

CLASSIFICAÇÃO DE IMAGEM PARA A IDENTIFICAÇÃO DE ESTÁGIOS FENOLÓGICOS DE CULTIVOS COMERCIAIS DE PINUS NO SUL DO BRASIL

William Gaida¹, Fábio Marcelo Breunig¹, Edison Rogério Perrando¹; Sérgio Luiz Bostelmann²,
Vlademir Martarello², Bruno Conte²

¹Universidade Federal de Santa Maria – Campus Frederico Westphalen – UFSM
Linha 7 de Setembro, caixa postal 73, 98400-000, Frederico Westphalen, RS.
E-mail: ufsm.william@gmail.com; {[breunig](mailto:breunig@ufsm.br); [edison.perrando](mailto:edison.perrando@ufsm.br)}@ufsm.br
²ADAMI S/A, Rua Nereu Ramos, nº 196 - Centro, 89500-076, Caçador – SC.
E-mail: {[sergio.bostelmann](mailto:sergio.bostelmann@adami.com.br); [vlademir.martarello](mailto:vlademir.martarello@adami.com.br); [bruno.conte](mailto:bruno.conte@adami.com.br)}@adami.com.br

RESUMO

Este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de dois métodos de classificação de imagens para a identificação de estágios de desenvolvimento fenológico de *Pinus taeda* L., em plantios comerciais da empresa ADAMI S/A, no Estado de Santa Catarina. A metodologia desenvolvida consistiu na aquisição de imagens de reflectância de superfície de 14 projetos de plantio, implementados no período entre 2001 e 2017. As medidas de reflectância de cada projeto de plantio foram utilizadas para identificar os estágios fenológicos por meio de análise de agrupamento. Enquanto, índices de vegetação foram utilizados para determinar os limiares das regras de classificação para a construção da árvore de decisão. A partir dos resultados obtidos, foram identificados quatro estágios de desenvolvimento fenológico por meio da reflectância dos projetos de plantio, sendo o classificador de rede neural, o que apresentou melhor desempenho em relação à diferenciação destes estágios.

Palavras-chave – sensoriamento remoto, Sentinel-2, silvicultura, resposta espectral, classificadores.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the performance of two image classification methods for the identification of Pinus taeda L. phenological development stages, in commercial plantations areas of ADAMI S/A company, in the Santa Catarina State. The developed methodology consisted in acquisition of surface reflectance images of 14 planting projects, implemented in the period between 2001 and 2017. Reflectance measurements of each planting project were used to identify the phenological stages through the cluster analysis. While vegetation indices were used to determine the thresholds of classification rules for decision tree construction. From the obtained results, four phenological development stages were identified from the planting projects reflectance, being the neural network classifier, which presented the best performance in relation to distinction of these stages.

Keywords – remote sensing, Sentinel-2, forestry, spectral response, classifiers.

1. INTRODUÇÃO

A silvicultura no Brasil tem crescido nas últimas décadas, impulsionada pela inserção de empresas multinacionais que têm desenvolvido diversos empreendimentos florestais principalmente na Região Sul. Neste contexto, o *Pinus taeda* L. é a espécie florestal introduzida que mais tem se destacado nesta região, devido a um conjunto de características como elevada produtividade e rápida adaptação às condições edafoclimáticas regionais, definidas por ocorrências de baixas temperaturas, geadas, solos ácidos e com baixo teor de nutrientes [1]. Neste sentido, a obtenção de informações sobre a fenologia dos cultivos é de grande importância para a tomada de decisões referentes à execução de operações de intervenção, manejo e controle do desenvolvimento dos cultivos.

O sensoriamento remoto tem se consolidado como uma ferramenta com grande potencial de aplicação em estudos florestais, permitindo a estimativa de parâmetros biofísicos a partir da reflectância derivada de imagens de sistemas sensores [2]. Sendo estas cada vez mais utilizadas em estudos sobre as características fenológicas da vegetação [3].

A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto em cultivos florestais comerciais possibilita a aquisição de medidas de resposta espectral, as quais podem ser classificadas com uso de algoritmos de acordo com diferentes critérios de análise para a identificação de parâmetros relativos ao seu desenvolvimento e produtividade. A classificação de imagens constitui-se em uma das aplicações mais utilizadas no campo do sensoriamento remoto [4].

Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de dois métodos de classificação de imagens baseados em rede neurais e árvore de decisão para a identificação de estágios de desenvolvimento fenológico de cultivos comerciais de *Pinus taeda* L., visando o desenvolvimento de uma metodologia para auxiliar a tomada de decisões relativas a intervenções e manejo necessários ao desenvolvimento da silvicultura.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

Pertencente à empresa ADAMI S/A, a área de estudo compreende um empreendimento comercial de plantio de *Pinus taeda* L., localizado no interior do município de Ponte Serrada, Região Oeste do Estado de Santa Catarina. A área de estudo compreende povoadamentos florestais de pinus em quase todas as idades de desenvolvimento ao longo de sua rotação, divididas em projetos (idade) de plantio (Figura 1).

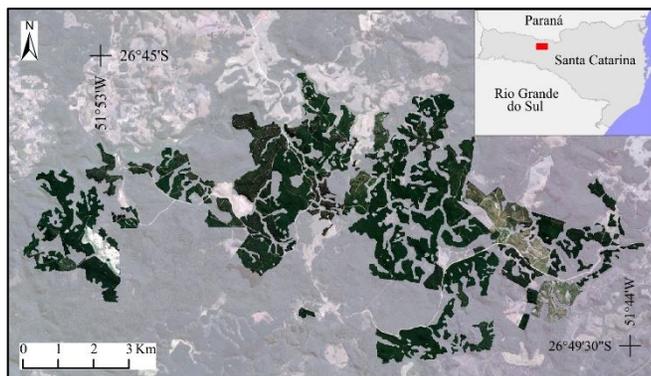


Figura 1. Localização e situação da área de estudo.

2.2. Aquisição e processamento de imagem do sensor MSI

Uma imagem do sensor MSI a bordo do satélite Sentinel-2B foi adquirida para a data 05 de setembro de 2018, por meio do repositório *Sentinels Scientific Data Hub* (SciHub) da *European Space Agency* (ESA), disponível em: <<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>>. A escolha da imagem considerou os critérios de condição climática (ausência de nebulosidade sobre a área de estudo) e espaço-temporal (abrangência de projetos de plantio representativos de um ciclo completo de desenvolvimento fenológico).

O processamento da imagem consistiu na correção dos efeitos atmosféricos e topográficos, sendo realizada por meio do modelo de correção atmosférica *Atmospheric/ Topographic Correction for Satellite Imagery* (ATCOR-3) [5]. Para a correção atmosférica foram obtidos o valor de visibilidade média inicial da imagem e as máscaras de corpos de água e cobertura de cirros. A visibilidade média foi calculada a partir de medidas de profundidade óptica de aerossóis e expoente de Angstrom, obtidas a partir do produto *MOD08_D3 Atmosphere Daily Global Product*, derivado do sensor MODIS, adquirido por meio do repositório de dados atmosféricos Giovanni da NASA, disponível em: <<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>>.

A correção dos efeitos topográficos foi realizada no modelo ATCOR-3, sendo utilizado um modelo digital de elevação *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 metros para o cálculo das variáveis topográficas.

A aplicação destes processamentos foi realizada nas bandas com resolução espacial de 10 e 20 metros, correspondentes às faixas do visível, borda do vermelho,

infravermelho próximo e de ondas curtas. As bandas com resolução de 20 metros foram reamostradas para 10 metros, sendo este processamento necessário para a correção atmosférica pelo modelo ATCOR-3.

2.3. Cálculo dos índices de vegetação

Os índices de vegetação *Enhanced Vegetation Index* (EVI) [6] e *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) [7] foram obtidos por meio da aplicação das respectivas Equações 1 e 2:

$$EVI = G * \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{red})}{(\rho_{NIR} + C_1 * \rho_{red} - C_2 * \rho_{blue} + L)} \quad (1)$$

Onde: ρ_{NIR} corresponde a banda do infravermelho próximo (banda 8 (833 nm)), ρ_{red} a banda do vermelho (banda 4 (665 nm)) e ρ_{blue} a banda do azul (banda 2 (492,1 nm)), os coeficientes G, C₁, C₂ e L correspondem aos valores 2,5, 60, 7,5 e 1, respectivamente.

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

2.4. Aplicação dos métodos de classificação de imagens

Para a avaliação da efetividade dos métodos de classificação fez-se necessária a aquisição da resposta espectral de 14 projetos de plantio de *Pinus taeda* L. realizados no período entre 2001 e 2017. A partir dos talhões de cultivo de cada projeto de plantio, definidos em campo, foi delimitado um *buffer* de 30 metros (aproximadamente três pixels) em direção ao interior de cada unidade, com o objetivo de evitar a contaminação pela mistura espectral presente nas bordas dos talhões de cultivos. A partir do novo limite foram extraídos os valores de reflectância dos pixels de amostras correspondentes a 30% do total de pixels de cada projeto de plantio, os quais foram submetidos a análise de agrupamento *cluster* para a definição de padrões de respostas espectrais correspondentes aos estágios de desenvolvimento fenológico de um ciclo de 18 anos.

Dois métodos de classificação de imagens foram avaliados: redes neurais artificiais e árvore de decisão. A classificação por redes neurais artificiais foi realizada no software ENVI versão 5.3 [8], sendo construída com base nas respostas espectrais amostradas dos estágios fenológicos dos cultivos e aplicada na imagem analisada, considerando todas as bandas avaliadas.

A classificação por árvore de decisão foi realizada com a construção da regra de classificação (Figura 2), considerando os limiares observados a partir da aplicação de análise de agrupamentos da resposta espectral dos projetos de plantio e fatiamento dos valores dos índices de vegetação avaliados, buscando-se eliminar alvos que não correspondem a talhões de plantio, como corpos de água, áreas de cultivo agrícola e vegetação nativa.

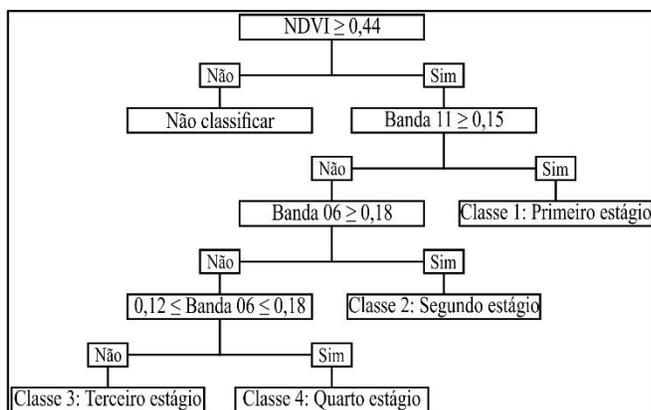


Figura 2. Árvore de decisão construída para a classificação dos estágios fenológicos.

2.5. Análise dos dados

Os resultados obtidos a partir da aplicação dos dois métodos de classificação de imagem foram avaliados por meio de matriz de confusão, sendo analisados os erros de omissão e comissão entre as classes correspondentes a cada estágio fenológico, juntamente com o cálculo do índice Kappa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a análise de agrupamentos, aplicada às respostas espectrais de cada projeto de plantio, foram identificados quatro grupos distintos, como mostrado na Figura 3. Considerando o ciclo de duração do cultivo de 18 anos e as diferenças na resposta espectral de cada grupo, estes grupos podem ser associados à ocorrência de diferentes estágios de desenvolvimento fenológico, dos cultivares de *Pinus taeda* L.

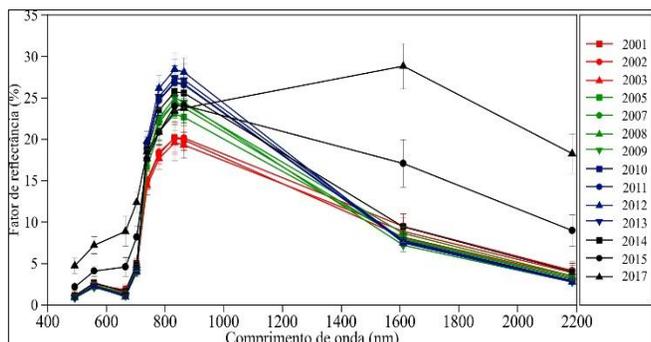


Figura 3. Resposta espectral média dos projetos de plantio avaliados, agrupados de acordo com o estágio fenológico.

Desta forma o primeiro estágio fenológico está associado aos cultivos estabelecidos nos anos de 2014, 2015 e 2017, sendo caracterizado principalmente pela ausência de dossel vegetativo e grande influência do substrato; o segundo aos plantios realizados nos anos de 2010, 2011, 2012 e 2013, apresentando maior vigor vegetativo devido à grande produção de pigmentos fotossintetizantes, como mostrado na Figura 4 a partir do crescimento da resposta dos índices de vegetação; o

terceiro aos anos de 2005, 2007, 2008 e 2009, e o quarto estágio aos plantios realizados nos anos de 2001, 2002 e 2003. No terceiro e quarto estágios ocorre uma diminuição no vigor vegetativo, como mostrado pelos índices de vegetação (Figura 4), embora neste período ocorra o fechamento do dossel vegetativo, o que pode caracterizar influência do efeito de sombreamento causado pelo próprio dossel.

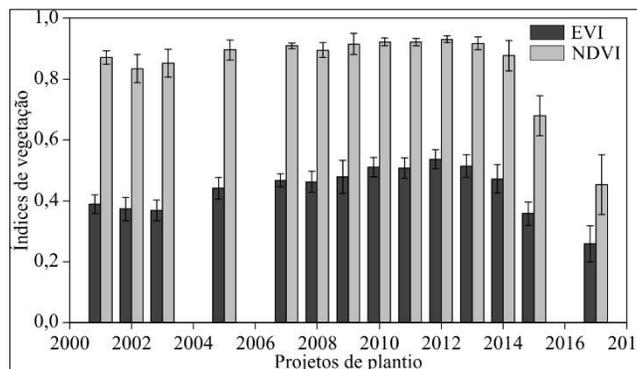


Figura 4. Caracterização do vigor vegetativo dos projetos de plantio, a partir dos índices de vegetação EVI e NDVI.

Os resultados obtidos com a aplicação dos classificadores avaliados na imagem Sentinel-2 (Figura 5) mostraram um melhor desempenho na identificação dos estágios fenológicos por parte do classificador de redes neurais artificiais (Figura 5a), em relação aos talhões determinados em campo e classificados de acordo com a resposta espectral média dos projetos de plantio (Figura 3), sendo verificado um índice Kappa de 0,86. Com relação à classificação realizada pelo método de árvore de decisão (Figura 5b), o índice Kappa encontrado foi de 0,64.

Considerando os estágios de desenvolvimento fenológico, em ambas as aplicações (Figura 5), a classe referente ao terceiro estágio fenológico foi a que mais apresentou erros de comissão, sendo confundida com o segundo e o quarto estágios. Embora este estágio fenológico apresente uma maior refletância nas faixas da borda do vermelho e infravermelho próximo (Figura 3), a maior parte da resposta espectral é inferior ou muito próxima a resposta verificada no segundo estágio, o que pode ocasionar confusão nos classificadores.

A análise da matriz de confusão (Tabela 1) mostrou que a aplicação da rede neural foi mais efetiva para a classificação dos estágios fenológicos, sinalizando um bom desempenho para a classificação do primeiro, segundo e quarto estágios (com desempenho superior a 81%), sendo o maior erro ocorrido na distinção do terceiro estágio, o qual em sua maior parte foi classificado como segundo estágio (81,09%). A classificação por árvore de decisão apresentou um desempenho inferior ao classificador anterior, sendo o melhor resultado alcançado na identificação do quarto estágio fenológico (98,72%), enquanto que o pior resultado foi alcançado no terceiro estágio, o qual não foi identificado pela classificação sendo agrupado nas classes do segundo (43,57%) e quarto estágios (56,43%).

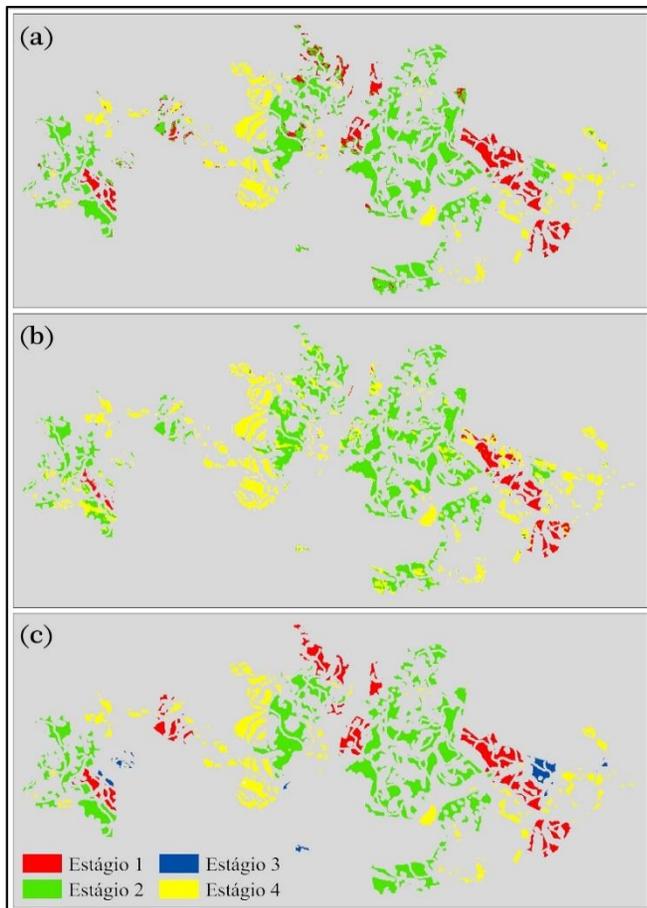


Figura 5. Estágios fenológicos dos cultivos de pinus obtidos pelos classificadores (a) rede neural artificial e (b) árvore de decisão, comparados à (c) referência de plantio em campo.

Tabela 1. Matriz de confusão entre as classificações resultantes e as referências de campo (ref.).

| Classes | | Ref. 1* | Ref. 2* | Ref. 3* | Ref. 4* | Total * |
|-------------------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Rede neural | Não classificado | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Estágio 1 | 81,43 | 2,83 | 6,98 | 1,19 | 16,96 |
| | Estágio 2 | 17,60 | 97,03 | 81,09 | 0,76 | 58,02 |
| | Estágio 3 | 0,00 | 0,01 | 1,16 | 0,07 | 0,06 |
| | Estágio 4 | 0,96 | 0,13 | 10,78 | 97,98 | 24,96 |
| Total | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Árvore de decisão | Não classificado | 0,00 | 5,28 | 0,00 | 0,00 | 0,21 |
| | Estágio 1 | 40,56 | 0,00 | 0,00 | 0,21 | 7,49 |
| | Estágio 2 | 31,11 | 85,90 | 43,57 | 0,35 | 53,32 |
| | Estágio 3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,52 | 0,13 |
| | Estágio 4 | 23,05 | 14,10 | 56,43 | 98,72 | 38,04 |
| Total | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

*Valores expressos em porcentagem.

4. CONSIDERAÇÕES

Considerando a relação entre tamanho das amostras e os resultados obtidos, pode-se considerar o desempenho de ambos os classificadores avaliados como satisfatório. Embora a árvore de decisão tenha apresentado um menor desempenho em relação aos resultados alcançados com a aplicação do classificador de rede neural, este classificador possui um grande potencial de aplicação em estudos florestais devido a sua capacidade de operação que permite a utilização de diversos tipos de entrada de dados, como: imagens ópticas, índices espectrais, imagens de radar, entre outros. Destaca-se, contudo, a necessidade de novos estudos exploratórios sobre a utilização destes classificadores na distinção de estágios de desenvolvimento fenológico.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa ADAMI S/A pelo suporte financeiro e assistência de campo. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processos nº 309030/2017-0 e 113769/2018-0) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] Bognola, I. A. *Unidades de manejo para Pinus taeda Linnaeus no planalto norte catarinense, com base em características do meio físico*. 2007. 160 p. Tese (doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- [2] Liu, L.; Zhang, X.; Yu, Y.; Gao, F.; Yang, Z. Real-time monitoring of crop phenology in the Midwestern United States using VIIRS observations. *Remote Sensing*, v. 10, n. 10, 2018.
- [3] Käfer, P. S.; Rex, F. E.; Breunig, F. M.; Balbinot, R. Modeling Pinus Elliotti growth with multitemporal Landsat data: a study case in southern Brazil. *Bulletin of Geodetic Sciences*, v. 24, n. 3, p. 286-299, 2018.
- [4] Vrieling, A.; Meroni, M.; Darvishzadeh, R.; Skidmore, A. K.; Wang, T.; Zurita-Milla, R.; Oosterbeek, K.; O'Connor, B.; Paganini, M. Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island. *Remote Sensing of Environment*, v. 215, p. 517-529, 2018.
- [5] Richter, R.; Schläpfer, D. *Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery (ATCOR-2/3 user guide, version 8.2)*. DLR report DLR-IB 565-02/12, Wessling, Germany, 2012.
- [6] Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E. P.; Gao, X.; Ferreira, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, p. 195-213, 2002.
- [7] Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 3., Washington- DC, 1973. *Proceedings...* Washington – DC, 1973.
- [8] Exelis. *ENVI version 5.3*. Boulder, Colorado: Exelis Visual Information Solutions, Inc., 2015.