ÍNDICES DE VEGETAÇÃO SAR (*SYNTHETIC APERTURE RADAR*) E SUA RELAÇÃO COM A BIOMASSA FLORESTAL

Erli Pinto dos Santos [1], Isabel Caligiorne Santos [2], Michel Castro Moreira [1], Cibele Hummel do Amaral [2, 3], Demetrius David da Silva [1]

[1] Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Campus Sede, Avenida Peter Henry Rolfs, Viçosa 36570-900, Minas Gerais, Brasil, { erlipinto@gmail.com, michelcm@ufv.br, demetrius@ufv.br }; [2] Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Campus Sede, Avenida Peter Henry Rolfs, Viçosa 36570-900, Minas Gerais, Brasil, isabelcaligiorne@gmail.com; [3] Earth Lab, Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder, Boulder, CO 80303, USA, cibeleha@gmail.com

RESUMO

Um dos métodos recém propostos para monitorar a vegetação, usando imagens de sensores SAR da missão Sentinel-1, é o modelo DPSVI (Dual-polarization SAR Vegetation Index). No entanto, para melhor representar biomassa florestal, foi proposto o DPSVIm, com modificações cujo propósito era tornar o índice mais sensível à biomassa densa. Assim, o objetivo deste trabalho foi de comparar o DPSVI e o DPSVIm com a biomassa acima do solo (AGB) de fragmentos de Mata Altântica do Brasil. Os resultados mostram que não há correlação entre DPSVI e AGB ($\rho = -0.046$ e $p - value \gg 0.05$), mas que há correlação moderada entre o DPSVIm e AGB ($\rho = 0.464$ e $p - value < 0.05$) especialmente em áreas menos declivosas ($\rho = 0.776$ e $p - value < 0.05$). Assim, o índice DPSVIm se mostrou uma alternativa para monitorar e mapear vegetação usando imagens Sentinel-1.

Palavras-chave **—** biomassa acima do solo, Mata Atlântica, Sentinel-1, índice de vegetação por radar.

ABSTRACT

One of the recently proposed methods to monitor vegetation, using SAR images from the Sentinel-1 mission, is the DPSVI (Dual-polarization SAR Vegetation Index) model. However, to better represent forest biomass, the DPSVIm was proposed, with modifications on DPSVI, whose purpose was to make this index more sensitive to dense biomass areas. Thus, the objective of this work was to compare both DPSVI and DPSVIm against the aboveground biomass (AGB) of Atlantic Forest fragments in Brazil. The results show that there is no correlation between DPSVI and AGB ($\rho = -0.046$ and $p - value \gg 0.05$), but that there is a moderate correlation between DPSVIm and AGB ($\rho = 0.464$ and $p - value < 0.05$) especially less steep areas (where $\rho = 0.776$ and $p - value < 0.05$). Thus, the DPSVIm index proved to be an alternative for monitoring and mapping vegetation using Sentinel-1 imagery.

Keywords **—** *aboveground biomass, Atlantic Forest, Sentinel-1, radar vegetation indices*.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com a popularização das missões orbitais de sensoriamento remoto de micro-ondas, principalmente com o uso de sensores imageadores SAR (*Synthetic Aperture Radar*) [1], índices de vegetação SAR têm sido propostos para representar e monitorar a vegetação. Índices de vegetação SAR para observações de polarização completa, ou seja, todas as combinações de emissão e recepção do sinal (HH, HV, VV e VH), de banda L (~1.2 GHz) já existem há mais de uma década, como o RVI (Radar Vegetation Index) [2]. Com o advento da missão de radar orbital Sentinel-1, modelos aplicados a observações de banda C (~ 5.4 GHz) foram propostos, sendo alguns deles modificações do modelo RVI [3], o *Dual-polarization SAR Vegetation Index* (DPSVI) [4], o *Dual-polarization* RVI (DpRVI) [5] (que usa as informações de amplitude e fase coletadas pelo sensor SAR), e o DpRVIc (uma adaptação do DpRVI para usar apenas a informação de amplitude) [6].

O que há em comum entre os índices SAR de banda C (SAR-C) supracitados, é que estes foram desenvolvidos e testados em áreas de vegetação esparsa e/ou em culturas agrícolas, e foram avaliados com dados de biomassa acima do solo (AGB) ou confrontados com índices de vegetação por sensores ópticos, principalmente o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Como o retroespalhamento de micro-ondas tende a saturar em áreas de vegetação densa [7], poucas abordagens têm usado essas medições nessas áreas com a finalidade de quantificar a AGB. A fim de superar essa limitação, baseando-se no índice DPSVI e em outros estudos de aplicações de SAR-C para monitorar florestas [8], [9] propuseram modificações no DPSVI para torná-lo mais sensível e permitir monitorar biomassa densa.

O estudo de [9] demonstrou a aplicabilidade do índice DPSVI modificado (ou DPSVIm), para monitoramento da vegetação na Mata Atlântica do Brasil, especialmente em áreas planas, no entanto, os autores não compararam se houve melhorias entre o DPSVIm e o DPSVI com dados de AGB. Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar a sensibilidade

dos índices de vegetação DPSVI e DPSVIm na descrição de AGB em fragmentos florestais de Mata Atlântica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo e dados de campo

Três fragmentos florestais de Mata Atlântica foram usados neste estudo, sendo denominados: Cachoeira das Pombas, Ipaba e São José (Figura 1). Todos estes fragmentos pertencem a região fitoecológica de Floresta Sazonal ([9] e [10]) e estão localizadas na bacia hidrográfica do rio Doce, no Estado de Minas Gerais.

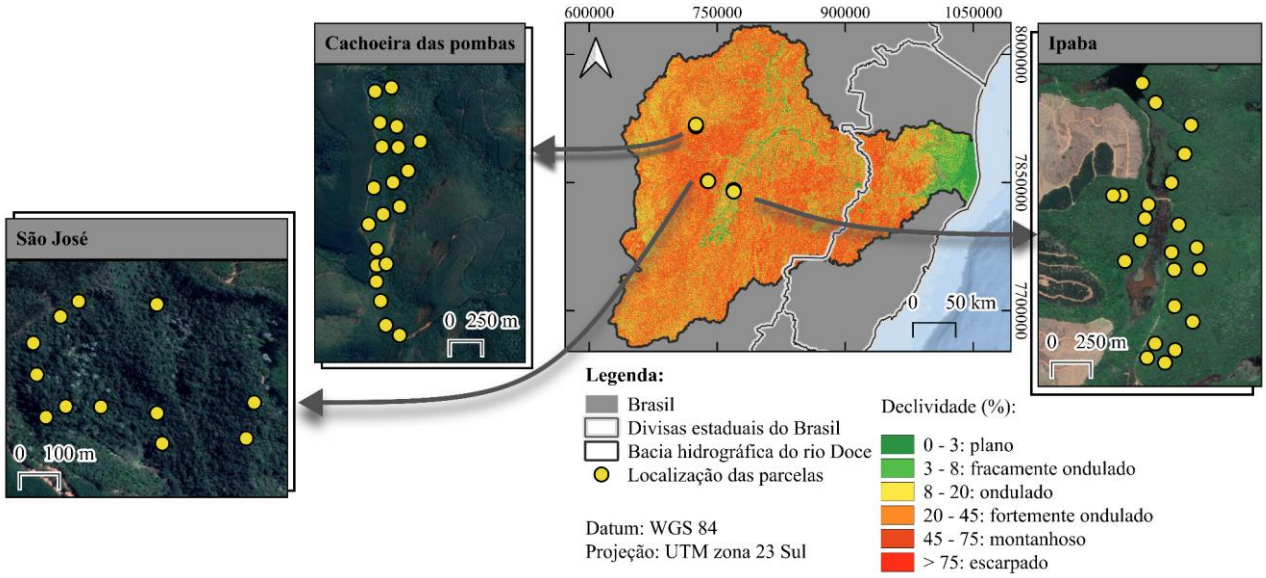

Figura 1. Localização das parcelas dos sítios florestais usados no estudo.

Nos fragmentos florestais foram delimitadas parcelas retangulares permanentes (10 x 50 m) com 0.05 ha de área [11]. Nos fragmentos Ipaba, São José e Cachoeira das Pombas foram alocados e mapeados, respectivamente, 22, 12 e 20 parcelas. Os inventários foram realizados nas seguintes datas: São José, entre 20 de julho e 02 de agosto de 2017; Ipaba, entre 08 de agosto e 29 de agosto de 2017; e Cachoeira das Pombas, entre 13 de setembro e 02 de outubro de 2017. Em cada uma das parcelas, o nome científico, a CBH (circunferência na altura de 1.30 m), o DBH (diâmetro na altura de 1.30 m) e a altura total da planta (H, em m) de todas as árvores com CBH maior ou igual a 15 cm foram coletadas durante a realização do inventário florestal.

Os valores de H e DBH obtidos no inventário foram usados como entradas da equação alométrica (Equação 1), a fim de se obter a biomassa acima do solo (AGB, em kg) [9], [12] de cada árvore amostrada.

$$AGB = 0.02453 \cdot (DBH^{2.443356}) \cdot (H^{0.43602}) \qquad (1)$$

Então a AGB (kg) foi somada para obter AGB total de cada parcela, e em seguida convertida para AGB (Mg ha^{-1}).

2.2. Cálculo dos índices de vegetação

Foram empregadas três imagens *Ground Range Detected* (GRD) de dupla polarização VV e VH da missão Sentinel-1 do modo de aquisição IW (*Interferometric Wide Swath Mode*) (Tabela 1), que escaneiam a superfície em três subfaixas (IW1, IW2 e IW3), com ângulos de incidência de 32.9, 28.3 e 43.1º e resolução azimutal de 22.4, 22.5 e 22.6 m, respectivamente [13].

Data da imagem	Fragmento florestal
26 de julho de 2017	São José
31 de agosto de 2017	Ipaba
24 de setembro de 2017	Cachoeira das Pombas

Tabela 1. Data das imagens usadas no estudo.

As imagens foram processadas seguindo as etapas: *Subset*, recortando as imagens para a área de interesse (Figura 1); *Apply Orbit File* (para obter vetores de órbita e velocidade precisas do satélite); *Thermal Noise Removal* (para remoção de ruídos térmicos de antena); *Border Noise Removal* (para remoção de ruídos nas bordas das imagens); seguido da calibração radiométrica (para *radar cross section* em β^0) e aplicação de filtro de ruído Speckle (Lee Sigma com janela de 11 x 11 pixels). Posteriormente foi aplicado o algoritmo RTF (*Radiometric Terrain Flattening*), com um *oversampling multiple* correspondente a 4.0, para melhor atenuar artefatos do relevo, e por fim foi realizada a correção de terreno por efeito Doppler, para a ortoretificação das imagens. Todo o procedimento empregado é detalhadamente descrito em [9], [14], e foi realizado usando os algoritmos do

SNAP (**Sentinel Application Platform**) na linguagem Python (códigos podem ser consultados em: https://github.com/eupassarinho/sentinel-1-SAR-vegetation-indices.git).

Com as bandas calibradas para γ^0, ou seja, corrigidas pelo relevo, os índices DPSVI [4] e DPSVIm [9] foram calculados pela Equação (2) e Equação (3), respectivamente.

$$DPSVI = \frac{\gamma^0_{VH}\left[\begin{array}{c}\left(\gamma^0_{VV\,max}\cdot\gamma^0_{VH}-\gamma^0_{VV}\cdot\gamma^0_{VH}+{\gamma^0_{VH}}^2\right)+\\ \left(\gamma^0_{VV\,max}\cdot\gamma^0_{VV}-{\gamma^0_{VV}}^2+\gamma^0_{VH}\cdot\gamma^0_{VV}\right)\end{array}\right]}{\sqrt{2}\cdot\gamma^0_{VV}} \quad (2)$$

$$DPSVIm = \frac{{\gamma^0_{VV}}^2+\gamma^0_{VV}\cdot\gamma^0_{VH}}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Os índices DPSVI e DPSVIm foram comparados, separadamente, com a AGB através de testes de correlação. O teste de correlação usado foi o teste ranqueado de Spearman, após ter sido testada a normalidade das variáveis com o teste de Shapiro-Wilk. Como para cada parcela há dados de relevo (Figura 1), os testes de correlação foram realizados considerando o relevo das parcelas, pela influência que este tem nesse tipo de estudo com dados de radares [15].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2. Distribuição quantílica de AGB das três parcelas e resultado do teste de normalidade da variável.Figura 2 exibe a distribuição quantílica da AGB, sendo possível observar a não-normalidade dessa variável, motivo pelo qual o teste de correlação ranqueado de Spearman foi aplicado.

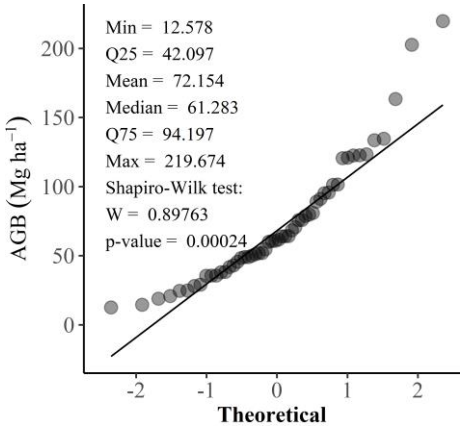

Figura 2. Distribuição quantílica de AGB das três parcelas e resultado do teste de normalidade da variável.

A correlação entre AGB versus DPSVI e AGB versus DPSVIm é apresentada na Figura 3. Nela é possível observar que para o teste de correlação entre AGB vs. DPSVI não houve correlação significante, considerando um nível de significância de 5%, já que o $\rho \sim 0$ e $p - value < 0.05$. Por outro lado, há correlação positiva e significante entre AGB vs. DPSVIm, inclusive com um valor que pode ser considerado moderado de correlação, com $\rho = 0.465$.

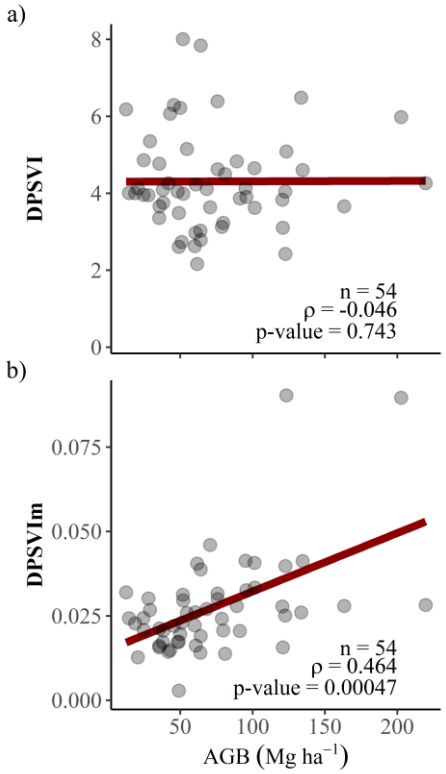

Figura 3. Dispersão entre a biomassa acima do solo (AGB) e os índices de vegetação: a) AGB vs. Dual-pol SAR Vegetation Index (DPSVI); e b) AGB vs. DPSVI modificado (DPSVIm).

Normalmente o retroespalhamento medido em banda C tende a saturar em aproximadamente 50 Mg ha^{-1} de AGB [7], [16], no entanto [9] já observaram que com o índice DPSVIm foi possível distinguir parcelas com níveis menores que 50 Mg ha^{-1} e em torno de 200 Mg ha^{-1}, como pode ser observado na Figura 3. Portanto, mesmo sendo um índice de banda C, o DPSVIm tende a atenuar a saturação do sinal sobre áreas de biomassa densa, como a Mata Altântica.

Um terceiro teste de correlação foi aplicado com amostras de AGB com relevo plano, fracamente ondulado e ondulado, foram usadas. Esse teste foi encorajado pelo conhecimento influência do relevo sobre sistemas de observação de visada lateral de sensores SAR, que geram distorções geométricas nas imagens [17], e que influenciam o mapeamento de vegetação e quantificação de biomassa [18], sendo inclusive áreas planas recomendadas para este tipo de teste [15]. Assim, o teste é exibido na Figura 4.

Na Figura 4 observamos forte correlação significativa ($p - value < 0.05$) entre AGB e DPSVIm para parcelas com relevo plano a ondulado. Embora o número de amostras diminua, os testes mostram o potencial de aplicação do

DPSVIm para atividades de mapeamento de vegetação densa, principalmente em áreas menos declivosas.

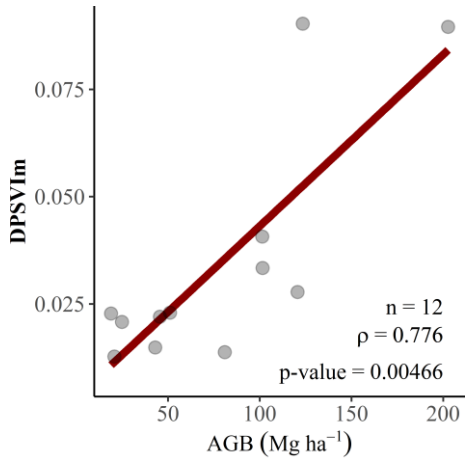

Figura 4. Dispersão entre a biomassa acima do solo (AGB) e Dual-pol SAR Vegetation Index modificado (DPSVIm) para parcelas com relevo plano, fracamente ondulado e ondulado.

4. CONCLUSÕES

Considerando que o índice DPSVI foi desenvolvido e testado com a AGB de culturas agrícolas e vegetação natural esparsa, era esperada a sua limitação para áreas de biomassa densa. Já as modificações propostas no DPSVIm tornaram o índice mais sensível à altos valores de AGB, como aqueles dos fragmentos de Mata Altântica, sendo, portanto, mais adequado para aplicações florestais e outros mapeamentos de vegetação.

5. REFERÊNCIAS

[1] W. R. Paradella, J. C. Mura, and F. F. Gama, *Monitoramento DInSAR para Mineração e Geotecnia*, 1st ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

[2] Y. Kim and J. van Zyl, "On the relationship between polarimetric parameters," in *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120)*, 2000, vol. 3, pp. 1298–1300. doi: 10.1109/IGARSS.2000.858099.

[3] R. Nasirzadehdizaji, F. Balik Sanli, S. Abdikan, Z. Cakir, A. Sekertekin, and M. Ustuner, "Sensitivity Analysis of Multi-Temporal Sentinel-1 SAR Parameters to Crop Height and Canopy Coverage," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 4, p. 655, Feb. 2019, doi: 10.3390/app9040655.

[4] S. Periasamy, "Significance of dual polarimetric synthetic aperture radar in biomass retrieval: An attempt on Sentinel-1," *Remote Sens Environ*, vol. 217, no. September, pp. 537–549, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.rse.2018.09.003.

[5] D. Mandal *et al.*, "A Radar Vegetation Index for Crop Monitoring Using Compact Polarimetric SAR Data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 58, no. 9, pp. 6321–6335, Sep. 2020, doi: 10.1109/TGRS.2020.2976661.

[6] N. Bhogapurapu *et al.*, "Dual-polarimetric descriptors from Sentinel-1 GRD SAR data for crop growth assessment," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 178, pp. 20–35, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2021.05.013.

[7] N. Joshi *et al.*, "Understanding 'saturation' of radar signals over forests," *Sci Rep*, vol. 7, no. 1, pp. 1–11, Dec. 2017, doi: 10.1038/s41598-017-03469-3.

[8] P.-L. Frison *et al.*, "Potential of Sentinel-1 Data for Monitoring Temperate Mixed Forest Phenology," *Remote Sens (Basel)*, vol. 10, no. 12, p. 2049, Dec. 2018, doi: 10.3390/rs10122049.

[9] E. P. dos Santos, D. D. da Silva, and C. H. do Amaral, "Vegetation cover monitoring in tropical regions using SAR-C dual-polarization index: seasonal and spatial influences," *Int J Remote Sens*, vol. 42, no. 19, pp. 7581–7609, Oct. 2021, doi: 10.1080/01431161.2021.1959955.

[10] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, *Mapa de vegetação do Brasil*, 3rd ed. Rio de Janeiro, 2004.

[11] I. da S. Tavares Júnior *et al.*, "Machine learning: Modeling increment in diameter of individual trees on Atlantic Forest fragments," *Ecol Indic*, vol. 117, no. June, p. 106685, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106685.

[12] M. A. Amaro, "Quantificação do estoque volumétrico, de biomassa e de carbono em uma floresta estacional semidecidual no município de Viçosa-MG," Universidade Federal de Viçosa, 2010. [Online]. Available: https://locus.ufv.br//handle/123456789/543

[13] E. European Space Agency, "IW GRD Resolutions - Sentinel-1 SAR Technical Guide - Sentinel Online," 2019. https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-algorithms/ground-range-detected/iw (accessed Sep. 12, 2020).

[14] D. Small, "Flattening Gamma: Radiometric Terrain Correction for SAR Imagery," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 8, pp. 3081–3093, 2011, doi: 10.1109/TGRS.2011.2120616.

[15] S. Saatchi, "SAR Methods for Mapping and Monitoring Forest Biomass," in *The Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*, A. I. Flores-Anderson, K. E. Herndon, R. B. Thapa, and E. Cherrington, Eds. Huntsville: NASA, 2019. doi: 10.25966/nr2c-s697.

[16] M. L. R. Sarker, J. Nichol, H. B. Iz, B. bin Ahmad, and A. A. Rahman, "Forest Biomass Estimation Using Texture Measurements of High-Resolution Dual-Polarization C-Band SAR Data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 6, pp. 3371–3384, Jun. 2013, doi: 10.1109/TGRS.2012.2219872.

[17] A. Vollrath, A. Mullissa, and J. Reiche, "Angular-Based Radiometric Slope Correction for Sentinel-1 on Google Earth Engine," *Remote Sens (Basel)*, vol. 12, no. 11, p. 1867, Jun. 2020, doi: 10.3390/rs12111867.

[18] D. K. Atwood, H.-E. Andersen, B. Matthiss, and F. Holecz, "Impact of Topographic Correction on Estimation of Aboveground Boreal Biomass Using Multi-temporal, L-Band Backscatter," *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, vol. 7, no. 8, pp. 3262–3273, Aug. 2014, doi: 10.1109/JSTARS.2013.2289936.