



Identificação e mapeamento de áreas plantadas em uma região do Estado de São Paulo utilizando imagens do Sentinel-2

Gabriel M. da Silva¹
Egidio Arai¹
Tânia B. Hoffmann¹
Fernanda S. Clementino¹
Yosio E. Shimabukuro¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, E-mail: (gabriel.maximo, egidio.arai, tania.hoffmann, fernanda.clementino, yosio.shimabukuro) @inpe.br

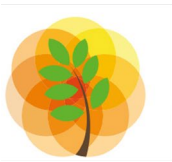
RESUMO: *Este artigo apresenta um método baseado em sensoriamento remoto orbital, para mapear plantios florestais na região central do Estado de São Paulo. Foi utilizado o algoritmo MAXVER, disponível no SPRING e desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Utilizamos mosaicos anuais de 20 m derivados de imagens Sentinel-2 MSI entre 2016 e 2022. Para classificar as plantações florestais, foram utilizados mosaicos das imagens frações de vegetação, sombra e solo. Também foram gerados mosaicos para cada imagem fração, calculando o valor máximo ao longo do período analisado, facilitando a classificação das áreas ocupadas por plantações florestais na área de estudo. O método proposto permitiu classificar áreas ocupadas predominantemente por Eucalyptus spp. Além disso, uma área-piloto (Mogi-Guaçu) foi utilizada para avaliar a classificação e monitorar os estádios fenológicos dos plantios de Eucalyptus spp., mostrando ciclo de rotação. O método proposto apresentou um valor de Kappa de 0.82 e acurácia global de 86.7%. Os resultados obtidos na área piloto demonstram a eficácia na identificação dos estágios fenológicos em plantios de Eucalyptus spp. Estes resultados auxiliam o planejamento e manejo de florestas plantadas por empresas comerciais e contribuem para o desenvolvimento de um método automático para mapear plantações florestais em escalas regionais e globais.*

Palavras-chave: MSI Sentinel-2, modelo linear de mistura espectral, imagens fração, áreas plantadas

Introdução

As técnicas de sensoriamento remoto são instrumentos úteis para identificar e caracterizar as classes de uso e cobertura da terra e as alterações devidas à visão sinóptica de grandes regiões geográficas associadas a custos monetários mais baixos quando comparadas com outros métodos de aquisição, como as campanhas de campo. Em geral, menos atenção tem sido dada ao aspecto temporal e, em particular, à dinâmica de vários tipos de uso e cobertura da terra, como as plantações florestais. A crescente disponibilidade de séries temporais de imagens orbitais derivadas de sensoriamento remoto e a contribuição potencial delas para a gestão e conservação ambiental enfatizam a necessidade do desenvolvimento de abordagens específicas para lidar adequadamente com a natureza e o volume desses dados (McCloy, 2010).

Análises de séries temporais de dados de sensoriamento remoto orbital abordam a identificação de padrões de mudança do uso e cobertura da terra no tempo e no espaço e a



incorporação de informações de sazonalidade e ciclo fenológico da vegetação nas análises (Lunetta et al., 2006; Wardlow et al., 2006). As imagens de fração máxima (vegetação, solo e sombra) têm sido utilizadas com sucesso para o mapeamento de uso e cobertura da terra, especialmente em áreas agrícolas (Arai et al., 2020; Cassol et al., 2020). Muitas dessas investigações se concentraram em escalas locais e regionais, incorporando produtos derivados de um ou mais sensores remotos orbitais. Tais abordagens podem ser adaptadas para monitorar plantações florestais, especialmente de *Eucalyptus* spp., que apresenta um ciclo de crescimento curto que varia de 6 a 8 anos. Portanto, esse ciclo pode ser avaliado com uso de séries temporais a partir de dados de sensoriamento remoto orbital.

Em 2020, 78% da área plantada brasileira era composta por espécies de *Eucalyptus* spp. e 18% por *Pinus* spp. (Deng et al., 2020). O Estado de São Paulo, que mais contribui para a economia brasileira, plantou quase 18,1% da área de *Eucalyptus* spp., no Brasil (Deng et al., 2020). As florestas plantadas do Estado de São Paulo são consideradas não apenas uma importante fonte de renda, mas também um alternativo para compor áreas de preservação permanente, reservas legais e reservas particulares de patrimônio natural. Portanto, a identificação precisa das florestas plantadas no Estado de São Paulo é necessária para o seu manejo adequado e para o desenvolvimento de políticas especiais que contribuam para a regulamentação ambiental nas áreas existentes.

Nesse contexto, o objetivo principal deste trabalho é apresentar um método para avaliar a extensão de áreas plantadas de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. localizadas na região central do Estado de São Paulo, Sudeste do Brasil, utilizando imagens de séries temporais anuais do sensor MSI Sentinel-2 obtidas no período de 2016 a 2022 e analisar os ciclos de rotação de Eucalipto em uma área piloto em Mogi-Guaçu.

Material e métodos

Área de estudo

A área de estudo selecionada consiste na região central do estado de São Paulo, contemplando as mesorregiões de Araraquara, Bauru, Piracicaba e Campinas (22°24'37"S e 48°14'30"O e 22°24'37"S e 48°14'30"O). Além disso, foi selecionada uma área piloto de plantio florestal para a avaliação fenológica dos ciclos de *Eucalyptus* spp., em Mogi-Guaçu, pertencente à empresa Sylvamo localizada 22°15' S e 47°10' O (Figura 1). A área possui plantio comercial do gênero *Eucalyptus* spp., portanto grande fluxo de rotação em plantio e colheita.

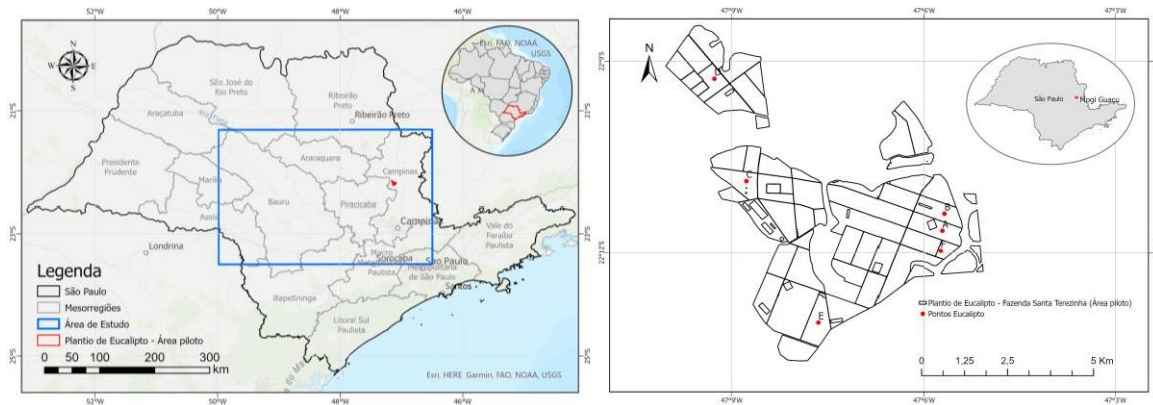


Figura 1. Localização da área de estudo e da área-piloto

Metodologia

A metodologia de forma resumida está contida no fluxograma metodológico (Figura 2). Foram utilizadas imagens Sentinel-2 MSI, de 20 m de resolução espacial, compostas por mosaicos anuais (2016–2022) entre os meses de junho a outubro. A partir das imagens, foram selecionados endmembers baseados em interpretação visual para a aplicação do modelo linear de mistura espectral (MLME) (Shimabukuro & Smith, 1991). Por meio do MLME, são extraídas as imagens frações e assume-se que os valores dos pixels são combinações lineares de reflectância de uma série de componentes, chamados de endmembers (Equação 1).

$$R_i = \sum_{j=i}^n f_j r_{i,j} + \varepsilon_i \quad (1)$$

Onde: R_i representa a refletância espectral na banda espectral i ; $r_{i,j}$ é a refletância espectral do componente j na banda espectral i (endmember); f_j é a proporção do componente j dentro do pixel; e ε_i é o resíduo da banda espectral i .

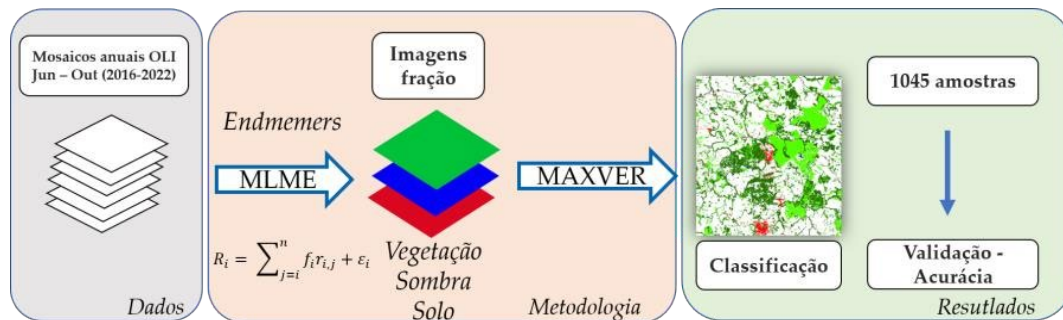


Figura 2. Fluxograma da metodologia aplicada ao estudo

A partir das imagens fração (solo, sombra e vegetação), foi aplicado o algoritmo de classificação MAXVER disponível no SPRING para a classificação individualmente, e posteriormente foi realizada a edição para a classificação final.

Resultados e discussão

A Figura 3 apresenta o resultado da classificação para a área de estudo em 2022 e a matriz de confusão para verificar a acurácia do mapeamento. A acurácia global do mapeamento foi de 86,7% e o valor de Kappa de 0,821. O mapeamento de espécies de curta rotação como o *Eucalyptus* spp., exige grande quantidade de imagens de satélite ao longo do tempo e da qualidade da resolução espacial para identificar os padrões dos plantios florestais e reduzir problemas de pixels mistos (le Maire et al., 2014). O uso do MLME melhora os resultados da classificação de dados de sensoriamento remoto como observado na literatura (le Maire et al., 2011; Busetto et al., 2008; Shimabukuro & Smith, 1991).

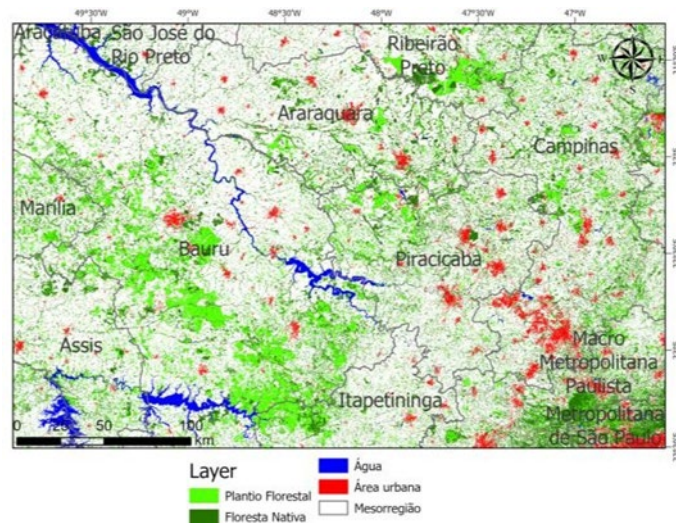


Figura 3. Classificação MAXVER para a área de estudo em 2022 e matriz de confusão

Para a identificação dos estádios fenológicos e definição dos ciclos de rotação do Eucalipto o MLME demonstra eficácia nos resultados. Nos pontos selecionados (A–F), observa-se o início e/ou fim de um ciclo de rotação a partir do momento que a curva da fração solo apresenta maior valor e a vegetação o menor valor (Figura 4). Então, em geral, a curva de vegetação se mantém maior durante todo o ciclo da espécie até a próxima rotação.

Desta forma o método identifica as plantações de *Eucalyptus* spp. de rotação curta, explorando o padrão de mudança espectral da vegetação devido à rotação de culturas arbóreas e às características espectrais das plantações de *Eucalyptus* spp. nos comprimentos de onda específicos demonstra ser eficaz (Shimabukuro et al., 2022; Deng et al., 2020)

Conclusões

Os mosaicos Sentinel-2 MSI, compostos pelos valores máximos da fração vegetação, destacaram com precisão as áreas ocupadas por plantações florestais durante o período de estudo (2016–2022) na área de estudo. Os estádios fenológicos das plantações de *Eucalyptus* spp. foram observados na série temporal anual das imagens das três frações (vegetação, sombra e solo). A série temporal analisada neste trabalho mostrou-se adequada para detectar os ciclos de rotação dos plantios de *Eucalyptus* spp.

Considerando a dificuldade de mapear os plantios florestais de acordo com as espécies arbóreas utilizando o sensoriamento remoto, este trabalho pode contribuir com diferentes métodos para a classificação e identificação de ciclos de rotação dos plantios de *Eucalyptus* spp. Por essa razão, esses resultados são muito úteis para o planejamento e o manejo, especialmente para empresas



privadas e órgãos governamentais, e para ajudar a desenvolver um método automático para mapear áreas de plantio florestal em escalas regional e global.

Referências bibliográficas

- ARAI, E.; SANO, E.E.; DUTRA, A.C.; CASSOL, H.L.G.; HOFFMANN, T.B.; SHIMABUKURO, Y.E. Vegetation fraction images derived from PROBA-V data for rapid assessment of annual croplands in Brazil. *Remote Sensing*. v.12, p.1152, 2020.
- BUSETTO, L.; MERONI, M.; COLOMBO, R. Combining medium and coarse spatial resolution satellite data to improve the estimation of sub-pixel NDVI time series. *Remote Sens. Environ.* v.112, p.118–131, 2008.
- CASSOL, H.L.G.; ARAI, E.; EYJI SANO, E.; DUTRA, A.C.; HOFFMANN, T.B.; SHIMABUKURO, Y.E. Maximum Fraction Images Derived from Year-Based Project for On-Board Autonomy- Vegetation (PROBA-V) Data for the Rapid Assessment of Land Use and Land Cover Areas in Mato Grosso State, Brazil. *Land*, v.9, 139, 2020.
- DENG, X.; GUO, S.; SUN, L.; CHEN, J. Identification of Short-Rotation Eucalyptus Plantation at Large Scale Using Multi-Satellite Imageries and Cloud Computing Platform. *Remote Sensing*. v.12, 2153, 2020.
- LE MAIRE, G.; MARSDEN, C.; NOUVELLON, Y.; GRINAND, C.; HAKAMADA, R.; STAPE, J.-L.; LACLAU, J.-P. MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. *Remote Sens. Environ.* v.115, p.2613–2625, 2011.
- LE MAIRE, G.; DUPUY, S.; NOUVELLON, Y.; LOOS, R.A.; HAKAMADA, R. Mapping short-rotation plantations at regional scale using MODIS time series: Case of eucalypt plantations in Brazil. *Remote Sens. Environ.* v.152, p.136–149, 2014.
- LUNETTA, R.S.; KNIGHT, J.F.; EDIRIWICKREMA, J.; LYON, J.G.; WORTHY, L.D. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sens. Environ.* v.105, p.142– 154, 2006.
- MCCLOY, K.R. Development and Evaluation of Phenological Change Indices Derived from Time Series of Image Data. *Remote Sensing*. v.2, p.2442–2473, 2010.
- SHIMABUKURO, Y.E.; SMITH, J.A. The Least-Squares Mixing Models to Generate Fraction Images Derived From Remote Sensing Multispectral Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. v.29, p.16–20, 1991.
- SHIMABUKURO, Y.E.; ARAI, E.; DA SILVA, G.M.; DUTRA, A.C.; MATAVELI, G.; DUARTE, V.; MARTINI, P.R.; CASSOL, H.L.G.; FERREIRA, D.S.; JUNQUEIRA, L.R. Mapping and Monitoring Forest Plantations in São Paulo State, Southeast Brazil, Using Fraction Images Derived from Multiannual Landsat Sensor Images. *Forests* 2022, v.13, p.1716, doi:10.3390/f13101716.
- WARDLOW, B.D.; KASTENS, J.H.; EGBERT, S.L. Using USDA crop progress data for the evaluation of greenup onset date calculated from MODIS 250-meter data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* v.72, p.1225–1234, 2006.

