

Estudos Geográficos

Revista Eletrônica de Geografia

Comparação entre mapeamentos sobre o uso e cobertura da silvicultura de eucalipto no semiárido mineiro

Marcos Esdras Leite ¹  

Jefferson William Lopes Almeida²  

Luiz Henrique Arimura Figueiredo ³  

Resumo: O semiárido mineiro é uma região estratégica para o planejamento dos recursos naturais, especialmente diante da intensificação das atividades antrópicas, como a expansão da silvicultura. Minas Gerais, estado que lidera a produção de silvicultura no Brasil, apresenta crescimento expressivo dessa atividade, especialmente nas Regiões Geográficas Intermediárias de Montes Claros e Teófilo Otoni. Este estudo teve como objetivo mapear as áreas de cultivo de eucalipto no semiárido mineiro, incluindo as chamadas “áreas de preparo”, correspondentes a fases de colheita, regeneração ou início do plantio. Utilizou-se a vetorização manual, dado que plataformas como o MapBiomass não identificam integralmente essas áreas. Os dados foram comparados à Coleção 8 do MapBiomass (2022) e à PEVS/IBGE (2021), constatando-se um acréscimo de 24,3% em relação à PEVS e de 46% em comparação ao MapBiomass. Os resultados evidenciam subestimações nas bases oficiais e indicam a necessidade de aprimorar os métodos de monitoramento em áreas ambientalmente sensíveis.

Palavras-chave: Semiárido mineiro; Silvicultura; Fotointerpretação; MapBiomass; Monitoramento ambiental.

¹ Professor do Departamento de Geociências Universidade Estadual de Montes Claros-UNIMONTES.

² Doutorando em Desenvolvimento Social (PPGDS - UNIMONTES).

³ Professor do Departamento de Geociências Universidade Estadual de Montes Claros-UNIMONTES.



Este artigo está licenciado com uma licença Creative Commons

COMPARISON OF MAPPING ON THE USE AND COVERAGE OF EUCALYPTUS SILVICULTURE IN THE SEMI-ARID REGION OF MINAS GERAIS

Abstract: The semi-arid region of Minas Gerais is a strategic area for natural resource planning, especially given the intensification of anthropogenic activities, such as the expansion of forestry. Minas Gerais, the leading state in forestry production in Brazil, has shown significant growth in this activity, especially in the Intermediate Geographical Regions of Montes Claros and Teófilo Otoni. This study aimed to map eucalyptus cultivation areas in the semi-arid region of Minas Gerais, including the so-called "preparation areas," which correspond to harvesting, regeneration, or early planting phases. Manual vectorization was applied, as automated platforms such as MapBiomas do not fully capture these areas. The mapped data were compared with MapBiomas Collection 8 (2022) and PEVS/IBGE (2021), revealing an increase of 24.3% over PEVS and 46% over MapBiomas. The results highlight underestimations in official databases and underscore the need to improve monitoring methods in environmentally sensitive areas.

Keywords: Minas Gerais semi-arid region; Forestry; Photointerpretation; MapBiomas; Environmental monitoring.

COMPARACIÓN ENTRE MAPAS SOBRE EL USO Y LA COBERTURA DE LA SILVICULTURA DE EUCALIPTO EN EL SEMIÁRIDO DE MINAS GERAIS

Resumen: La región semiárida de Minas Gerais es una región estratégica para la planificación de los recursos naturales, especialmente dada la intensificación de las actividades antropogénicas, como la expansión de la silvicultura. Minas Gerais, el estado líder en producción forestal en Brasil, ha experimentado un crecimiento significativo de esta actividad, especialmente en las Regiones Geográficas Intermedias de Montes Claros y Teófilo Otoni. El objetivo de este estudio fue mapear las áreas de cultivo de eucalipto en la región semiárida de Minas Gerais, incluyendo las llamadas "áreas de preparación", correspondientes a las fases de cosecha, regeneración o plantación temprana. Se utilizó la vectorización manual, ya que plataformas como MapBiomas no identifican completamente estas áreas. Los datos se compararon con los de MapBiomas Collection 8 (2022) y PEVS/IBGE (2021), mostrando un aumento del 24,3% en comparación con PEVS y del 46% en comparación con MapBiomas. Los resultados muestran subestimaciones en las bases oficiales e indican la necesidad de mejorar los métodos de seguimiento en zonas sensibles desde el punto de vista medioambiental.

Palabras clave: Región semiárida de Minas Gerais; Silvicultura; Fotointerpretación; MapBiomas; Monitoreo ambiental.

INTRODUÇÃO

O cultivo de eucalipto é tema de amplos debates globais, sobretudo quanto aos efeitos de sua implantação e aos impactos ambientais sobre o ecossistema e a disponibilidade hídrica local (Dias; Vicente; Santos, 2022). No Brasil, sua expansão remonta ao legado de Edmundo Navarro de Andrade (1841–1941), engenheiro agrônomo responsável pela criação dos primeiros hortos da Companhia Paulista de Estradas de Ferro. Navarro introduziu técnicas inovadoras para o cultivo desse gênero de rápido crescimento, originalmente trazido da Austrália com finalidade ornamental. Posteriormente, passou a ser utilizado como quebra-vento em plantações de café e, por fim, destinado a suprir as demandas energéticas das ferrovias.

Ao longo do século XX, os plantios dessa espécie foram impulsionados por políticas públicas, pela parceria entre universidades e indústrias e pelo avanço das técnicas silviculturais (Rodrigues et al., 2021). A trajetória do reflorestamento demonstra que os talhões florestais desempenham papel crucial na economia, especialmente por meio de empresas de silvicultura (voltadas à produção de papel, celulose, carvão, madeira, resina e folhas) e de siderurgia.

De acordo com a pesquisa Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Minas Gerais apresenta a maior área plantada e a maior produção do setor florestal brasileiro, correspondendo a cerca de 24% da área cultivada no país (IBÁ, 2019; IBGE, 2021). Os eucaliptais estão distribuídos por todo o território mineiro, com maior concentração nas regiões intermediárias de Montes Claros e Teófilo Otoni, em razão da desvalorização do preço da terra nas mesorregiões Norte de Minas e Vales do Jequitinhonha e Mucuri (Teixeira; Rodrigues, 2021; Borges; Leite; Leite 2018; Leite; Almeida; Silva, 2012).

Desse modo, grande parte da silvicultura de eucalipto do estado concentra-se na região do semiárido mineiro. O atual limite dessa região, definido pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) por meio da Resolução CONDEL/SUDENE n.º 150 (BRASIL, 2021), abrange 217 municípios de Minas Gerais. Desses, 148 produzem silvicultura de forma efetiva, sendo que 98,32% da produção total corresponde a eucaliptais (IBGE, 2021).

Nesse contexto, embora seja considerada eficaz para o abastecimento de madeira, o que pode minimizar a pressão sobre a vegetação nativa, a silvicultura de

eucalipto tem sido pauta de discussões controversas quanto aos impactos ambientais causados pelos monocultivos (Teixeira, 2023).

Devido à escassez hídrica e ao elevado índice de aridez do solo, o semiárido mineiro requer atenção prioritária quanto à sua dinâmica de uso e ocupação da terra. A mudança da cobertura vegetal avança à medida que a demanda do mercado por produção aumenta. Assim, intensifica-se a ocupação de áreas destinadas ou projetadas para a produção agrária e florestal. Para garantir o consumo energético, de fibras e de alimentos, é necessário desenvolver trabalhos e técnicas que auxiliem na gestão público-privada dos recursos naturais, das indústrias e das infraestruturas urbanas (Mariano *et al.*, 2018; Bezerra *et al.*, 2020; Cabral; Barreira; Ferreira 2019; Silva *et al.*, 2019).

Nessa perspectiva, o sensoriamento remoto representa um conjunto crescente de técnicas aplicadas ao mapeamento e à inspeção do uso da terra, essenciais para atividades de monitoramento voltadas à conservação ambiental, à promoção do crescimento econômico e ao desenvolvimento social. Os dados eletromagnéticos obtidos por sensores orbitais apresentam abrangência sinóptica, e as medições recorrentes da superfície terrestre, em diferentes resoluções espectrais, espaciais e temporais, são fundamentais para a análise das transformações da paisagem sob múltiplos aspectos (Zhu; Qiu; Ye, 2022). Estudos de classificação automática, realizados frequentemente no setor florestal, revelam-se indispensáveis para o entendimento da dinâmica espacial desse segmento (Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich; 2015).

Desse modo, o projeto MapBiomas, uma rede composta por ONGs, universidades e empresas de tecnologia, destaca-se como referência ao disponibilizar dados sobre uso e cobertura da terra, com ênfase na silvicultura de eucalipto. Fundado em 2015 a convite do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) e em parceria com o Observatório do Clima, o projeto realiza o mapeamento anual da cobertura vegetal em todo o território brasileiro, classificando e disponibilizando informações sobre a silvicultura de eucalipto no conjunto de dados referentes à atividade agropecuária (MapBiomas, 2023).

No entanto, classificações automáticas não supervisionadas podem apresentar resultados discrepantes em áreas heterogêneas, especialmente quando analisadas em diferentes escalas. Essa limitação é mais evidente em imagens de média resolução espacial, cujas respostas espectrais variam conforme a produção de

biomassa dos organismos primários, a qual depende de parâmetros biofísicos e das condições edafoclimáticas. (Lopes; Santos; Júnior, 2023; Jensen, 2009; Shimabukuru, Novo; Ponzoni, 1998).

Os processos automatizados, baseados em algoritmos de aprendizado de máquina, podem, em função da escala de análise, generalizar ou omitir padrões importantes, resultando em simplificações excessivas nos mapeamentos consolidados. Nesse contexto, a dinâmica espaço-temporal da silvicultura evidencia que áreas colhidas tendem, normalmente, a ser replantadas. Quando identificadas exclusivamente por métodos automatizados a partir de imagens de satélite, essas áreas podem ser subestimadas ou excluídas devido aos níveis de reflectância, que variam e se diferenciam daqueles apresentados por árvores em fase de desenvolvimento ou em processo de colheita. Mesmo com os avanços do sensoriamento remoto por satélites de detecção inteligente, alguns desafios persistem, como a detecção de mudanças complexas na superfície (Zhang *et al.*, 2022).

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo mapear o eucalipto no semiárido mineiro, incluindo as áreas de preparo. Para isso, adotou-se o método de vetorização das áreas por meio de identificação visual em imagens do satélite Landsat/OLI. Os resultados obtidos foram comparados à classe de silvicultura da Coleção 8 do projeto MapBiomas e aos dados divulgados pela PEVS do IBGE.

METODOLOGIA

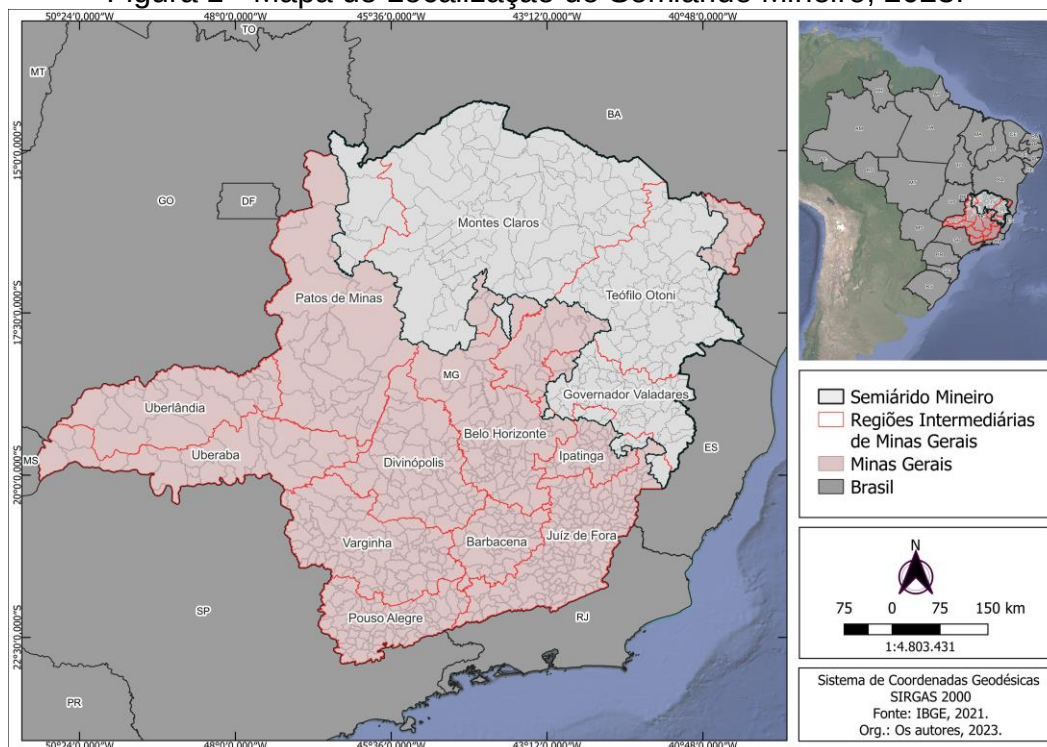
Área de Estudo

Conforme a Figura 1, a área de estudo possui 217.991,85 km², correspondendo a 37,14% da área total do estado, e está situada entre as coordenadas 20°12'57" e 14°13'44" de latitude Sul e 46°34'21" e 40°9'36" de longitude Oeste. Seu contingente populacional é de 3.273.550 habitantes (IBGE, 2022). A área definida para o estudo abrange os 217 municípios inseridos na nova delimitação do semiárido em Minas Gerais. De acordo com a regionalização do IBGE (2017), esses municípios integram as Regiões Geográficas Intermediárias (RGI) de Patos de Minas, Montes Claros, Teófilo Otoni, Governador Valadares, Ipatinga, Juiz de Fora e Belo Horizonte.

Seguindo os critérios adotados pela SUDENE para a inclusão dos domínios no planejamento estatal, essa área é caracterizada como semiárido em virtude de quadros climáticos extremos na região — o conhecido binômio seca-chuva —, sendo

os efeitos das secas considerados um dos maiores passivos sociais do país (TRAVASSOS et al., 2013). Tecnicamente, o rigor dessa delimitação baseia-se em três parâmetros: i) índice de aridez de Thornthwaite inferior ou igual a 0,50; ii) precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm; e iii) percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano.

Figura 1 - Mapa de Localização do Semiárido Mineiro, 2023.



Aquisição e Processamento de Imagens

Nesta etapa do trabalho são apresentados os procedimentos metodológicos da pesquisa. Inicialmente, a partir do arquivo da base vetorial de Minas Gerais disponibilizada pelo IBGE, foi extraída a máscara de delimitação do semiárido mineiro. Do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) foram obtidos os dados da PEVS referentes a 2021, utilizados para a validação quantitativa da silvicultura mapeada no presente estudo. Para estabelecer um paralelo com outros mapeamentos consolidados, também foi utilizado o mapa de cobertura e uso da terra da Coleção 8, disponível na plataforma MapBiomas.

É importante destacar que, segundo o IBGE (2021), a PEVS constitui a principal fonte de estatísticas sobre o monitoramento sistemático da exploração dos recursos florestais em todo o território nacional. Por sua vez, o MapBiomas baseia-se em séries de imagens do satélite Landsat, com resolução espacial de 30 metros, para mapear a

evolução do uso e cobertura da terra em todos os biomas brasileiros, disponibilizando uma série histórica superior a três décadas. Esse processo é viabilizado pela aplicação de algoritmos de classificação extensivos, em especial o método *Random Forest*, implementado na plataforma Google Earth Engine (MapBiomas, 2023).

Nesse contexto, o projeto adota a escala de trabalho de 1:250.000, em conformidade com o mapa oficial dos Biomas Brasileiros (IBGE, 2019). Na Coleção 8 do MapBiomas, as florestas plantadas constituem uma das classes consolidadas do tema transversal “Agropecuária”, de modo que a silvicultura está contemplada em todas as coleções disponibilizadas pelo projeto.

Ao longo do histórico dos mapeamentos, as imagens passam por ajustes, como a normalização da reflectância dos produtos Landsat. Para a composição dos mosaicos, o MapBiomas considera todas as imagens adquiridas no período de janeiro a janeiro, utilizadas no mapeamento das florestas plantadas. Nessa abordagem, a classe “Silvicultura” é tratada como uma cultura perene homogênea, sendo mapeada a partir das bandas do espectro que abrangem do visível ao infravermelho médio. Para aumentar a precisão da classificação, são empregados diversos índices espectrais, que permitem discriminar características biofísicas da vegetação, como densidade foliar, vigor e umidade do solo. Métodos híbridos, combinando esses índices com algoritmos de aprendizado de máquina, têm sido amplamente utilizados para o mapeamento de variáveis biofísicas da vegetação, garantindo maior robustez e consistência dos resultados (Verrélt et al., 2020).

Com o objetivo de analisar a dinâmica espacial da silvicultura, foram adquiridas imagens multiespectrais abrangendo do visível ao infravermelho, com resolução espacial de 30 metros, obtidas pelo sensor OLI (*Operational Land Imager*) do satélite LANDSAT 8, disponíveis na plataforma EarthExplorer do Serviço Geológico dos Estados Unidos. Para cobrir integralmente a área de estudo, foram selecionadas imagens correspondentes às seguintes cenas e órbitas: 216/71, 216/72, 216/73, 216/74, 217/71, 217/72, 217/73, 217/74, 218/70, 218/71, 218/72, 218/73, 219/70, 218/71, 219/72, 219/73, 220/70, 220/71 e 220/72.

A fim de obter dados consistentes com a realidade da área de estudo, optou-se por imagens adquiridas no período de inverno (junho a setembro), considerando que as chuvas se concentram no verão na maior parte do semiárido mineiro. Na porção leste da região, devido à influência climática e à oceanidade dos litorais da Bahia e do Espírito Santo, observa-se elevada nebulosidade. Para contornar lacunas

de cobertura de nuvens registradas em 2022, foram selecionadas imagens de 2020 e 2021. A utilização de imagens anteriores a 2022 não compromete a análise, uma vez que os ciclos de corte das culturas de eucalipto podem durar até sete anos.

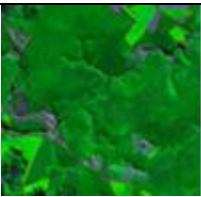
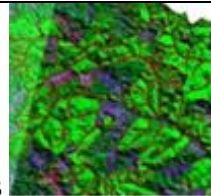
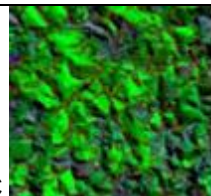
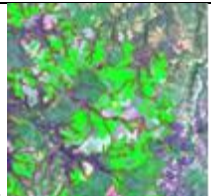
Seguindo os procedimentos operacionais, utilizou-se o software QGIS 3.26.3 para elaborar composições em falsa cor, destacando os alvos dos sistemas florestais. Foram empregadas as seguintes bandas: vermelho (0,64 μm – 0,67 μm) do espectro visível; infravermelho próximo (0,85 μm – 0,88 μm); e infravermelho médio (1,3 μm – 2,1 μm). Em seguida, realizou-se o mosaico e o recorte das imagens referentes ao ano de 2022, utilizando como limite a delimitação do semiárido mineiro.

Para a identificação e vetorização das áreas de eucalipto, elaborou-se uma chave de interpretação baseada nos critérios de cor, textura e forma, com o objetivo de diferenciar áreas plantadas de áreas de preparo. A diversidade de respostas espectrais, a variabilidade das coordenadas dos talhões e as distintas características edafoclimáticas das regiões que compõem a área total do estudo exigiram a realização de uma fotointerpretação detalhada. Esse processo envolveu etapas de fotoleitura e fotoanálise, permitindo a correta espacialização do alvo, objeto, fenômeno ou área de interesse (Rosa, 2009).

Conforme apresentado no Quadro 1 (letras B, C e E), as áreas plantadas de silvicultura foram caracterizadas por textura lisa e forma regular. Por outro lado, as áreas de preparo, indicadas pela letra D, apresentam texturas e formas irregulares, variando conforme a regeneração da vegetação nativa, a etapa de colheita das árvores ou a fase de crescimento das mudas de eucalipto.

Outro critério utilizado na chave de interpretação foi a presença de estradas florestais, construídas para viabilizar a colheita e o transporte da madeira plantada. A vetorização das áreas, contudo, seguiu prioritariamente a fotoanálise, realizada com o auxílio do software Google Earth Pro. O recurso de visualização histórica disponível na plataforma permitiu a observação retrospectiva de áreas que apresentavam dúvidas quanto à ocupação por eucalipto em períodos anteriores.

Quadro 1 - Chave de interpretação dos produtos orbitais

Composição Multiespectral RGB/654	Classes	Chave de Interpretação
A 	Vegetação Natural	Cor: Tons variados de verde escuro; Textura: áspera, rugosa; Forma geométrica: Irregular.
B 	Eucalipto em meio à vegetação natural no Vale do Jequitinhonha	Cor: tons de verde-limão, mais ou menos escuros; Textura: Lisa, intercalada às texturas rugosas das áreas colhidas/de preparo; Forma geométrica: regular.
C 	Eucalipto em meio à vegetação natural no Vale do Rio Doce	Cor: tons de verde-limão, mais ou menos escuros; Textura: Lisa, intercalada às texturas rugosas das áreas colhidas/de preparo; Forma geométrica: regular.
D 	Áreas de preparo para o plantio e/ou áreas recentemente colhidas; Eucalipto em meio às áreas de preparo e colheita.	Cor: tons de rosa, roxo e branco; Textura: rugosa ou lisa, de acordo com o nível de desenvolvimento da área; Forma geométrica: irregular.
E 	Plantio de Eucalipto no médio São Francisco	Cor: tons bem-marcados (em meio à resposta espectral dos arredores) de verde limão; Textura: lisa, principalmente; Forma geométrica: regular.

Fonte: os autores (2023).

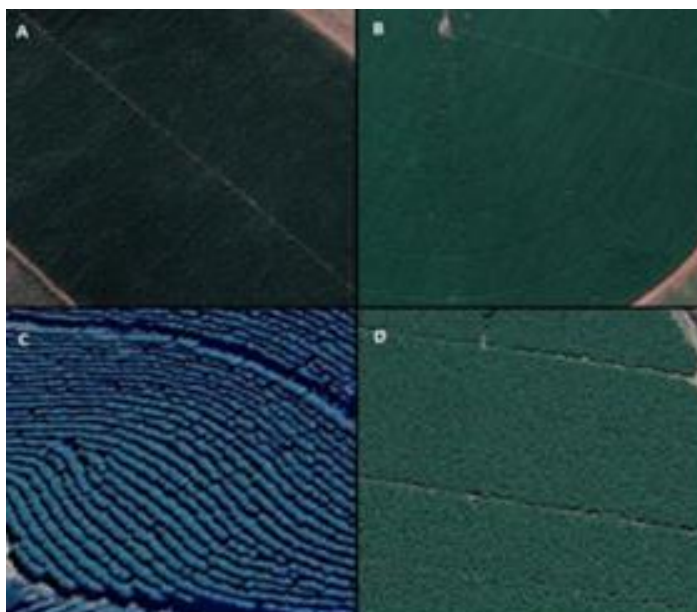
Na Região Geográfica Intermediária (RGI) de Montes Claros, parcelas significativas da paisagem apresentam extensas superfícies aplainadas, muitas delas já degradadas em função dos processos morfodinâmicos vigentes (SILVA, 2016). Em estudos realizados na RGI de Teófilo Otoni, Borges et al. (2018) observaram que a resposta espectral do eucalipto se sobrepõe à da Floresta Estacional Semidecidual, enquanto na RGI de Patos de Minas, projetos de irrigação e trechos de Mata Ciliar exibem respostas espectrais semelhantes às do eucalipto.

A vegetação natural possui resposta espectral mais opaca no período seco devido à diminuição de seu metabolismo com os mecanismos de tolerância ao déficit hídrico (Peixoto, 2010). Esse fato resulta em diferentes padrões de coloração da vegetação natural do Norte do Estado (Cerrado e Caatinga) para a RGI de Juiz de Fora (Mata Atlântica), a título de amplitude.

Retornando ao Quadro 1, percebe-se os diferentes contextos geomorfológicos de ocupação da silvicultura entre as regiões próximas ao médio Rio São Francisco evidenciada pela letra E em comparação às regiões próximas aos vales do Jequitinhonha e Rio Doce, destacadas pelas letras B e C. A textura rugosa das superfícies dos vales são amplas áreas dissecadas, com colinas e cristas, vales relativamente encaixados, nas quais diferenciam das superfícies aplainadas de formato regular nas RIG's de Montes Claros.

Conforme apresentado na Figura 2, o uso do aplicativo Google Earth Pro mostrou-se essencial para diferenciar culturas com respostas espectrais semelhantes em imagens do Landsat 8/OLI, como os cultivos de café e bananeira. Os mosaicos disponíveis na plataforma permitiram uma distinção mais precisa, apoiada no conhecimento prévio de campo e nos hábitos característicos de cultivo dessas espécies. Nesse processo, tanto o padrão de dossel e arranjo foliar quanto a regularidade geométrica dos talhões configuraram-se como os principais atributos para a correta separação dos plantios em relação à silvicultura do eucalipto.

Figura 2 – A: Eucalipto; B: Agricultura irrigada por pivô central; C: Cafezal; D: Bananal.



Fonte: os autores (2023).

Finalizada a etapa de mapeamento por análise visual e vetorização, procedeu-se à comparação das áreas identificadas como pertencentes à silvicultura com a legenda do sistema de classificação do MapBiomas. Convém destacar que, na definição de sua legenda, o MapBiomas adota um sistema hierárquico, em que cada classe de uso e cobertura da terra recebe um código único estruturado a partir de temas transversais.

Nesse enquadramento, a silvicultura é considerada uma subclasse vinculada ao tema “Agricultura”, o qual, por sua vez, integra a classe de maior abrangência denominada “Agropecuária”. Assim, as classes disponibilizadas pela plataforma, originalmente no formato raster, foram reprojctadas e convertidas para o formato vetorial, garantindo compatibilidade em relação ao sistema de projeção e DATUM. Em seguida, realizou-se o recorte das classes do MapBiomas com base nos limites da silvicultura obtidos no mapeamento, seguido do cálculo das áreas (km²) correspondentes a cada classe temática.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a análise da espacialização da silvicultura de eucalipto no semiárido mineiro, observam-se variações nas assinaturas espectrais, diretamente relacionadas aos diferentes estágios de desenvolvimento dos talhões. Ademais, áreas anteriormente ocupadas pelos plantios podem passar por períodos de interrupção nos ciclos de produção e colheita de madeira, sendo posteriormente retomadas para a continuidade das atividades silviculturais.

Conforme os métodos empregados neste estudo, a área ocupada pelo eucalipto foi estimada em 9.350,09 km² no ano de 2022, o que corresponde a 4,2% do Semiárido Mineiro. Esse quantitativo inclui tanto as áreas de preparo quanto as florestas plantadas, mapeadas por meio da vetorização visual. Quando comparados a outras fontes, os valores obtidos se mostram mais elevados: 7.083,03 km² (3,24%) segundo a PEVS (IBGE, 2021) e 5.046 km² (2,32%) conforme o MapBiomas (2022).

Essas diferenças revelam a influência direta das metodologias empregadas. Enquanto o MapBiomas utiliza algoritmos automatizados em escala nacional, que podem generalizar áreas heterogêneas, a PEVS depende de informações declaradas ou estimadas pelos estabelecimentos produtores, podendo subestimar ou não captar áreas em transição. Já o presente estudo, ao considerar também as áreas de preparo, tende a capturar de forma mais abrangente a real extensão da silvicultura na região,

evidenciando a importância das análises de fotointerpretação e das ferramentas de geoprocessamento para complementar e refinar os mapeamentos consolidados.

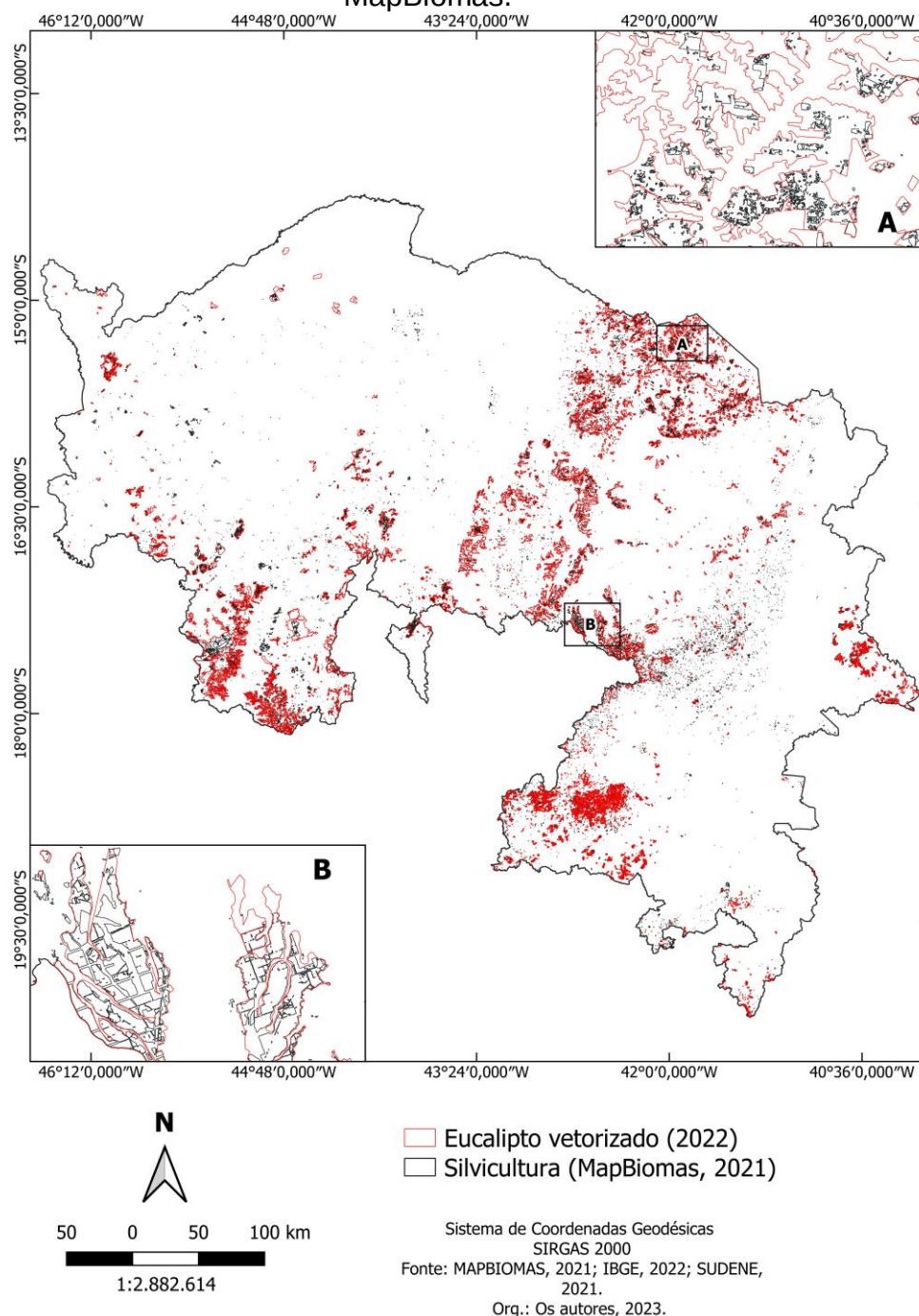
É importante ressaltar que a escolha dos métodos de mapeamento deve estar alinhada aos desafios específicos de cada contexto ambiental, uma vez que a complexidade das paisagens influencia diretamente a eficácia das técnicas empregadas. A literatura aponta avanços significativos, como o uso de classificações orientadas a objetos em imagens de alta resolução, bem como técnicas de aprendizado de máquina e algoritmos supervisionados, a exemplo do *Random Forest* e do *Support Vector Machine*, amplamente empregados em estudos de detecção de florestas plantadas (Oliveira, 2022; Ferla et al., 2023).

Deng et al. (2020) demonstram que a integração de dados multiespectrais e multisensoriais na plataforma Google Earth Engine permite a identificação precisa de plantios de eucalipto de curto ciclo em larga escala, mesmo em contextos de elevada heterogeneidade ambiental. Nesse contexto, tais métodos podem aprimorar a detecção de plantios florestais comerciais e representam alternativas às limitações de técnicas convencionais, ao contribuírem para um mapeamento mais refinado e adequado à complexidade ambiental.

Entretanto, apesar dos avanços tecnológicos, a adoção de métodos mais sofisticados pode ser limitada por custos e demandas computacionais elevadas, o que reforça a relevância de abordagens híbridas. Assim, a vetorização manual em tela, embora apresente limitações relacionadas à exaustividade do mapeamento, pode ser integrada a interpretações automatizadas, especialmente em levantamentos de larga escala em regiões de alta heterogeneidade ambiental, como o Semiárido Mineiro.

Nessa perspectiva, a Figura 3 evidencia a diferença visual entre as áreas de eucalipto mapeadas por vetorização e a classe de silvicultura do MapBiomass. No comparativo, observa-se que, tanto na região destacada pela letra “A” quanto na indicada pela letra “B”, as áreas de eucalipto mapeadas manualmente são consideravelmente maiores do que aquelas registradas pelo MapBiomass.

Figura 3 - Mapeamento do eucalipto vetorizado sobreposto à silvicultura do MapBiomas.



Fonte: os autores (2023).

Portanto, as diferenças metodológicas influenciaram diretamente os resultados dos mapeamentos. A vetorização utilizada neste estudo baseia-se na análise visual para definir as áreas de uso e cobertura do eucalipto. Esse método permite não apenas mapear a cobertura florestal, mas também indicar o uso econômico do solo, ou seja, áreas que, mesmo sem cobertura florestal atual, estão reservadas para o manejo da silvicultura de eucalipto.

Por outro lado, os avanços das geotecnologias nas últimas décadas têm possibilitado o monitoramento da cobertura e do uso da terra com maior precisão e agilidade, por meio de algoritmos de aprendizado de máquina, como exemplificado pelos dados anuais produzidos pela rede colaborativa MapBiomias. O mapeamento de ecossistemas complexos e heterogêneos possui um papel fundamental para o conhecimento do território brasileiro. No entanto, ao focalizar temas específicos, a combinação hierárquica de classes separadas por temas transversais resulta em um sistema de classificação que não contempla totalmente as particularidades da dinâmica de uso da terra na silvicultura de eucalipto. Entre outros fatores, a escala de trabalho adotada (1:250.000), aplicada a todo o território brasileiro, torna-se determinante na estruturação do sistema de classificação.

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos, a Tabela 1 apresenta quantitativamente as classes da Coleção 8 do MapBiomias que se sobrepõem às áreas destinadas ao cultivo de eucalipto identificadas por vetorização, abrangendo tanto áreas de preparo quanto talhões florestais não incluídos na referida coleção.

Tabela 1 – Classes mapeadas pelo MapBiomias sobrepostas às áreas de eucalipto classificadas por meio da visualização e fotointerpretação das imagens.

Código da legenda	Classes - coleção 8 do MapBiomias	Área em km ²	Percentual
9	Silvicultura	5.046	56,37
4	Formação Savânicas	1.378	15,39
15	Pastagem	842,39	9,51
3	Formação Florestal	508,53	9,41
21	Mosaico de Usos	850,93	5,68
12	Formação Campestre	103,13	1,15
41	Outras Lavouras Temporárias	53,14	0,63
39	Soja	56,47	0,59
11	Campo Alagado e Área Pantanosa	37,27	0,42
46	Café	29,41	0,41
25	Outras Áreas não vegetadas	36,77	0,33
47	Citrus	2,81	0,06
48	Outras Lavouras Perenes	5,02	0,03
29	Afloramento Rochoso	0,91	0,01
24	Área Urbanizada	0,53	0,01
20	Cana	0,51	0,01
30	Mineração	0,05	0
62	Algodão (beta)	0,06	0
Total Geral	-	8951,93	100

Fonte: os autores (2023).

No total, foram identificadas 18 classes de uso do solo pelo mapeamento do MapBiomias que coincidem com a área destinada ao eucalipto, conforme vetorização. Excluindo-se a classe de silvicultura, as coberturas naturais vegetadas somaram 2.027,8 km² (22,7% da área sobreposta), enquanto os usos antrópicos totalizaram 1.878,9 km² (21%), sendo a pastagem responsável por 842,4 km² (9,4%).

Essa comparação evidencia que os diferentes métodos utilizados nas análises geram valores distintos, uma vez que a área de eucalipto mapeada neste estudo apresenta extensão significativamente superior em relação à estimada pelo MapBiomas, sobretudo na região leste do Semiárido Mineiro.

Ao analisar os dados por região, observa-se que a Região Geográfica Intermediária de Montes Claros detém a maior extensão destinada ao cultivo de Eucalipto, totalizando 6.553,02 km², o que corresponde a aproximadamente 70% da área mapeada. Em seguida, destaca-se a RGI de Teófilo Otoni, com 1.764 km², representando 18,8% do total. Em proporções menores, a RGI de Governador Valadares possui cerca de 691,6 km² (7,1%), enquanto as RGIs de Ipatinga, Juiz de Fora e Belo Horizonte somam conjuntamente 342,25 km² destinados ao Eucalipto, correspondendo a 3,7% da área total.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao mapear o eucalipto do Semiárido Mineiro por classificação visual e vetorização manual, foi possível incluir todos os talhões com diferentes padrões de plantio, de acordo com suas fases de desenvolvimento. Constatou-se que parte significativa da área ocupada pela silvicultura, especialmente as áreas de preparo para o plantio, é frequentemente excluída de mapeamentos realizados por métodos consolidados e automatizados. A incorporação dessas áreas, em que a floresta plantada passou por corte recente ou está ocupada por mudas em crescimento, revelou-se determinante no saldo total da área de uso do eucalipto.

Rotinas de mapeamentos consolidados, como as desenvolvidas pelo MapBiomas, desempenham papel essencial no monitoramento do território brasileiro. Contudo, em função de fatores como a escala de trabalho adotada (1:250.000) e a necessidade de padronização em âmbito nacional, tais produtos não captam com precisão as dinâmicas específicas da silvicultura do eucalipto, especialmente em áreas heterogêneas. Isso explica a diferença observada neste estudo, que identificou uma área cerca de 24,3% superior à divulgada pela PEVS/IBGE (2021) e aproximadamente 46% maior do que a estimada pela Coleção 8 do MapBiomas (2022).

Rotinas consolidadas de mapeamentos, como as desenvolvidas pelo MapBiomas, são utilizadas para o monitoramento do território brasileiro. Entretanto, devido à escala de trabalho adotada (1:250.000) e à necessidade de padronização

nacional, esses produtos não registram com exatidão as dinâmicas específicas da silvicultura do eucalipto, sobretudo em áreas heterogêneas. Neste estudo, foi identificada uma área 24,3% superior à divulgada pela PEVS/IBGE (2021) e aproximadamente 46% maior do que a estimada pela Coleção 8 do MapBiomas (2022).

Apesar dos avanços proporcionados pelos sistemas de classificação via aprendizado de máquina, os plantios homogêneos de eucalipto com ciclos de manejo específicos ainda permanecem sub-representados nos mapas anuais disponibilizados. Nesse contexto, a metodologia empregada neste estudo apresenta limitações, sobretudo em função do tempo e esforço técnico exigidos, mas constitui um ponto de partida para o aprimoramento de ferramentas automatizadas e replicáveis. O desenvolvimento de abordagens híbridas, que integrem vetorização manual, validação em campo e algoritmos de aprendizado de máquina associados a imagens de maior resolução espacial, tem o potencial de ampliar a acurácia do mapeamento e superar lacunas ainda existentes. Dessa forma, este estudo contribui para o debate metodológico, oferecendo caminhos para o aprimoramento do monitoramento da silvicultura de eucalipto.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo aporte técnico e apoio financeiro. Os autores prestam homenagem póstuma a Adalberto Vinícius Fernandes, reconhecendo suas relevantes contribuições acadêmicas para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

BEZERRA, A. C.; SILVA, J. L. B.; SILVA, D. A. O.; BATISTA, P. H. D.; PINHEIRO, L. C.; LOPES, P. M. O.; MOURA, G. B. A. Monitoramento Espaço-Temporal da Detecção de Mudanças em Vegetação de Caatinga por Sensoriamento Remoto no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, n. 1, p. 286-301, 2020. <https://doi.org/10.26848/rbqf.v13.1.p286-301>.

BORGES, M. G.; LEITE, M. E.; LEITE, M. R. Mapeamento do eucalipto no estado de Minas Gerais utilizando o Sensor Modis. **Espaço Aberto**, v. 8, n. 1, p. 53-70, 2018. <https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2018.14364>.

BRASIL. MDR – Ministério do Desenvolvimento Regional. Resolução Condel/Sudene nº 150, de 13 de dezembro de 2021. Aprova a Proposição nº 151/2021, que trata do Relatório técnico que apresenta os resultados da revisão da delimitação do Semiárido 2021. Brasília: Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/acesso-a->

[informacao/legislacao/hierarquia/resolucoes-condel/resolucao-condel-sudene-no-150-de-13-de-dezembro-de-2021](#). Acesso em: 02 ago. 2023.

CABRAL, E. G.; BARREIRA, S.; FERREIRA, M. E. A silvicultura do eucalipto no estado de Goiás: um registro histórico via sensoriamento remoto. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 39, 2019. <https://doi.org/10.4336/2019.pfb.39e201801649>.

DENG, X. et al. Identification of short-rotation *Eucalyptus* plantation at large scale using multi-source remotely sensed data on Google Earth Engine. **Remote Sensing**, Basel, v. 12, n. 13, art. 2153, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12132153>.

DIAS, T. L.; VICENTE, M. R.; SANTOS, R. M. Estimativa de consumo hídrico do eucalipto através de imagens de sensores orbitais. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 7, p.1-15, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i7.30362>.

FERLA, A. K.; BREUNIG, F. M.; BALBINOT, R.; SILVA, R. D. A. G. da. Mapeamento de florestas de *Pinus* spp. e classes de cobertura do solo usando dados de satélite PlanetScope de alta resolução: experimentando imagens em diferentes estações e métodos de aprendizado de máquina. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 75, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv75n0a-67769>.

EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. LANDSAT: Land Remote Sensing Satellite. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/landsat>. Acesso em: 05 set. 2023.

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; SOUZA, A. H. B. N.; JUNIOR, J. C. A. Caracterização edafoclimática e manejo de solos das áreas com plantações de eucalipto. In: **Silvicultura do eucalipto no Brasil**, p. 111-153, Santa Maria, RS: Editora UFSM, 2016.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório Anual 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 30 out. 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Biomass e sistema costeiro-carinho do Brasil: compatível com a escala 1:250. 000**(IBGE (ed.); Vol. 45, 2019. Editora do IBGE. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/bibliotecacatalogo.html?id=2101676&view=detalhes%0Ahttps://www.ibge.gov.br/apps/biomass> Acesso em: 15 fev. 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**, 2021. Rio de Janeiro, RJ. v. 36, p. 1-8, 2021.

LEITE, M. E.; ALMEIDA, J. W. L.; SILVA, R. F. Análise espaço-temporal do eucalipto no norte de Minas Gerais nos anos de 1986, 1996 e 2010. **Revista Geotextos**. V. 8, p. 59-74, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.9771/1984-5537geo.v8i2.593>

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução da 2ª ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

LOPES, R. J. C.; SANTOS, A. M.; JÚNIOR, C. L. Análise dos índices de vegetação para monitoramento remoto das caatingas. **Geo UERJ**, n. 42, p. 55653, 2023. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2023.55653>

MapBiomass. 2023. Visão geral da metodologia. Disponível em: <https://brasil.MapBiomass.org/visao-geral-da-metodologia/>. Acesso em: 31 ago. 2023.

MARIANO, D. A.; SANTOS, C. A.; WARDLOW, B. D.; ANDERSON, M. C.; SCHILTMAYER, A.V.; TADESSE, T.; SVOBODA, M. D. 2018. Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and humaninduced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, n. 213, p. 129-143. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.048>

MOLEDO, J.C.; SAAD, A. R.; DALMAS, F. B.; ARRUDA, R. de O.M.; CASADO, F. Impactos ambientais relativos à silvicultura de eucalipto: uma análise comparativa do desenvolvimento e aplicação no plano de manejo florestal. *Geociências*, São Paulo, v. 35, n. 4, p. 512–530, 2016. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/11997> Acesso em: 16 ago. 2025.

OLIVEIRA, S. G. de. **Identificação de plantios florestais de interesse comercial em Goiás: classificação supervisionada de imagens multiespectrais**. 2022. Dissertação (Mestrado em Agronegócio) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2022. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/170/o/Disserta%C3%A7%C3%A3o_-_Sabrina_Gomes_de_Oliveira.pdf. Acesso em: 19 ago. 2025.

PEIXOTO, C. P. **Curso de Fisiologia Vegetal**. Cruz das Almas. CCAAB/UFRB. 2020. 208p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. São Paulo: Oficina de textos, 2015.

RODRIGUES, G. S. S. C.; ROSS, J. L. S.; TEIXEIRA, G.; SANTIAGO, O. R. P. L.; FRANCO, C. **Eucalipto no Brasil: Expansão geográfica e impactos ambientais**. Uberlândia/MG: EDUFU, 2021. Disponível em: <https://comunica.ufu.br/noticias/2021/04/e-book-aborda-expansao-e-impactos-ambientais-do-eucalipto-no-brasil>. Acesso em: 23 ago. 2023.

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. 7ª Edição. EDUFU: Uberlândia/MG, 2009.

SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. M.; PONZONI, F. J. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 13, p. 1729–1737, 1998.

SILVA, C. V. S.; SILVA, J. L. B.; MOURA, G. B. A.; LOPES, P. M. O.; NASCIMENTO, C. R.; SILVA, L. C. 2019. Monitoramento da cobertura vegetal por sensoriamento remoto no semiárido brasileiro através de índices de vegetação. **Nativa**, p. 708–717.2019 <https://doi.org/10.31413/nativa.v7i6.7646>

SILVA, M. L. Mapeamento de superfícies aplainadas no norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 02, p. 526-545, 2016. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.2.p526-545>

TEIXEIRA, G. **Impactos ambientais do eucalipto: um estudo comparativo entre Brasil e Portugal**. 2023. 211 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2023.8076>. Acesso em: 21 fev. 2024.

TEIXEIRA, G.; RODRIGUES, G. S. S. C. TRAJETÓRIA GEOGRÁFICA DA SILVICULTURA EM MINAS GERAIS. **Mercator** (Fortaleza), v. 20, p. 3, 2021. <https://doi.org/10.4215/rm2021.e20004>

TRAVASSOS, I. S.; SOUZA, B. I.; SILVA, A. B. Secas, desertificação e políticas públicas no semiárido nordestino brasileiro. **Revista Okara: Geografia em Debate**, v. 7, n. 1, p. 147-164, João Pessoa, 2013. Disponível em: https://www.academia.edu/33910421/Secas_Desertifica%C3%A7%C3%A3o_e_Pol%C3%ADticas_P%C3%BAblicas_No_Semi%C3%A1rido_Nordestino_Brasileiro. Acesso em: 15 ago. 2025.

VERRÉLST, J.; MALENOVSKÝ, Z.; VAN DER TOL, C.; et al. Quantifying vegetation biophysical variables from imaging spectroscopy data: a review on retrieval methods. **arXiv preprint arXiv:2012.04555**, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2012.04555> . Acesso em: 16 ago. 2025.

ZHANG, B.; WU, Y.; ZHAO, B.; CHANUSSOT, J.; HONG, D.; YAO, J.; GAO, L. Progress and challenges in intelligent remote sensing satellite systems. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 15, p. 1814-1822, 2022. DOI: [10.1109/JSTARS.2022.3148139](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3148139).

ZHU, Z.; QIU, S.; YE, S. Remote sensing of land change: A multifaceted perspective. **Remote Sensing of Environment**, v. 282, p. 113266, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113266>

Recebido em 26 de março de 2025
Aceito em 11 de dezembro de 2025