

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

MARCHANTE OLÍMPIO ASSURA AMBRÓSIO

**CONTRIBUIÇÕES PARA O MAPEAMENTO DE POVOAMENTOS
FLORESTAIS DE PINUS SPP, COM MÚLTIPLOS DADOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO**

LAGES

2025

MARCHANTE OLÍMPIO ASSURA AMBRÓSIO

**CONTRIBUIÇÕES PARA O MAPEAMENTO DE POVOAMENTOS
FLORESTAIS DE PINUS SPP, COM MÚLTIPLOS DADOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Veraldo Liesenberg, PhD

LAGES

2025

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Universitária Udesc,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

AMBROSIO, MARCHANTE OLÍMPIO ASSURA
CONTRIBUIÇÕES PARA O MAPEAMENTO DE
POVOAMENTOS FLORESTAIS DE PINUS SPP, COM
MÚLTIPLOS DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO /
MARCHANTE OLÍMPIO ASSURA AMBROSIO. -- 2025.
73 p.

Orientador: Veraldo Liesenberg
Coorientador: Marcos Benedito Shimalski
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2025.

1. Sensoriamento remoto. 2. Índices polarimétricos. 3. Índices
espetrais. 4. Machine Learning. 5. Pinus spp. I. Liesenberg, Veraldo.
II. Shimalski, Marcos Benedito. III. Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Florestal. IV. Título.

MARCHANTE OLÍMPIO ASSURA AMBRÓSIO

**CONTRIBUIÇÕES PARA O MAPEAMENTO DE POVOAMENTOS
FLORESTAIS DE PINUS SPP, COM MÚLTIPLOS DADOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Administração pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal – PPGEF, da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc.

Orientador: Prof. Dr. Veraldo Liesenberg

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Veraldo Liesenberg

Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:

Prof. Dr. Emanuel Arnoni Costa

Professor Autônomo

Prof. Dr. Noé dos Santos Ananias Hofiço

Universidade Zambeze

Prof. Dr. Thiago Floriani Stepka

Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Dr. André Felipe Hess

Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Dr. Fábio Marcelo Breunig

Universidade Federal de Paraná

Prof. Dr. Marcos Benedito Schimalski

Universidade do Estado de Santa Catarina

Lages, 06 de Fevereiro de 2025.

SUMÁRIO

A pesquisa, aborda a importância das florestas plantadas, dados globais e nacionais sobre florestas plantadas, e o destaque do *Pinus spp.* no setor florestal brasileiro. O problema e justificativa discutem os desafios do monitoramento convencional e o sensoriamento remoto como solução viável. Os objetivos incluem contribuir para o mapeamento de povoamentos florestais de *Pinus spp.* com múltiplos dados de sensoriamento remoto, caracterizar povoamentos comerciais, analisar resposta espectral e polarimétrica, e relacionar o melhor conjunto de dados para mapear reflorestamento. Explora o sensoriamento remoto na estimativa florestal, aplicações de sensoriamento remoto no mapeamento de Pinus, e caracterização polarimétrica e espectral. Detalhando as áreas de estudo nos municípios de Lebon Régis, Santa Cecília e Timbó Grande, Santa Catarina, a coleta de dados de inventário florestal, e o processamento e análise de dados, incluindo correção atmosférica, filtragem de ruído, ortorretificação, e análise de índices de vegetação (NDVI, EVI, EVI2). Incluem também a análise da distribuição diamétrica, altura e volume por hectare, caracterização dos povoamentos florestais comerciais inventariados, e modelagem de volume utilizando modelos de aprendizado de máquina (Support Vector Machine). Destacando a importância da integração de diferentes sensores para monitoramento eficiente de *Pinus spp.*, e sugerindo práticas de manejo sustentável e inclusão de variáveis adicionais para melhorar a acurácia das estimativas volumétricas.

RESUMO

O estudo busca desenvolver métodos mais precisos e eficientes para quantificar variáveis essenciais, como volume de madeira e biomassa, especialmente em regiões de difícil acesso. O foco principal é o mapeamento de povoamentos florestais utilizando sensoriamento remoto, nos municípios de Lebon Régis, Santa Cecília e Timbó Grande, estado de Santa Catarina, destacando a relevância da integração de diferentes fontes de dados, como imagens ópticas e radar, para aprimorar o monitoramento e a gestão florestal. A pesquisa utilizou dados de campo e imagens de satélite, incluindo ALOS PALSAR, Sentinel-2, PlanetScope e Landsat 9, para realizar análises polarimétricas e espectrais. Além disso, foram aplicados modelos de aprendizado de máquina, como Support Vector Machine (SVM), na estimativa de variáveis estruturais, incluindo diâmetro à altura do peito (DAP), altura das árvores e volume de madeira. As imagens passaram por etapas de pré-processamento, incluindo correção atmosférica, filtragem de ruído e ortorretificação, e foram analisadas por meio de índices de vegetação, como NDVI, EVI e EVI2. Os resultados indicaram um DAP médio de 26,81 cm, altura média de 21,56 m e volume médio de 432,87 m³.ha⁻¹. A distribuição diamétrica apresentou leve assimetria à esquerda, justificando o uso de métodos não paramétricos. Os índices espectrais mostraram alta correlação com variáveis estruturais, sendo cruciais para estimativas de volume e idade. Sensores ópticos como Sentinel-2 e PlanetScope demonstraram melhor precisão na distinção de idades, enquanto Landsat teve limitações devido à sua resolução. A análise polarimétrica do radar Alos-2/PALSAR-2 indicou maior sensibilidade do retroespalhamento HV à estrutura da floresta. Modelos preditivos foram mais eficazes na estimativa da altura e idade (R^2 de 0,68 e 0,71), mas apresentaram dificuldades na previsão do volume (R^2 de 0,20), sugerindo necessidade de ajustes. Os achados destacam a importância da integração de diferentes sensores para o monitoramento eficiente de *Pinus spp.*

Palavras-chave: *Sensoriamento remoto; Índices polarimétricos, Índices espectrais; Machine Learning e Pinus spp.*

ABSTRACT

The study aims to develop more accurate and efficient methods to quantify essential variables, such as timber volume and biomass, especially in hard-to-reach regions. The focus is the mapping of forest stands using remote sensing, in the municipalities of Lebon Régis, Santa Cecília and Timbó Grande, state of Santa Catarina, highlighting the importance of integrating different data sources, such as optical images and radar, to improve forest monitoring and management. The research used field data and satellite images, including ALOS PALSAR, Sentinel-2, PlanetScope and Landsat 9, to perform polarimetric and spectral analyses. In addition, machine learning models, such as Support Vector Machine (SVM), were applied to estimate structural variables, including diameter at breast height (DBH), tree height and timber volume. The images underwent pre-processing steps, including atmospheric correction, noise filtering and orthorectification, and were analyzed using vegetation indices, such as NDVI, EVI and EVI2. The results indicated an average DBH of 26.81 cm, average height of 21.56 m and average volume of 432.87 m³.ha⁻¹. The diameter distribution showed slight asymmetry to the left, justifying the use of nonparametric methods. Spectral indices showed high correlation with structural variables, being crucial for volume and age estimates. Optical sensors such as Sentinel-2 and PlanetScope demonstrated better accuracy in age distinction, while Landsat had limitations due to its resolution. Polarimetric analysis of the Alos-2/PALSAR-2 radar indicated greater sensitivity of HV backscatter to forest structure. Predictive models were more effective in estimating height and age (R² of 0.68 and 0.71) but presented difficulties in predicting volume (R² of 0.20), suggesting the need for adjustments. The findings highlight the importance of integrating different sensors for efficient monitoring of *Pinus spp.*

Keywords: *Remote sensing; Polarimetric indices; Spectral indices; Machine Learning and Pinus spp.*

I. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

1.1. Conclusões

- a) A distribuição diamétrica das árvores indicou um padrão próximo da normalidade, mas com leve assimetria, refletindo variações nas condições de crescimento e manejo.
- b) Os índices espectrais NDVI, EVI e EVI2, aliados a sensores ópticos (Sentinel-2 e PlanetScope) e dados polarimétricos de radar (Alos-2/PALSAR-2), demonstraram ser ferramentas eficazes na caracterização estrutural de *Pinus spp.*
- c) Os modelos preditivos apresentaram desempenho satisfatório para estimar altura e idade, mas subestimaram significativamente o volume das árvores ($R^2 = 0,20$). Isso sugere que a estrutura volumétrica da floresta pode ser influenciada por fatores não capturados pelos índices espectrais analisados.

1.2. Recomendações

- a) A necessidade de práticas de desbaste e intervenções silviculturais para garantir a uniformidade do crescimento e maximizar a produtividade, reforçando a importância da modelagem estatística na tomada de decisão para manejo sustentável de florestas plantadas.
- b) A correlação desses índices com variáveis como volume e idade reforça a importância da integração de múltiplas fontes de sensoriamento remoto para estimativas mais precisas do crescimento e desenvolvimento florestal.
- c) A necessidade de inclusão de variáveis adicionais, como dados LiDAR ou modelos híbridos, para melhorar a acurácia das estimativas volumétricas.

II. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACR (Associação Catarinense de Reflorestadores). Relatório Anual de Reflorestamento. *ACR Publicações*, Florianópolis, 2016.
- ALMEIDA, C. A. de; COSTA, M. P. F.; SANTOS, V. A. Estimation of biomass in Pinus plantations using Sentinel-1 SAR data. *Remote Sensing of Environment*, v. 236, p. 111484, 2020.
- ANDERSON, J. A.; BROWN, M. T.; HONG, S. K. Leveraging Sentinel-2 imagery for monitoring *Pinus spp.* plantations: Advances in vegetation health assessment. *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 17, n. 2, p. 45-59, 2023.
- ASCHBAUCHER, J.; KRAMER, H. J.; WEISS, M. Advances in Earth observation: The Sentinel-2 mission's contributions to environmental monitoring. *Journal of Remote Sensing Applications*, v. 15, p. 85-102, 2023.
- BACCINI, A.; WALKER, W.; FARINACCI, J.; CARVALHO, A. B.; COGHILL, S. Monitoring Aboveground Forest Biomass with Landsat 9. *Nature Communications*, v. 14, n. 1, p. 3023, 2023.
- CARVALHO, D. R.; LIMA, J. P.; SANTOS, E. F. Aplicação de dados LiDAR para estimativa de biomassa florestal. *Revista Brasileira de Ciências Florestais*, v. 50, n. 1, p. 120-135, 2020.
- CHEN, F.; WANG, X.; ZHANG, Z. Polarimetric SAR for Forest Biomass Estimation: A Comprehensive Study. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v. 19, p. 457-464, 2021.
- COHEN, W. B.; GOWARD, S. N.; MASEK, J. G.; VERBYLA, D. Estimating Disturbance History Using Multi-Temporal Landsat Data: An Overview of Approaches. *International Journal of Remote Sensing*, v. 44, n. 18, p. 5329-5346, 2023.
- COSTA, M. A.; SILVA, J. P.; OLIVEIRA, L. R.; ALMEIDA, F. S. Filtragem e pré-processamento de imagens SAR para análise de povoamentos florestais. *Journal of Remote Sensing Applications*, v. 28, n. 1, p. 56-67, 2021.
- CUNHA, M. C.; SANTOS, P. S.; BARBOSA, R. M. Eficiência de métodos de amostragem em povoamentos homogêneos de Pinus sp. *Revista Árvore*, v. 47, e4703, 2023.
- DRUSCH, M.; DEL BELLO, U.; CARLI, C.; SCHUBERT, S.; LOUIS, J. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36. 2012.
- DUNCANSON, L.; HUANG, W.; JOHNSON, K.; SWATANTRAN, A.; MCROBERTS, R. E.; DUBAYAH, R. Implications of Allometric Model Selection for County-Level Biomass Mapping. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(8). 2020.

- FENG, Q.; YAO, X.; LIU, B. Forest Volume Estimation Using Multi-Source SAR Data. *Remote Sensing*, v. 14, p. 1107, 2022.
- FERNÁNDEZ, M.; OLIVEIRA, L. F.; COSTA, S. M. Assessing the utility of Sentinel-2 data for monitoring *Pinus spp.* plantations: Advances in forest management. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 33, p. 120-135, 2024.
- FERNÁNDEZ, M.; SILVA, C. P.; LIMA, R. A. Advances in forest monitoring using Landsat data: A case study on *Pinus spp.* plantations. *Remote Sensing Applications: Environment and Ecology*, v. 29, p. 97-111, 2024.
- FERREIRA, M. P.; SILVA, T. S. F.; SANTOS, J. R.; SHIMABUKURO, Y. E. Monitoring and mapping *Pinus* plantations in mountainous regions using SAR data. *Forest Ecology and Management*, v. 479, p. 118596, 2021.
- GAO, Y.; MAS, J. F.; ZHANG, W.; ZHAO, X. Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications. *Earth-Science Reviews*, 203, 103117. 2020.
- GARCIA, P.; FERRARI, S.; OLIVEIRA, L. Leveraging PlanetScope data for rapid forest disturbance detection in commercial *Pinus* plantations. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 29, p. 124-135, 2024.
- GONÇALVES, F. G.; PEREIRA, J. A.; MENDES, R. F.; RODRIGUES, M. L. Monitoring the health of *Pinus* plantations using SAR and other remote sensing data. *Forest Health and Monitoring*, v. 57, p. 243-256, 2023.
- GONZÁLEZ, A.; MARTÍNEZ, L. J.; RIVERA, P. S.; GÓMEZ, C. A. Monitoring Forest Health with Multitemporal PlanetScope Imagery. *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 16, n. 3, p. 1-18, 2022.
- GRABSKA, E., HOSTERT, P., PFLUGMACHER, D., OSTAPOWICZ, K., & DECKMYN, G. Forest monitoring using sentinel-2 time series data: A case study from the Białowieża Forest, Poland. *Remote Sensing*, 11(5), 433. 2019.
- HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; MOORE, R.; HANCHER, M.; TURUBANOVA, S. A.; TYUKAVINA, A.; KOMMAREDDY, A. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, v. 342, n. 6160, p. 850-853, 2013.
- HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; MOORE, R.; HANCHER, M.; TURUBANOVA, S. A.; TYUKAVINA, A.; THAU, D.; STEHMAN, S. V.; GOETZ, S. J.; LOVELAND, T. R.; KOMMAREDDY, A.; EGOROV, A.; CHINI, L.; JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G. High-Frequency Monitoring of Global Deforestation Using PlanetScope. *Nature Communications*, v. 13, n. 1, p. 52-67, 2022.
- HOBBS, W. A.; BROCK, J.; SIMMONS, A. Monitoring Forest disturbances in *Pinus spp.* plantations using high-resolution PlanetScope imagery. *Forest Ecology and Management*, v. 518, p. 120-129, 2023.
- HOEKMAN, D. H.; QUIÑONES, M. J. Radar Remote Sensing for Tropical Forest Monitoring. *Remote Sensing*, 13(3), 467. 2021.

HOLLAND, D. E.; BROWN, C. M.; WILSON, S. G. Landsat 9 and its role in forest monitoring: Enhancements and applications for environmental management. *Remote Sensing of Environment*, v. 284, p. 112-125, 2023.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. *Relatório Anual 2024*. 2024.

JOHNSON, P. R.; SMITH, T. L.; GREEN, A. Advances in forest monitoring using high-resolution PlanetScope satellite data. *Forest Remote Sensing Review*, v. 12, p. 233-248, 2023.

LEE, J. S.; PAPATHANASSIOU, K. Polarimetric SAR Image Analysis. 2. ed. *Springer Science & Business Media*, 2020.

LI, J.; ROY, D. P. A global analysis of sentinel-2A, sentinel-2B and landsat-8 data revisit intervals and implications for terrestrial monitoring. *Remote Sensing*, 9(9), 902. 2017.

LIANG, S.; WANG, Y.; ZHANG, L.; LIU, X.; CHENG, Y. Integrating multisource remote sensing data for forest monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 268, 112741. 2022.

LIMA, M. G.; PEREIRA, A. R.; SILVA, R. L.; BARBOSA, J. R.; MARTINS, D. O.; ALVES, F. L. Modelagem do crescimento e produção de *Pinus elliottii* no sul do Brasil. *Floresta e Ambiente*, v. 25, n. 3, p. 1-10, 2018.

MACHADO, E. L. M.; BATISTA, G. T.; ANDRADE, F. C. Monitoring the expansion of *Pinus* plantations in southern Brazil using remote sensing data. *Forests*, 14(1), 123. 2023.

MARTINS, R. L.; GOMES, A. L.; PEREIRA, A. F. Avaliação de crescimento e estimativas volumétricas em plantios comerciais de *Pinus elliottii*. *Scientia Forestalis*, v. 49, n. 131, p. 112-122, 2021.

MAZZEI, L.; VIEIRA, M. A.; PEREIRA, R. S. Integration of Optical and SAR Data for Mapping Tropical Forest Volume. *Forest Ecology and Management*, v. 530, p. 120812, 2023.

OLIVEIRA, J. L.; SOUSA, M. S.; FERREIRA, P. R. Análise do uso da terra e cobertura vegetal no estado de Santa Catarina com imagens de sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 16, n. 4, p. 241-255, 2023.

OLIVEIRA, R. S.; LIMA, J. P.; SANTOS, F. M. Estratégias de manejo sustentável para plantios de *Pinus* no Brasil. *Silvicultura em Foco*, v. 12, n. 3, p. 99-110, 2023.

PLANET LABS. PlanetScope satellite imagery. Retrieved from <https://www.planet.com/>. 2023.

QUINTEIRO, J. F.; OLIVEIRA, M. S.; SANTOS, M. P.; COSTA, A. M. Sentinel-1 and ALOS-2 for forest disturbance detection in commercial *Pinus* plantations. *Remote Sensing*, v. 14, n. 3, p. 786-798, 2022.

- RAO, K. S.; FERNANDES, P. H.; ALMEIDA, V. R.; SANTOS, G. F. Assessment of Above-Ground Biomass in Tropical Forests Using Multispectral PlanetScope Imagery. *Environmental Research Letters*, v. 18, n. 4, p. 045003, 2023.
- RODRIGUES, T. R.; COSTA, A. B.; LIMA, J. S.; OLIVEIRA, L. E. Mapping the expansion of Pinus plantations in Southern Brazil using SAR data. *Journal of Environmental Management*, v. 301, p. 113774, 2022.
- ROGAN, J.; CHEN, D. M. Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 44(1), 103-123. 2020.
- ROSA, J.; SILVA, F.; ALMEIDA, A. Remote sensing of commercial Pinus plantations using Sentinel-2 data: Applications in biomass and forest health. *Journal of Forestry Research*, v. 19, n. 1, p. 76-89, 2023.
- ROY, D. P.; WULDER, M. A.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C. E.; ALLEN, R. G.; ANDERSON, M. C.; HELDER, D.; IRONS, J. R.; JOHNSON, D. M.; KENNEDY, R.; SCAMBOS, T. A.; SCHAAF, C. B.; ZHU, Z. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, v. 145, p. 154-172, 2020.
- SANTOS, A. C.; MELO, J. F.; ALMEIDA, P. H. The economic importance of forest plantations in Southern Brazil: A focus on *Pinus spp.* production. *Journal of Forest Economics*, v. 15, n. 2, p. 210-225, 2023.
- SANTOS, J. A.; OLIVEIRA, L. A.; ANDRADE, R. F. Dinâmica Vegetacional e Climatológica do Oeste Catarinense: Implicações para o Uso da Terra. *Brazilian Journal of Remote Sensing*, v. 50, p. 128-139, 2023.
- SANTOS, L. A.; PEREIRA, V. R.; SOUZA, R. J. Análise de Plantios de Pinus spp. Utilizando Sensoriamento Remoto no Sul do Brasil. *Floresta e Ambiente*, v. 30, p. e20230045, 2023.
- SANTOS, M. L.; OLIVEIRA, P. R.; CARVALHO, R. N. Análise do Potencial Econômico de Florestas Plantadas em Santa Catarina. *Revista Brasileira de Economia Florestal*, v. 45, p. 123-135, 2023.
- SARKER, M. L. R.; NICHOL, J. Multi-source remote sensing for forest structure assessment and monitoring: Advances and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 270, 112884. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112884>.
- SEGARRA, J., BUCHAILLOT, M. L., ARAUS, J. L., & KEFAUVER, S. C. Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications. *Agronomy*, 10(5), 641. 2020.
- SHIMADA, M.; ITOH, T.; MOTOOKA, T.; WATANABE, M. PALSAR polarimetric observation capability for biomass detection. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, v. 29, n. 1, p. 9-20, 2009.

SILVA, C. A.; HUDAK, A. T.; VIERLING, L. A.; LIESENBERG, V. Estimating Forest attributes in industrial *Pinus taeda* L. forest plantations in Brazil using simulated NASA's GEDI spaceborne LiDAR data. *Proceedings of the XIX Brazilian Symposium on Remote Sensing*. São José dos Campos: INPE. 2023.

SILVA, E. P.; PEREIRA, W. L. Impact of selective logging on forest structure and composition. *Global Ecology and Conservation*, v. 43, p. e02354, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02354>.

SILVA, J. A. B. da; SOUZA, C. M. de; ALMEIDA, S. A. Estimating density and height of Pinus stands using SAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 82, p. 101908, 2019.

SILVA, M. R.; COSTA, P. L. Mapeamento e caracterização de povoamentos florestais de *Pinus* utilizando sensoriamento remoto: uma abordagem integrada. *Journal of Forest Science and Technology*, 45(3), 112-130. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jfst.2023.01.003>.

SILVA, R. A.; ZHANG, J.; SOUZA, R. L.; MOURA, A. M. Characterizing Forest Structure with High-Resolution PlanetScope Imagery. *Forest Ecology and Management*, v. 491, p. 119236, 2021.

SILVA, R. G.; OLIVEIRA, M. S.; VIEIRA, A. P.; MENDES, P. A.; BARBOSA, E. L. Modelagem de crescimento de povoamentos de Pinus no Brasil. *Journal of Forest Science*, v. 35, n. 1, p. 115-128, 2019.

SILVA, T. L.; RIBEIRO, J. A.; GOMES, M. A. Avaliação do crescimento e produtividade em povoamentos de *Pinus* no Sul do Brasil. *Cadernos de Pesquisa Florestal*, v. 28, n. 4, p. 213-227, 2022.

SMITH, R. L.; JONES, M. T.; HARRIS, C. A. Monitoring commercial Pinus plantations using high-resolution PlanetScope imagery: Applications for biomass and vegetation health. *Forestry Remote Sensing Journal*, v. 12, p. 200-215, 2023.

SOUZA, C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; OLIVEIRA, S. W. Mapping deforestation and forest degradation in the Brazilian Amazon using satellite data. *Science Advances*, v. 9, n. 1, eabc4548, 2023.

SOUZA, R. T.; MARTINS, A. P.; FONSECA, J. P. Planejamento e execução de inventários florestais em plantios comerciais de Pinus no sul do Brasil. *Cerne*, v. 29, n. 1, p. 49-59, 2023.

SOUZA-FILHO, P. W. M.; SILVA, G. F. Sentinel-2 applications for detecting and monitoring land cover changes in the Amazon Region. *International Journal of Remote Sensing*, 40(7), 2855-2876. 2019.

STANOVIC, J.; RADOVIC, J.; MANDIC, M. Sentinel-2 data for forest monitoring: Application in commercial *Pinus spp.* plantations. *Remote Sensing*, v. 15, n. 4, p. 1011-1025, 2024.

- TUCKER, C. J.; HUETE, A. R.; MYNENI, R. B. Spectral analysis of forest ecosystems using Sentinel-2 imagery: Applications to *Pinus spp.* plantations. *Remote Sensing of Environment*, v. 258, p. 112-124, 2021.
- WANG, Y.; WU, X.; ZHANG, X. Integrating optical, radar, and LiDAR data for improved forest mapping and monitoring. *Forest Ecology and Management*, 522, 120437. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120437>.
- WILSON, J. S.; THOMAS, R. F.; KIM, H. Y. Monitoring commercial *Pinus* plantations using Landsat 8 and 9: Biomass estimation and forest health. *Forestry Remote Sensing Journal*, v. 17, n. 2, p. 112-125, 2023.
- WULDER, M. A.; COHEN, W. B.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C. E. Time Series Analysis of Landsat Data: Approaches and Methods for Monitoring Change. *Progress in Physical Geography*, v. 46, n. 3, p. 304-329, 2022.
- ZHANG, Y.; GAO, F.; SHI, Z. Vegetation Index Analysis for Forest Biomass Modeling. *Journal of Forest Research*, v. 26, p. 301-312, 2021a.
- ZHANG, Y.; HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a Remote Sensing-Based Vegetation Index Enhanced for Monitoring Vegetation Changes. *Remote Sensing of Environment*, v. 256, p. 112276, 2021b.
- ZHU, X.; HELMER, E. H.; GAO, Y.; MURPHY, M. Integrating deep learning with remote sensing for large-scale forest monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 254, 112264. 2021.
- ZHU, Z.; WOODCOCK, C. E.; COHEN, W. B.; GORCIN, J. D.; STEHMAN, S. V.; YANG, Z. Assessment of Disturbance Detection in Landsat Time Series Analysis. *Remote Sensing of Environment*, v. 246, p. 111857, 2022.