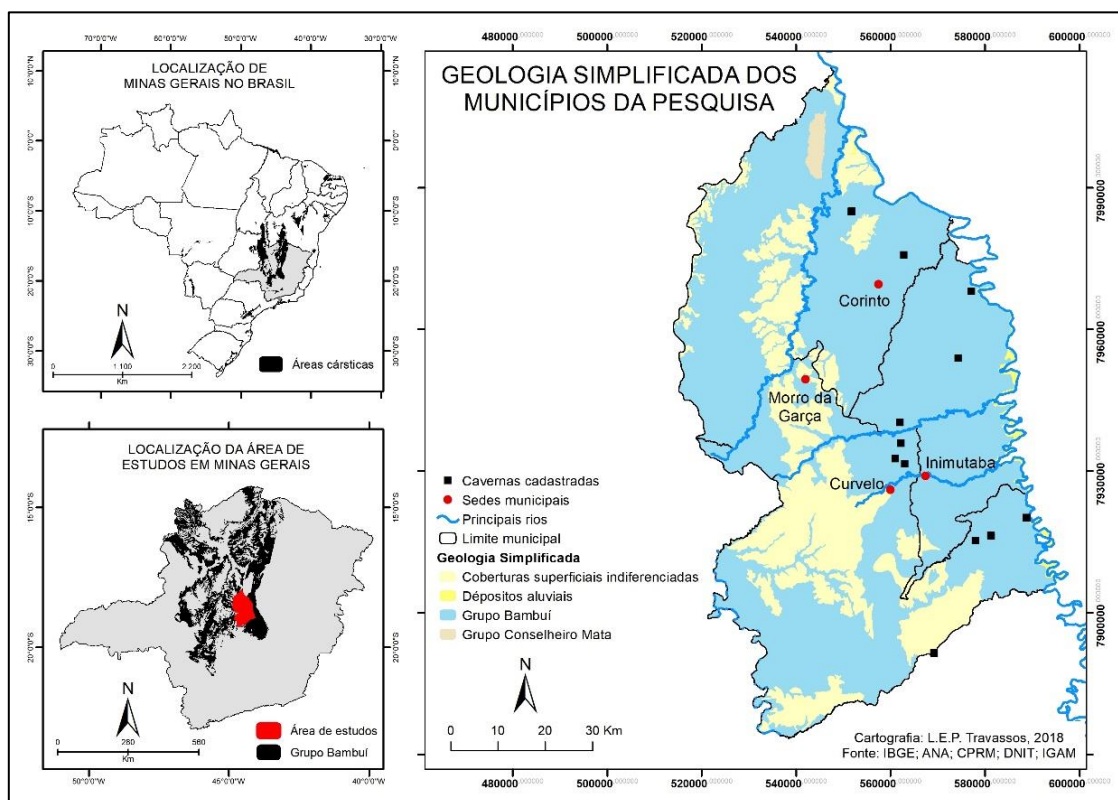


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A região possui um clima tropical savânico (Aw) segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, caracterizado por estações bem definidas, com uma estação chuvosa no verão e uma estação seca no inverno (ALVARES *et al.*, 2013).

Geologicamente, a área em estudo está inserida na unidade estrutural do Cráton do São Francisco de idade arqueana, regionalmente encoberto por rochas sedimentares pelíticas e carbonáticas do Grupo Bambuí, datadas do Proterozoico Superior (CPRM, 2020). Essa região está inserida na unidade geomorfológica denominada “Depressão Sanfranciscana”, caracterizada pela presença de planaltos residuais e morros isolados, que são testemunhos da antiga superfície aplainada que cobria a região. Um exemplo notável é o Morro da Garça, um morro residual que se destaca na paisagem local.

Os solos da região são geralmente ácidos e pobres em nutrientes, sendo comuns solos do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo e Cambissolos (IDE-SISEMA, 2023). As formações de rochas carbonáticas, como os calcários encobertos do Grupo Bambuí, desempenham um papel fundamental na configuração do relevo e na formação de sistemas cársticos com características de relevo, hidrologia e ecologia específicas, decorrentes da dissolução e alteração química das rochas carbonáticas (RODRIGUES; TRAVASSOS, 2013).

A presença de rochas calcárias na área contribui para a diversidade de formas de relevo e cria habitats distintos para a flora e fauna típicas do Bioma do Cerrado, como as fitofisionomias associadas aos carbonatos, como a Floresta Estacional Decidual (RODRIGUES; TRAVASSOS, 2013). No decorrer do processo de ocupação da região central de Minas Gerais, houve intensa atividade carvoeira, sendo ela, em termos gerais, a grande responsável pela substituição do Cerrado mais típico, denso e rico, por uma vegetação mais esparsa distribuída por um extrato de gramíneas (EMATER, 2005).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As imagens de sensoriamento remoto, adquiridas por meio de plataformas orbitais que cobrem repetidamente a superfície terrestre, fornecem uma perspectiva única para o estudo e monitoramento de fenômenos naturais e dinâmicas ambientais. Essas imagens permitem a identificação geográfica e a quantificação de áreas de cobertura florestal, uso e ocupação do solo de maneira eficiente e precisa (FLORENZANO, 2007).

Para iniciar a pesquisa, informações da área de estudo foram coletadas utilizando imagens de satélites Landsat 5 e 8, equipados com os sensores Thematic Mapper (TM) e Operational Land Imager (OLI), respectivamente. Esses sensores proporcionam imagens com resolução espacial de 30 metros, permitindo uma análise detalhada das características ambientais e a detecção de mudanças na paisagem ao longo do tempo.

A análise espaço-temporal envolveu a criação de uma série histórica de dados, incluindo imagens selecionadas dos anos de 1996, 2006 e 2016 (órbita-ponto 218-73 e 219-72), durante o período de inverno. Essas imagens foram adquiridas gratuitamente por meio do catálogo Earth Explorer.

A avaliação das imagens de sensoriamento remoto utilizou principalmente o Landsat 8, que possui uma resolução espacial de 30 metros. O processo englobou várias etapas, como a composição multiespectral com as bandas 4 (vermelho), 5 (infravermelho próximo) e 6 (infravermelho médio). A composição falsa cor foi aplicada para destacar as características ambientais relevantes e facilitar a interpretação visual das imagens.

A fim de aprimorar a qualidade das imagens e reduzir distorções causadas por fatores atmosféricos, foram empregadas técnicas de correção atmosférica e equalizações. Dentre os fatores que impactam a qualidade das imagens orbitais, estão a presença de poeira e aerossóis na atmosfera, variações na iluminação solar, diferenças na altitude da superfície terrestre e a presença de nuvens. Essas variáveis podem afetar a qualidade e a precisão das informações obtidas a partir das imagens

de sensoriamento remoto, tornando necessário o uso de correções atmosféricas e equalizações para garantir resultados mais confiáveis e precisos.

A correção atmosférica é fundamental para lidar com os efeitos da atmosfera na radiação solar incidente e refletida pela superfície terrestre. A absorção e espalhamento da radiação solar pelos gases e partículas presentes na atmosfera, como vapor d'água, ozônio e aerossóis, podem causar distorções nas informações espectrais das imagens (CHAVEZ, 1988). Essas distorções podem levar a interpretações incorretas das características e condições ambientais, como o tipo e a saúde da vegetação, a umidade do solo e a presença de poluentes. Portanto, a correção atmosférica é crucial para melhorar a acurácia e a comparabilidade das imagens de sensoriamento remoto ao longo do tempo e entre diferentes sensores (SONG *et al.*, 2001).

Neste estudo foi aplicado o método empírico de correção atmosférica Dark Object Subtraction (DOS) desenvolvido por Chavez (1988). O princípio do método DOS baseia-se na identificação e subtração de objetos escuros nas imagens. Objetos escuros são áreas com mínima reflexão, ou seja, com valores muito baixos de radiância, e por isso, são considerados como áreas com máxima absorção atmosférica. Esses objetos podem incluir corpos d'água profundos, áreas de vegetação densa ou áreas de sombreamento. A ideia central é que, uma vez identificados, esses objetos escuros podem ser usados como uma referência para estimar a quantidade de absorção e espalhamento atmosférico presente na imagem.

Após a identificação dos objetos escuros, o método DOS subtrai os valores de radiância desses objetos de todas as bandas espectrais da imagem. Essa subtração visa remover o efeito da absorção atmosférica e criar uma imagem corrigida, com valores de radiância mais próximos aos valores reais da superfície terrestre. Dessa forma, a imagem corrigida apresenta informações espectrais mais precisas, permitindo uma melhor análise e interpretação das características e condições ambientais presentes na área de estudo.

A equalização, por outro lado, é necessária para melhorar a qualidade visual das imagens e facilitar a identificação e análise de padrões e características ambientais. A equalização ajusta o contraste e o brilho das bandas espectrais, proporcionando uma melhor distinção entre os objetos e recursos presentes na imagem. Isso pode ser particularmente útil quando se trabalha com imagens adquiridas em diferentes condições de iluminação ou por diferentes sensores, auxiliando na análise comparativa dessas imagens (JENSEN, 2007).

A Figura 2 mostra exemplo das técnicas de correção e equalização utilizadas nas imagens. As áreas consistentes com as características do cultivo de eucalipto foram identificadas e se destacam em verde.

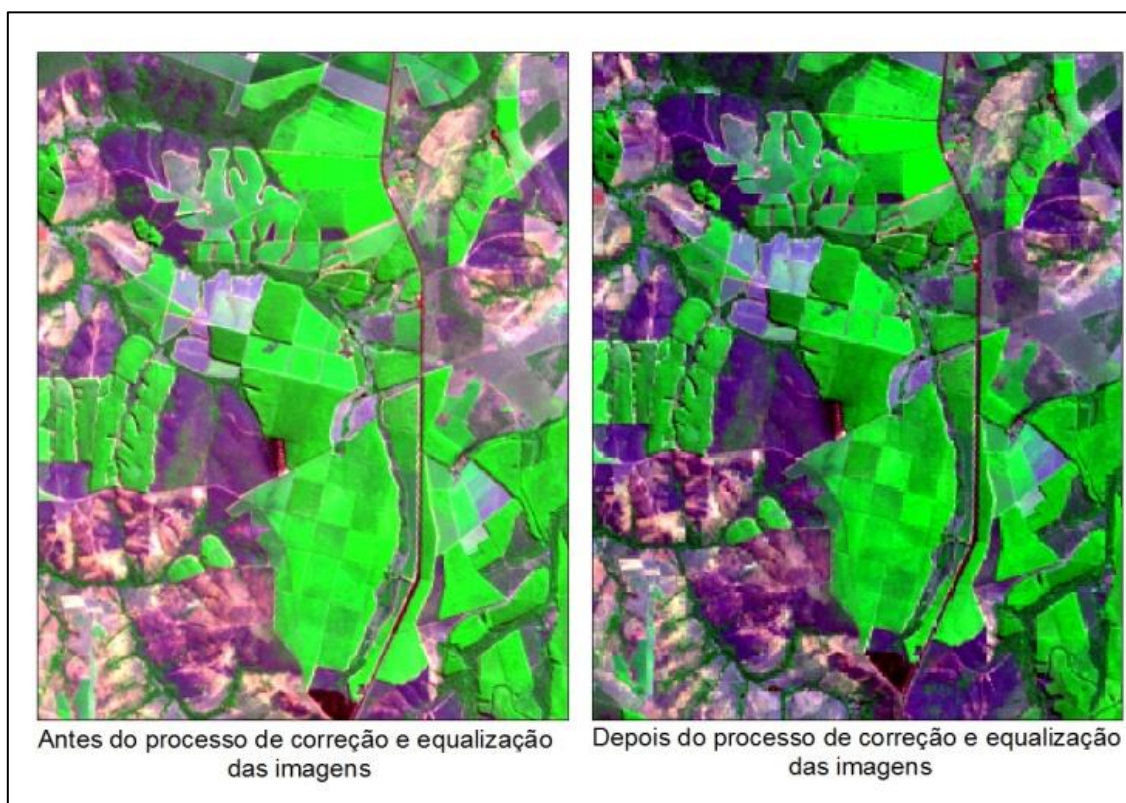


Figura 2 - Processo de correção e equalização para visualização dos atributos com base na chave de interpretação das composições de bandas conforme Moreira (2005).

As chaves de interpretação visual em sensoriamento remoto são conjuntos de critérios e diretrizes utilizados para analisar e identificar elementos ou características específicas presentes nas imagens adquiridas por sensores remotos.

Adicionalmente, as imagens foram reprojetaadas para um sistema de coordenadas apropriado à área de estudo, uma vez que as imagens fornecidas pelo Earth Explorer são formatadas seguindo as características da região Norte do globo. A reprojeção garante que as imagens sejam compatíveis com outros dados geoespaciais e cartográficos utilizados na análise.

Essas chaves de interpretação baseiam-se em características visuais das imagens, como tonalidade, textura, forma, tamanho, padrão e associação, que podem ser úteis para diferenciar objetos e fenômenos presentes na paisagem. Elas auxiliam os analistas a identificar e classificar alvos específicos, como áreas de cultivo de eucalipto, ao examinar as composições de bandas das imagens.

No caso do estudo mencionado, a chave de interpretação proposta por Moreira (2005) foi aplicada para analisar as composições de bandas das imagens dos satélites Landsat. Essa abordagem permitiu a identificação de áreas consistentes com as características do cultivo de eucalipto, o que possibilitou o monitoramento e a análise dessas áreas ao longo do tempo. A Tabela 1 apresenta as chaves de interpretação utilizadas.

Tabela 1: Procedimento utilizado no mapeamento.

CHAVE DE INTERPRETAÇÃO				
Classe	Cor	Textura	Forma	Tamanho
Cultivo de Eucalipto	Verde Escuro/Claro	Rugosa	Geométrica	Médio/Grande

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para complementar a análise, foi empregado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (ROUSE *et al.*, 1973), uma técnica amplamente utilizada em estudos de sensoriamento remoto para estimar a densidade e vigor da vegetação (Figura 3). O NDVI é calculado a partir das reflectâncias nas bandas do vermelho (RED) e do infravermelho próximo (NIR), obtidas por meio de imagens de satélite, segundo a seguinte equação:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

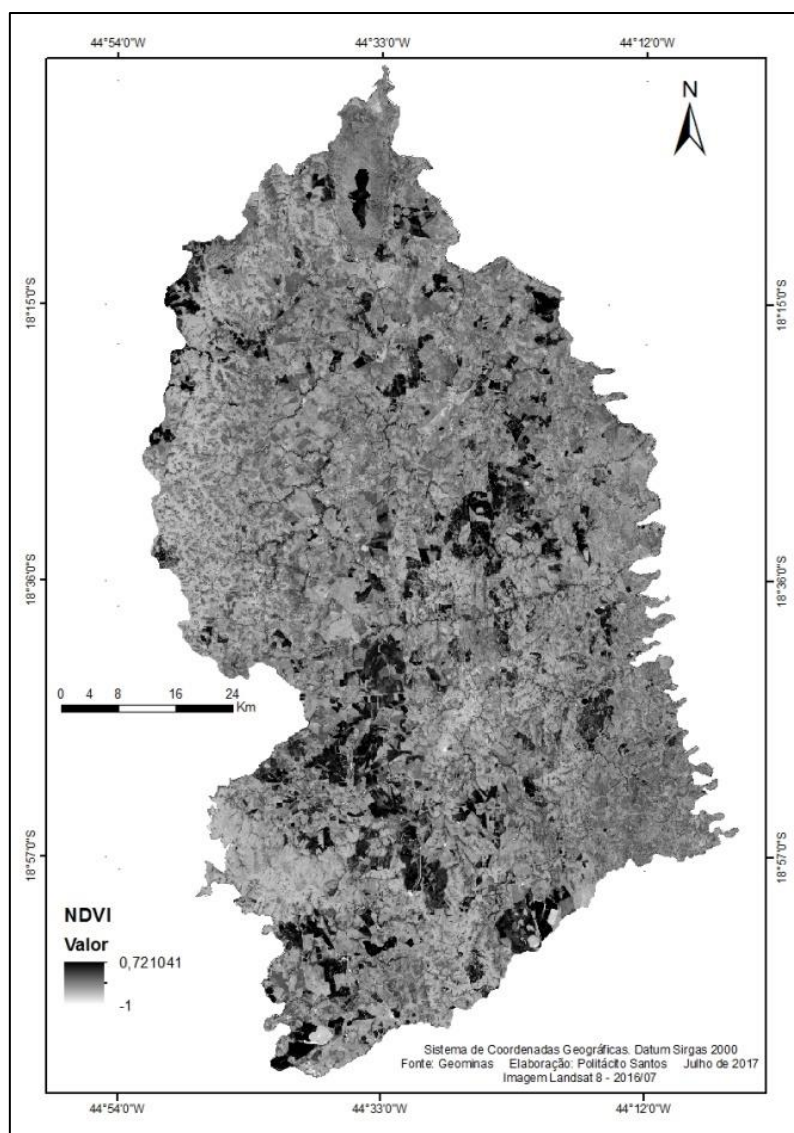


Figura 3 – NDVI da área de estudo.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Este índice foi aplicado nos três períodos propostos na pesquisa, gerando valores que variam de -1 a $+1$. Valores próximos a $+1$ indicam maior presença de clorofila e, conseqüentemente, maior densidade de vegetação, enquanto valores próximos a -1 sugerem a ausência de vegetação ou presença de materiais não vegetativos, como água, solo exposto ou construções (MOTTA *et al.*, 2003). O NDVI, portanto, auxilia na identificação e mapeamento do cultivo de eucalipto na área de estudo, fornecendo informações detalhadas sobre a distribuição e a dinâmica da vegetação.

A análise comparativa do NDVI em diferentes coberturas de superfície, como silvicultura de eucalipto, mata ciliar, mata seca, pastagem, solo exposto e cerrado, durante a estação chuvosa e a estação seca, ajuda a entender como esses ecossistemas respondem a variações sazonais (Figura 4), que serão individualizados a seguir:

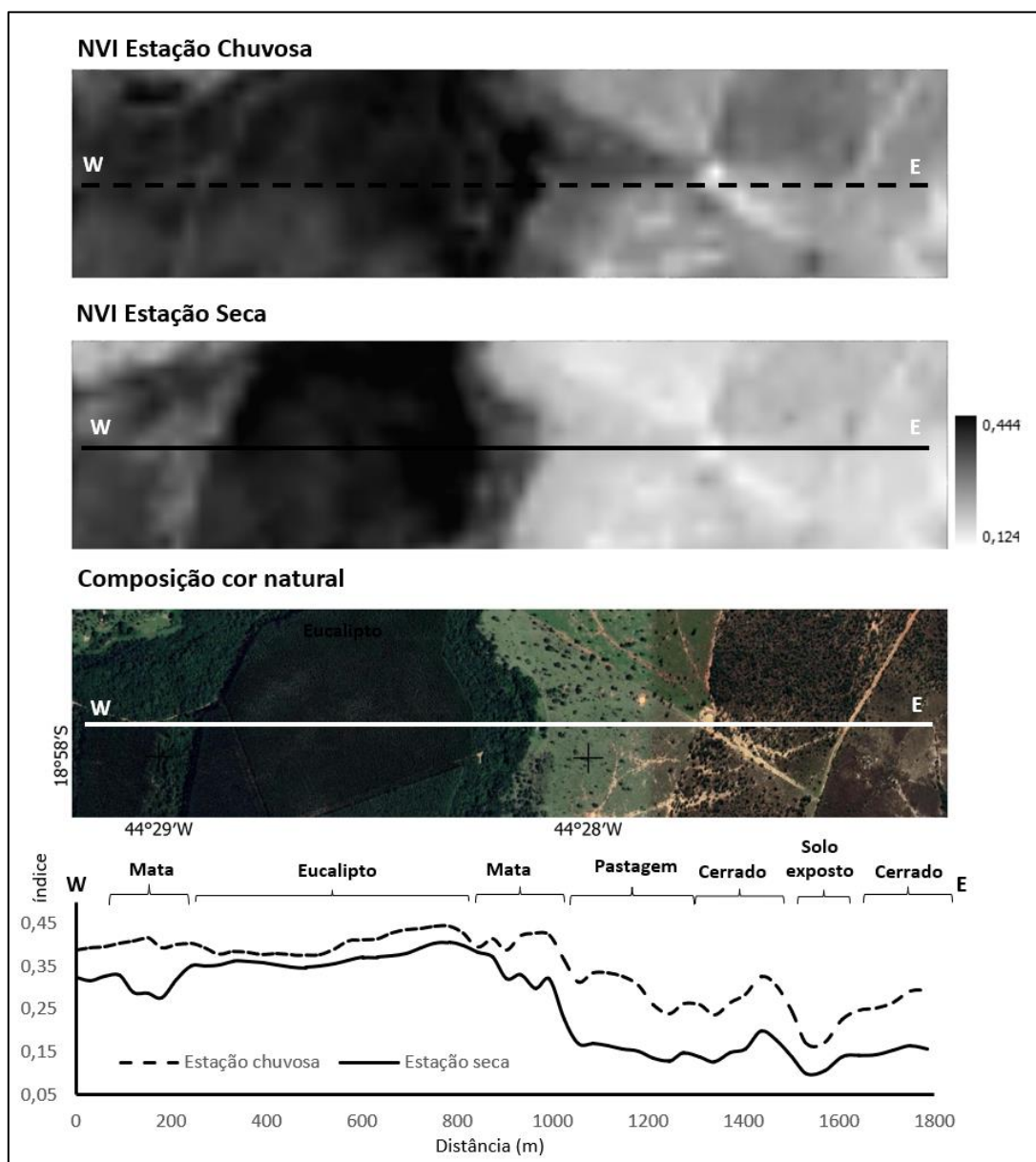


Figura 4 – A análise comparativa do NDVI em diferentes coberturas de superfície.

Fonte: Elaborado pelos autores.

- **Silvicultura de Eucalipto:** Eucaliptos são plantas de rápido crescimento e adaptadas a ambientes secos. Durante a estação chuvosa, o NDVI da silvicultura de eucalipto tendeu a ser alto (0,65 a 0,80) devido ao crescimento ativo e à alta densidade de árvores. Na estação seca, o NDVI diminuiu um pouco, mas ainda se manteve relativamente alto (0,55 a 0,70) devido à sua capacidade de conservar água e continuar o crescimento (GRAÇA *et al.*, 2013; GOERGEN *et al.*, 2016).

- **Mata ciliar:** Durante a estação chuvosa, o NDVI da mata ciliar ficou alto (0,70 a 0,85), refletindo a densidade e a saúde da vegetação. Isso ocorre devido à maior disponibilidade de água e às condições favoráveis para o crescimento das plantas. Na estação seca, o NDVI diminuiu (0,60 a 0,75), mas ainda se manteve relativamente alto em comparação com outros ecossistemas. Isso se deve à proximidade com os corpos d'água, que fornecem umidade constante para a vegetação e ajudam a manter a densidade da cobertura vegetal.

- **A Floresta Estacional Decidual,** também conhecida como mata seca, apresenta uma cobertura vegetal composta por espécies que perdem as folhas durante a estação seca. A presença de afloramentos de calcário pode influenciar a vegetação local e alterar os valores de NDVI. O NDVI da Floresta Estacional Decidual variou entre (0,45 e 0,65) durante a estação chuvosa, quando a vegetação estava em pleno crescimento e a cobertura foliar era densa. Durante a estação seca, o NDVI diminuiu significativamente (0,20 a 0,35), devido à perda de folhas das árvores e à menor disponibilidade de água.

- **Pastagens:** Apresentaram valores de NDVI mais baixos em comparação com a silvicultura de eucalipto. Durante a estação chuvosa, o NDVI variou entre (0,35 e 0,50) dependendo do tipo de gramíneas e da densidade (SANCHES *et al.*, 2014). Na estação seca, o NDVI pode diminuir consideravelmente (0,20 a 0,30), devido à dormência das plantas e à menor disponibilidade de água (SANO *et al.*, 2000).

- **Solo exposto:** Possui um NDVI extremamente baixo, geralmente variando entre (-0,10 e 0,10). Não há diferenças significativas entre as estações seca e chuvosa, pois não há vegetação para responder às mudanças na disponibilidade de água (CARLSON; RIPLEY, 1997; GUILHERME *et al.*, 2020).

- **Cerrado:** É um bioma caracterizado por uma mistura de árvores, arbustos e gramíneas. Durante a estação chuvosa, o NDVI do Cerrado variou entre (0,40 e 0,60) dependendo da densidade da vegetação (RIBEIRO *et al.*, 2015). Na estação seca, o NDVI do Cerrado diminuiu (0,20 a 0,35), já que muitas plantas entraram em dormência para conservar água (DURIGAN *et al.*, 2013).

Em comparação, as matas ciliares apresentaram NDVI semelhante ou superior ao da silvicultura de eucalipto e do Cerrado durante as estações chuvosas, indicando uma vegetação mais densa e

saudável. No entanto, é importante lembrar que as variações no NDVI podem depender de fatores locais, como o tipo de solo, e as perturbações humanas ou naturais.

Na região em estudo, a separação das áreas de plantio de eucalipto mostrou-se mais eficiente no período de seca. Conforme pode ser observado no gráfico ao longo de um transecto, durante o período chuvoso, os índices da mata ciliar e eucalipto estão bem próximos. Durante a estação seca, as plantações de eucalipto apresentaram uma resposta maior que os alvos solo exposto, cerrado e pastagem, permitindo uma melhor separação.

A mata ciliar apresentou uma pequena confusão com as áreas de plantio de eucalipto. Como na região, as matas estão associadas aos cursos de água, optou-se por utilizar uma máscara compreendendo a faixa de APP (Área de Preservação Permanente) marginal.

Assim, a aplicação dessa máscara nas áreas de mata ciliar auxiliou na distinção entre essas áreas e as áreas de plantio de eucalipto, melhorando a precisão do mapeamento e a interpretação dos resultados obtidos. Visitas de campo ocorreram nos meses de junho e julho de 2017 em áreas relevantes para a obtenção de dados temporais e para auxiliar na identificação das áreas de plantio e validação do mapeamento.

O índice Kappa é uma medida estatística que avalia a precisão e concordância entre dois conjuntos de dados, no caso do estudo em questão, a concordância entre os resultados obtidos com o NDVI e os dados de referência obtidos nas vistas de campo. O índice Kappa varia de 0 a 1, sendo 0 indicativo de concordância aleatória e 1 representando concordância perfeita entre os conjuntos de dados (COHEN, 1960).

Foi obtido um índice Kappa de 0,92 nos resultados, indicando uma alta concordância entre os dados gerados pelo NDVI e os dados de referência obtidos em campo. Isso sugere que o NDVI foi eficaz na identificação e mapeamento das áreas de plantação de eucalipto, fornecendo resultados confiáveis e precisos. Um Kappa de 0,92 é considerado como "quase perfeito" conforme a escala de interpretação proposta por Landis e Koch (1977), que classifica os valores de Kappa em categorias, variando de "pobre" a "quase perfeito".

Os programas ArcGIS e QGIS foram utilizados para integrar e analisar os dados obtidos em campo e das imagens de satélite, bem como para tratar e produzir materiais cartográficos. A Figura 5 apresenta de forma sintética as etapas do trabalho.

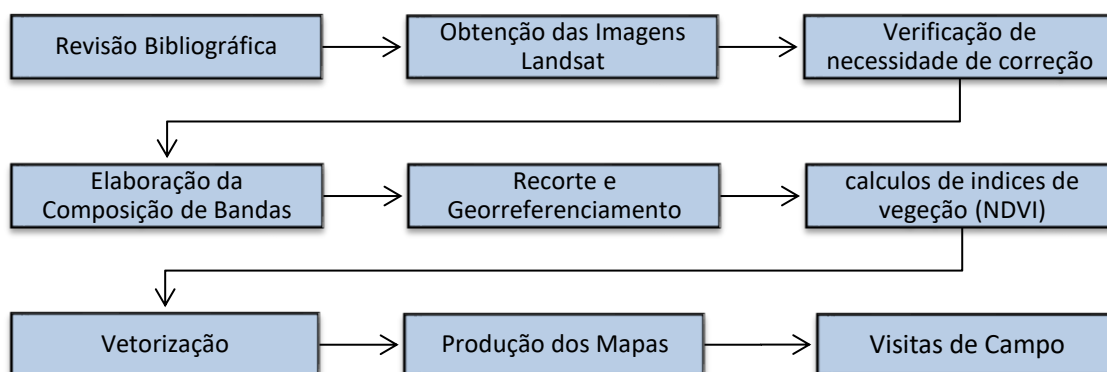


Figura 5 - Procedimentos empregados na obtenção de dados.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante os procedimentos metodológicos, foi possível identificar a distribuição espacial do eucalipto na área de estudo, bem como sua dinâmica temporal ao longo de 1996, 2006, 2016 e 2023 (Figura 6). A Tabela 2 apresenta o percentual do uso do solo destinado ao eucalipto na área total de cada município. Nos quatro municípios em estudo, Curvelo, Morro da Garça, Corinto e Inimutaba, a área plantada de eucalipto variou ao longo dos anos de 1996, 2006, 2016 e 2023.

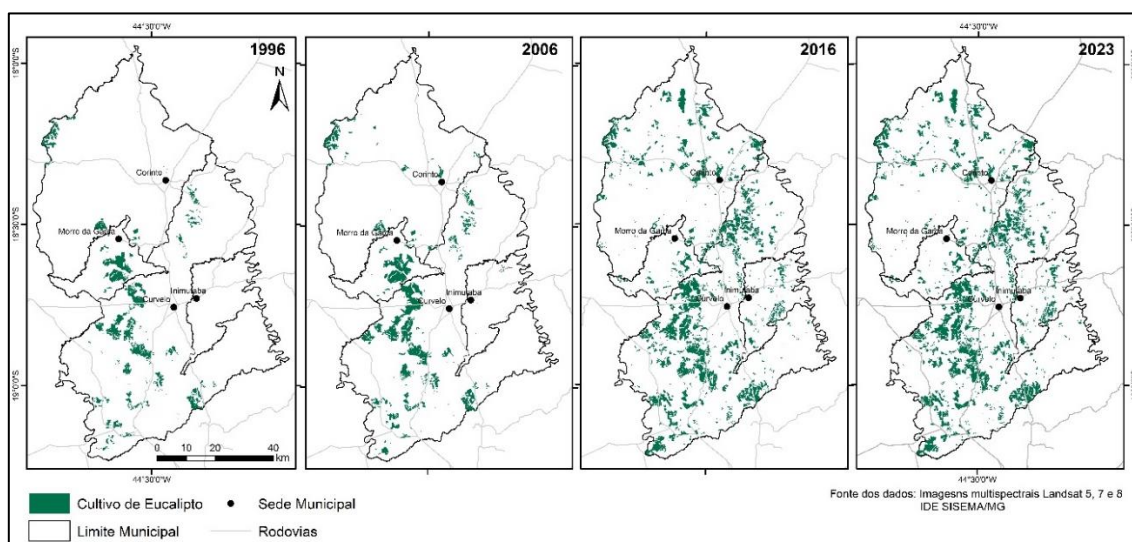


Figura 6 - Dinâmica tempo-espacial do cultivo de Eucalipto na área de estudo.

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

Tabela 2: Área plantada de Eucalipto no período analisado.

MUNICÍPIO	ÁREA PLANTADA EM HECTARES				Área Municipal em hectares	% área plantada em 2023
	1996	2006	2016	2023		
Curvelo	22.144	25.021	45.380	48.951	328.643	14,90
Morro da Garça	4.539	5.881	2.410	2.416	41.290	5,85
Corinto	3.368	8.482	17.653	19.928	252.002	7,90
Inimutaba	350	260	3.376	3.855	53.389	7,22
TOTAL	30.401	39.644	68.819	75.150	675.324	11,13

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

No período de 1996 a 2023, esses quatro municípios testemunharam mudanças significativas na área de cultivo de eucalipto. A área total de cultivo de eucalipto na região passou de 30.401 hectares em 1996 para 74.150 hectares em 2023, representando um aumento de aproximadamente 144% como pode ser observado na Figura 7. Já a a Figura 8 ilustra a evolução temporal do cultivo de eucalipto nos municípios que compõem a área de estudo.

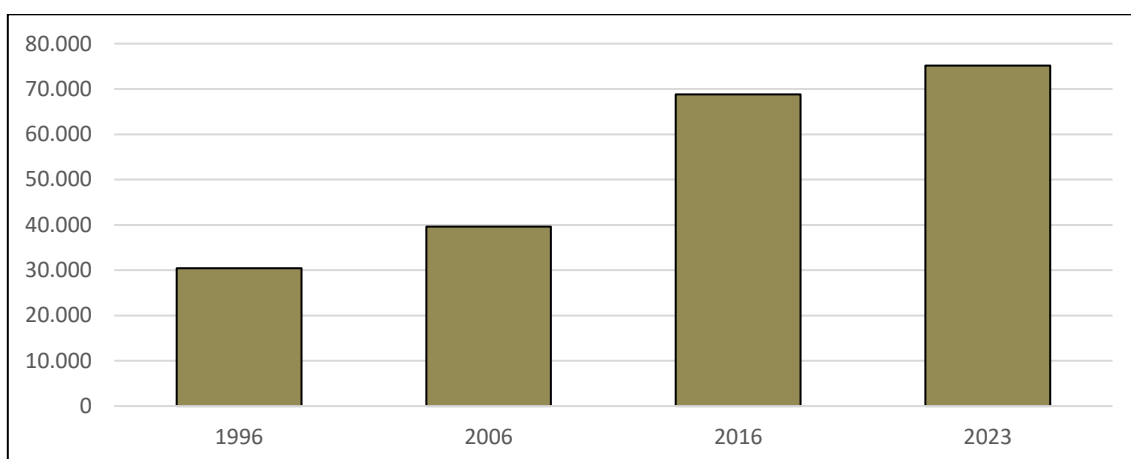


Figura 7 - Área total do cultivo de eucalipto nos períodos analisados.

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

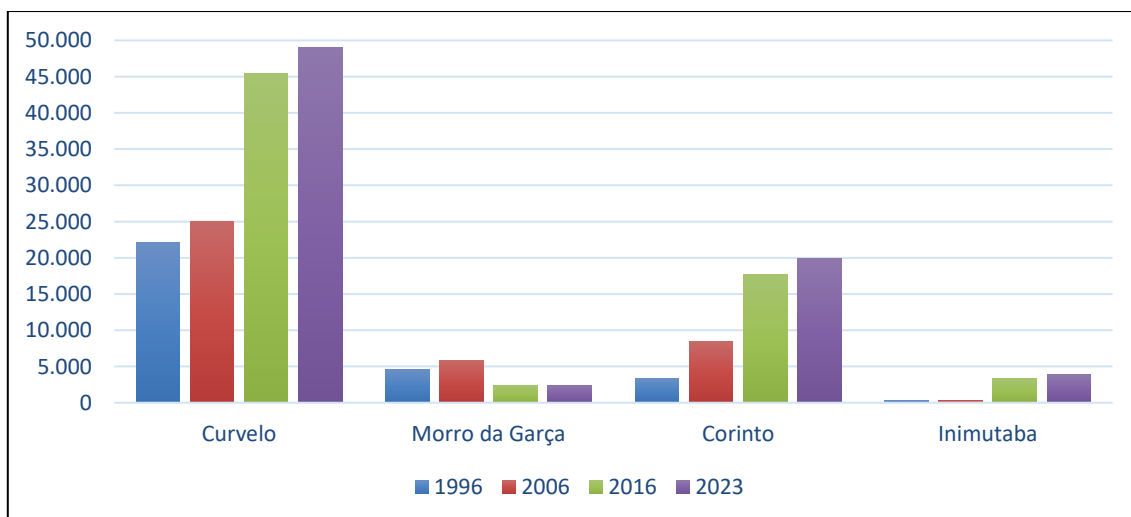


Figura 8 - Dados quantitativos da dinâmica temporal do cultivo de eucalipto.

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

É importante destacar que houve uma redução no plantio de eucalipto no município de Morro da Garça, que diminuiu de 5.881 hectares em 2006 para 2.416 hectares em 2023. Essa redução pode ser atribuída, na maioria, à conversão de algumas áreas de cultivo de eucalipto em pastagens para pecuária de corte, realizada pela Companhia Setelagoana de Siderurgia (COSSISA), empresa detentora dos terrenos na região.

Por outro lado, nos municípios de Corinto e Inimutaba, observou-se um aumento expressivo da área de cultivo de eucalipto, especialmente em áreas de topos aplainados, que são locais favoráveis para a recarga do lençol freático. Em Inimutaba, o aumento foi especialmente significativo, visto que em 2006 a área de cultivo representava 260 hectares, enquanto em 2023 alcançou 3.855 hectares, correspondendo a aproximadamente 7% do território municipal. Essa expansão do cultivo de eucalipto pode ter implicações importantes para a gestão dos recursos hídricos e a preservação dos sistemas cársticos na região.

Os municípios de Curvelo, Morro da Garça, Corinto e Inimutaba testemunharam mudanças significativas na área de cultivo de eucalipto ao longo das décadas, com um aumento expressivo na área total de cultivo. No entanto, essas mudanças variaram consideravelmente entre os municípios, com Morro da Garça experimentando uma redução na área plantada de eucalipto durante o período analisado. Por outro lado, no município de Curvelo, a área cultivada já abrange quase 15% de seu território. Essa dinâmica no cultivo de eucalipto possui implicações significativas para a região em relação ao uso da terra e à gestão dos recursos naturais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta análise, empregaram-se procedimentos como a interpretação visual e o manuseio dos dados, possibilitando a compreensão da dinâmica temporal e espacial do cultivo do eucalipto. A pesquisa identificou um aumento expressivo na plantação de eucalipto na área de estudo, com destaque para os municípios de Inimutaba e Curvelo.

A importância do sensoriamento remoto, incluindo a utilização de imagens de satélites e índices como o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), é inquestionável para este tipo de análise. Tais ferramentas facilitam o monitoramento contínuo do cultivo em termos temporais e espaciais, fornecendo uma visão abrangente das mudanças na paisagem.

As imagens de satélite e o NDVI foram especialmente úteis, pois permitiram identificar e quantificar áreas com vegetação vigorosa, facilitando a detecção de cultivos como o eucalipto. A utilização do sensoriamento remoto reforça a capacidade de análise e monitoramento da área de estudo, contribuindo significativamente para o planejamento e gestão sustentável dos recursos naturais.

Há uma necessidade de intensificar os estudos na área, incorporando análises temporais e espaciais adicionais para compreender a evolução e as implicações do plantio de eucalipto na região. Estudos futuros poderão investigar os impactos gerados pela expansão do eucalipto, especialmente no que se refere ao carste e à gestão de recursos hídricos.

As rochas carbonáticas, como o calcário, com presença marcante na região, têm grande relevância para a gestão dos recursos hídricos, pois são responsáveis pelo armazenamento e recarga de aquíferos. O avanço das plantações de eucalipto sobre terrenos de rochas carbonáticas pode levar a consequências ambientais e socioeconômicas, como maior pressão sobre os recursos hídricos locais e alterações no balanço hídrico das áreas de carste.

Portanto, é fundamental que estudos futuros sejam realizados para compreender melhor os impactos do avanço das plantações de eucalipto sobre terrenos de rochas carbonáticas e o efeito dessas mudanças na dinâmica dos recursos hídricos e nos ecossistemas locais. O uso de ferramentas como o sensoriamento remoto e o NDVI pode auxiliar na identificação e monitoramento dessas áreas, fornecendo informações valiosas para a tomada de decisões e a gestão sustentável dos recursos naturais.

A colaboração entre pesquisadores, gestores públicos e comunidades locais é essencial para identificar soluções sustentáveis e práticas de manejo adequadas que possam minimizar os impactos negativos das plantações de eucalipto sobre terrenos de rochas carbonáticas. A implementação de políticas públicas e ações específicas que levem em consideração os riscos associados ao cultivo do eucalipto nesses terrenos é crucial para a preservação dos recursos hídricos e a manutenção da biodiversidade local.

Em resumo, a análise da dinâmica temporal e espacial do cultivo do eucalipto, com o apoio de ferramentas de sensoriamento remoto e índices como o NDVI, destaca a importância de compreender e monitorar as implicações do avanço dessas plantações sobre terrenos de rochas carbonáticas. Os estudos futuros devem aprofundar essa compreensão e fornecer subsídios para políticas públicas e práticas de manejo sustentável, visando garantir a proteção dos recursos hídricos, a conservação da biodiversidade e o bem-estar das comunidades locais.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- CARLSON, T.; RIPLEY, D. A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, p. 241-252, 1997.

CASTRO, C. A. D. O. *et al.* Brief history of Eucalyptus breeding in Brazil under perspective of biometric advances. **Ciência Rural**, v. 46, p.1585-1593, 2016.

CHAVEZ, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, n. 3, p. 459-479, 1988.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, 1960.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO. **Mapa geológico do estado de Minas Gerais**. Brasília: CPRM, 2020. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/21828>. Acesso em: 15 mar. 2021.

CUNHA, T. Q. G. *et al.* **Eucalyptus expansion in Brazil**: Energy yield in new forest frontiers. **Biomass and Bioenergy**, v. 144, 2021.

CVIJIC, J. **Carste**: Uma monografia geográfica (1895). Belo Horizonte: PUC Minas, 2017. Disponível em: <https://www.spelayonconsultoria.com>. Acesso em: 10 fev. 2019.

DURIGAN, G.; GUERIN, N.; COSTA, J. N. M. N. da. Ecological restoration of Xingu Basin headwaters: motivations, engagement, challenges and perspectives. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 368, n. 1619, p. 1-9, 2013.

EMATER - EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Projeto de Recuperação e Manejo da Sub-Bacia do Córrego Santa Maria**, 2005. 47p.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação ao Sensoriamento Remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 100p.

FOELKEL, C. E. Eucalipto no Brasil: História de Pioneirismo. **Visão Agrícola**, n. 4, p.1-4, 2005.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. **Karst geomorphology and hydrology**. London: Unwin Hyman, 2007. 561p.

GUILHERME, A. P. *et al.* Relação entre tipo de cobertura do solo e temperatura de superfície. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 515-525, 2022.

GOERGEN, L. C. D. G. *et al.* Distinção de espécies de eucaliptode diferentes idades por meio de imagens TM/Landsat 5. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 1, p. 53-60, 2016.

IBA - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual**. 2016. Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf. Acesso em: 25 abr. 2018.

IBGE - Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais. **Estimativas da população residente com data de referência 1º de julho de 2017**. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 28 mai. 2018.

IDE-SISEMA. INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS. **Licenças ambientais emitidas pelo Sistema de Licenciamento Ambiental da Semad**. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2023. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 6 fev. 2023.

JACINTHO, L. R. C. **Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto como ferramentas a gestão ambiental de unidades de conservação**: O caso da área de proteção ambiental (APA) do Capivari-Monos, São Paulo-SP. 2003. 121 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

JENNINGS, J. N. **Karst geomorphology**. New York: Basil Blackwell, 1985. 293p.

JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective**. 2. ed. NJ: Pearson Prentice Hall, 2007. 602p.

KNEZ, M.; OTONIČAR, B.; SLABE, T. Subcutaneous stone forest (Trebnje, central Slovenia). **Acta Carstologica**, v. 32, n. 1, p. 29-38, 2003.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

LIMA, W. P. **Impacto ambiental do eucalipto**. 2. ed. São Paulo: EdUSP, 1996. 301p.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005. 422p.

MOTTA, J. L. G. *et al.* Evolução temporal do NDVI/NOAA em áreas cobertas por pixels com proporções variáveis de soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 2, p. 353-360, 2003.

NICOD, J. Corrosion du type crypto-karstique dans les karsts Méditerranéens. In: GAMS, I. (Ed.). **Karst processes and relevant landforms**. Ljubljana: Ljubljana University. 1976. p.171-180.

REZENDE, J. B.; PEREIRA, J. R.; BOTE-LHO, D. de O. Expansão da cultura do eucalipto nos municípios mineiros e gestão territorial. **CERNE**, v.19, n. 1, p. 1-7, 2013.

RIBEIRO, E. M. *et al.* Chronic anthropogenic disturbance drives the biological impoverishment of the Brazilian Caatinga vegetation. **Journal of Applied Ecology**, v. 52, n. 3, p. 611-620, 2015.

RODRIGUES, B. D.; TRAVASSOS, L. E. P. Identificação e mapeamento das Matas Secas associadas ao carste carbonático de Santo Hipólito e Monjolos, Minas Gerais. **Mercator**, v. 12, p. 233-256, 2013.

ROUSE, J. W. *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **NASA Spec. Publ.**, v. 35, n. 1, p. 309-317, 1973.

SALOMON, J. N.; POMEL, S.; NICOD, J. L'évolution des cryptokarsts: comparaison entre le Périgord-Quercy (France) et le Franken Alb (Allemagne). **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 39, n. 4, p. 381-409, 1995.

SANCHES, I. D. A.; SOUZA FILHO, C. R.; KOKALY, R. F. Spectroscopic remote sensing of plant stress at leaf and canopy levels using the chlorophyll 680 nm absorption feature with continuum removal. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 97, p. 111-122, 2014.

SANO, E. E. *et al.* Identificação dos principais tipo de pastagens cultivadas do Cerrado a partir de Sensoriamento Remoto. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM: SOIL FUNCTIONING UNDER

PASTURES IN INTERTROPICAL AREAS, 1, 2000, Brasilia. **Anais...** Brasília: Embrapa Cerrados, 2000.

SONG, C. *et al.* Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? **Remote Sensing of Environment**, v. 75, n. 2, p. 230-244, 2001.

TRAVASSOS, L. E. P. **Princípios de carstologia e geomorfologia cárstica**. Brasília: ICMBio, 2019. 246p.

TRAVASSOS, L. E. P.; RODRIGUES, B. D.; TIMO, M. B. **Glossário conciso e ilustrado de termos cársticos e espeleológicos**. Belo Horizonte: PUC Minas, 2015. 65p.

VERESS, M. **Covered karsts**. Springer Geology, 2016. 536p.