

AVALIAÇÃO DO EFEITO COMBINADO DO ÂNGULO ZENITAL SOLAR E DA PERDA DE FOLHAS SOBRE IMAGENS MODIS/ E MISR/TERRA

EVALUATION OF THE COMBINED EFFECT OF SOLAR ZENITH ANGLE AND LITTERFALL ON MODIS/ AND MISR/TERRA IMAGES

Fábio Marcelo Breunig¹, Lênio Soares Galvão², Rafaelo Balbinot¹, Luciano Denardi¹, William Gaida¹,
Thiago Sousa Teles², Jonathan William Trautenmuller¹, Rafael Vendruscolo¹

¹ Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Campus Frederico Westphalen, Linha 7 de Setembro, Caixa Postal 54, CEP: 98400-000, Frederico Westphalen, RS, Brasil,
fabio-breunig@gmail.com, rafaelbalbinot@gmail.com, lucianodenardi@yahoo.com.br,
williamgaida@yahoo.com.br, jwtraute@hotmail.com, eng.rafaelvendruscolo@gmail.com

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Av. dos Astronautas, 1758, 12.227-010 - São José dos Campos, SP, Brasil, lenio@dsr.inpe.br, ts.teles@hotmail.com

RESUMO

Considerar os efeitos direcionais e angulares sobre os produtos de sensoriamento remoto é fundamental para evitar interpretações e estimativas erradas de parâmetros biofísicos e bioquímicos da vegetação. Em geral, os esforços para entender estes efeitos têm sido focados em florestas tropicais. Considerando florestas subtropicais decíduas, a complexidade das variações de geometria de iluminação e visada se soma aos efeitos da perda de folhas. Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito das variações sazonais do ângulo zenital solar e da perda de folhas na floresta subtropical decidual do Parque Estadual do Turvo (PET), utilizando imagens do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS)/Terra e *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR)/Terra e simulações PROSAIL. A metodologia incluiu campanhas de campo (fotografias hemisféricas e inventário florestal), aquisição e pré-processamento das imagens MODIS e MISR, cálculo dos índices de vegetação, do índice de área foliar (IAF) e simulações no modelo de transferência radiativa PROSAIL. Suscintamente, os resultados mostraram que os efeitos direcionais e angulares aumentam do verão para o inverno devido à combinação de aumento do ângulo zenital solar (mais sombra sendo vista pelo sensor) e de diminuição do IAF por causa da perda de folhas de algumas espécies dominantes.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, SIG, efeitos direcionais, monitoramento, floresta subtropical.

ABSTRACT

If one take into account directional and angular effects on remote sensing products, one can avoid misinterpretations or wrong estimates of biophysical and biochemical vegetation parameters. Most of the efforts to understand these effects have focus on tropical forests. When subtropical deciduous forests are considered, the complexity of view-illumination geometry effects is coupled with the effects resultant from litter fall. In this context, the objective of the work was to evaluate the effect of seasonal variations in solar zenith angle and litter fall in subtropical deciduous forest of the Parque Estadual do Turvo (PET) using *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS)/Terra and *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR)/Terra images and PROSAIL simulations. The methodology included field campaigns (hemispherical photographs and forest inventory), acquisition and pre-processing of the MODIS and MISR images, vegetation indices and leaf area index (LAI) calculation and PROSAIL radiative transfer model simulations. In short, results showed that the directional and angular effects increased from summer to winter because of the combined effect of solar zenith angle increase (more shadow seem by the sensor) and of LAI decrease due to litter fall in some dominant species.

Keywords: Remote sensing, GIS, directional effects, monitoring, subtropical forest.

INTRODUÇÃO

A discussão sobre a geometria de aquisição do sensor e iluminação solar sobre o cálculo de índices de vegetação tem repercutido no meio acadêmico, considerando as implicações no entendimento da dinâmica de ecossistemas florestais mediante diferentes cenários de mudanças ambientais globais. Grande parte desses estudos têm abordado ambientes florestais tropicais. Apenar de que as áreas florestais subtropicais decíduais não apresentam uma representatividade espacial semelhante às de florestas tropicais, sua dinâmica intra-anual é fortemente associada às variações da iluminação (balanço de radiação) e de condicionantes climáticas como a temperatura. Nesse contexto, as imagens de sensoriamento remoto adquiridas sobre esses ambientes devem considerar necessariamente as variações de geometria de iluminação e visada, bem como o ciclo anual de perda de folhas das espécies decíduas. A amplitude sazonal do ângulo zenital solar nas florestas subtropicais brasileiras pode chegar a 40°. Assim, um forte aumento da componente sombra é percebido nas cenas adquiridas durante o inverno.

Os impactos da geometria de visada e de iluminação são mais acentuados quando são utilizados sensores imageadores de amplo campo de visada como o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS)/Terra, *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR)/NOAA e o *Satellite Pour l'Observation de la Terre* (SPOT) - *Vegetation* ou sensores multiangulares como o *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR)/Terra e o *Compact High Resolution Imaging Spectrometer* (CHRIS/PROBA). Um dos desafios para entender as implicações da geometria de iluminação e visada em florestas subtropicais está associado ao efeito combinado da geometria e da perda das folhas nas espécies dominantes. Entre as estratégias existentes para auxiliar na compreensão dessa dinâmica, os modelos de transferência radiativa podem ser utilizados.

Com a combinação dos modelos de transferência radiativa aplicados à simulação da propagação da radiação dentro de folhas e de dosséis, novas possibilidades surgiram. O algoritmo PROSAIL combina os modelos PROSPECT e o *Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves* (SAIL) para simular uma série de parâmetros biofísicos e bioquímicos (concentração de clorofila *a* e *b*, carotenos, pigmentos marrons, etc.) e estruturais (índices de área foliar – IAF, distribuição angular das folhas) da vegetação. Além disso, variáveis associadas à geometria de iluminação e de visada são consideradas (ângulo zenital solar, ângulo zenital de visada, ângulo azimutal relativo) (VERHOEF *et al.*, 1984; FERET *et al.*, 2008; JACQUEMOUD *et al.*, 2008; JACQUEMOUD *et al.*, 2009). De posse das informações da aquisição de imagens, é possível simular vários cenários e avaliar o impacto de cada parâmetro de entrada sobre o fator de reflectância bidirecional (BRF) e sobre os índices de vegetação dele derivados.

O Parque Estadual do Turvo (PET), localizado no noroeste do Rio Grande do Sul, é um dos maiores fragmentos de floresta primária do sul do Brasil (SEMA, 2005; BREUNIG *et al.*, 2012; ROSA *et al.*, 2013). O PET possui uma área de aproximadamente 17.500 ha e corresponde a porção sul da floresta subtropical de Misiones – Argentina, que recobre uma área de milhares de quilômetros quadrados no nordeste da Argentina. Dessa forma, um melhor entendimento da dinâmica dessa floresta pode contribuir significativamente para a qualificação de modelos de previsão de clima e tempo, estimativa de produtividade primária da floresta, estoque/fixação de carbono e para o próprio monitoramento desse ecossistema.

O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito combinado das variações sazonais do ângulo zenital solar e da perda de folhas na floresta do PET, com base no uso de imagens dos sensores MODIS e MISR a bordo do satélite Terra e de simulações PROSAIL, para evidenciar a anisotropia espectral desse ecossistema florestal.

METODOLOGIA

A área de estudo conhecida como Parque Estadual do Turvo (PET) está localizada no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. O clima da região é do tipo Cfa (classificação de Köppen), denominado subtropical, com temperaturas médias do mês mais quente (janeiro) superiores a 22 °C e no mês mais frio (julho) oscilando entre -3 °C e 18 °C. A precipitação anual é de aproximadamente 1.665 mm, bem distribuída ao longo do ano

(SEMA, 2005). O relevo apresenta grandes variações de altitude (amplitude de mais de 300 m). A Figura 1 ilustra a localização da área em estudo. A flora da floresta é composta por diversas espécies arbóreas como *Nectandra megapotamica*, *Alchornea triplinervia*, *Cupania vernalis*, *Luehea divaricata*, *Casearia sylvestris*, *Parapiptadenia rígida*, *Patagonula americana*, *Matayba elaeagnoides* e *Allophylus edulis* (BRACK, 1985; GUADAGNIN, 1994; SEMA, 2005; 2010). Além disso, o PET é o refúgio de mamíferos ameaçados de extinção como *Puma concolor* e *Leopardus pardalis* (KASPER *et al.*, 2007).

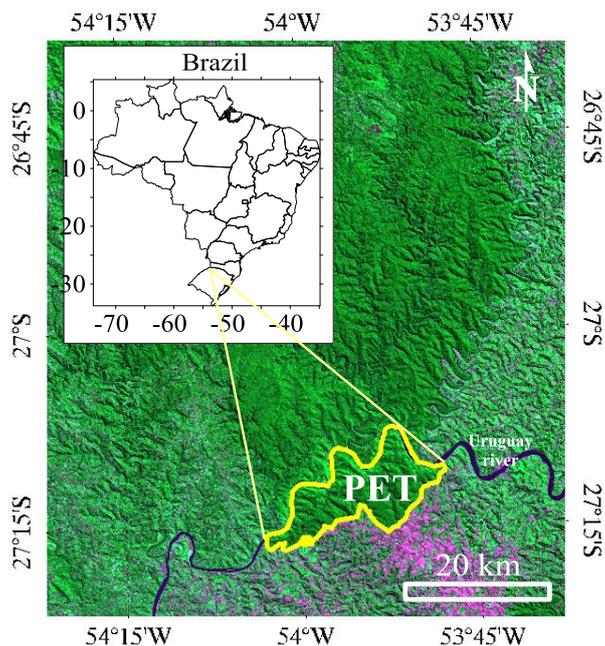


Figura 1. Localização da área de estudo no noroeste do Rio Grande do Sul, Brasil. Uma composição colorida falsa cor 453-RGB do sensor OLI – Landsat-8 de 1 de junho de 2013 foi utilizada. O polígono em amarelo indica a área do PET.

Figure 1. Location of the study area in the northwestern of Rio Grande do Sul State, Brazil. A false color composite of Landsat 8 OLI, acquired in June 1, 2013, was used. The yellow polygon indicates the PET.

As imagens MODIS foram adquiridas do repositório do serviço geológico dos Estados Unidos (USGS - Long Term Archive – EarthExplorer - Land Processes Distributed Active Archive Center). Os dados referentes à reflectância de superfície (MOD09GA - Surface Reflectance Daily L2G Global 1 km and 500 m) e os índices de vegetação (MOD13Q1) foram processados para coordenadas planares no aplicativo MODIS Reprojection Tools (MRT) (DWYER e SCHMIDT, 2006) e ENVI-IDL (Excelis Vis Inc., 2013). O produto MIL2ASLS (MISR Level 2 MIL2ASLS Land Surface Product) referente a BRF das nove câmeras do MISR e o MIANCAGP (Ancillary Geographic Product) foram adquiridos no Langley Atmospheric Sciences Data Center (LASD – NASA - ftp: 14ft101.larc.nasa.gov) e processados com auxílio dos aplicativos MISR_viewer (JPL/NASA, 2012) e ENVI – IDL (Excelis Vis Inc., 2013). Dados de precipitação do produto 3b42v7 foram adquiridos do sensor Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (DOTY, 2011), conforme validação de Franchito *et al.* (2009).

O Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (ROUSE *et al.*, 1973) e o Enhanced vegetation index (EVI) (HUETE *et al.*, 2002) do MODIS foram utilizados para avaliar a dinâmica intra-anual durante o período de 2000-2012. Esses índices foram avaliados quanto sua dependência do ângulo zenital solar e da perda de folhas. A fim de identificar o índice mais influenciado pela geometria de iluminação, o fator de reflectância anisotrópico (ANIF) foi computado. Assim, os dados adquiridos fora do nadir foram divididos pelos dados adquiridos ao nadir.

O modelo PROSAIL foi utilizado para simular os efeitos das variações do ângulo zenital solar para diferentes valores de IAF da floresta em estudo (IAF de 2 a 6). Os valores de IAF foram definidos com base nas estimativas feitas com fotografias hemisféricas adquiridas no inverno e no verão. Para conferir maior recobrimento espacial (toda área do parque), o produto MOD15 (MOD 15 - Leaf Area Index - LAI and Fractional Photosynthetically Active Radiation - FPAR) foi utilizado como referência. Comparativamente, uma floresta sempre verde (tropical) foi simulada, adotando um IAF de seis. As variações simuladas do ângulo zenital solar abrangeram o intervalo de 15° a 60°, com passos de 5°. Os resultados foram plotados na forma de gráficos e tabelas e posteriormente analisados.

A análise foi feita comparando os valores do fator de reflectância bidirecional (BRF) e índices de vegetação normalizados ao nadir (ANIF) de distintas geometrias de iluminação e visada. Para analisar os efeitos da perda de folhas, dados MISR coletados durante o ano de 2005 (maior disponibilidade de imagens) foram avaliados para o período de verão (máximo NDVI/EVI) e inverno (mínimo NDVI/EVI).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ciclos anuais da vegetação primária do PET foram facilmente identificáveis através dos valores do NDVI e EVI (Figura 2). Esse resultado mostra que a perda de folhas das espécies dominantes, induzida pela diminuição da temperatura, causa uma diminuição nos valores dos índices. O NDVI apresenta uma maior estabilidade durante o período de maior verdor da floresta. Por outro lado, os picos do EVI apresentaram menor duração, sugerindo maior sensibilidade para variações biofísicas ou bioquímicas do dossel, ou mesmo uma maior sensibilidade para fatores externos como as variações do ângulo zenital solar.

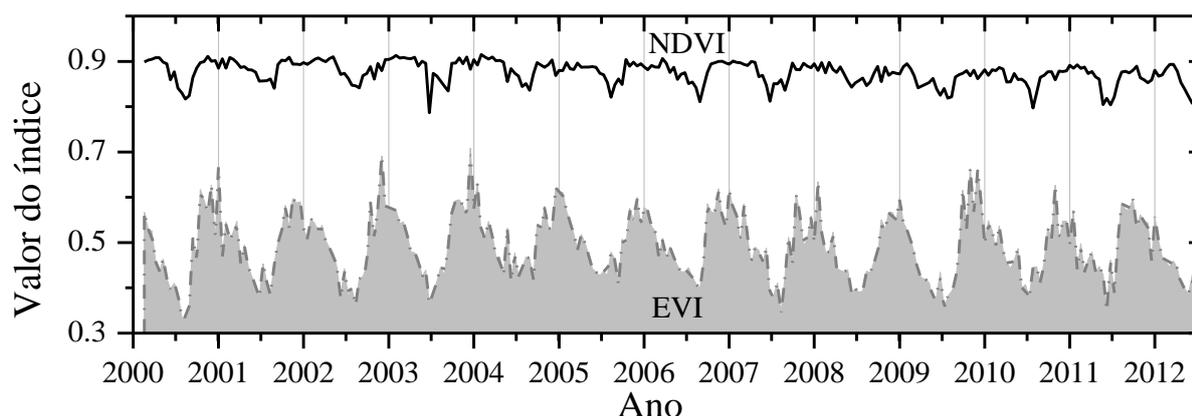


Figura 2. Oscilações sazonais e interanuais do NDVI e EVI derivado do produto MOD13, para o período de 2000 a 2012. Os valores médios de toda área do PET são apresentados.

Figure 2. Sazonal and interannual oscillation of NDVI and EVI derived from the MOD13 product for the period of 2000 to 2012. The average values of the whole PET are presented.

A análise dos dados de IAF estimados do produto MOD15 para o ano de 2005 mostrou que, entre o verão e inverno, os valores variam de aproximadamente 6,6 a 4,8, respectivamente (Figura 3). Essa variação é concordante com os resultados apresentados na Figura 2. Resultados semelhantes foram reportados por Rosa *et al.* (2013). Estimativas de IAF feitas a partir das fotografias hemisféricas mostraram o mesmo padrão, apesar dos valores subestimados em relação aos dados de satélites.

Considerando as variações da reflectância bidirecional das bandas do azul e vermelho do MISR, verifica-se que sua dependência da geometria de iluminação solar é bastante inferior quando comparado com as bandas do verde e infravermelho próximo. O resultado antecipa uma forte dependência dessas bandas para a perda de folhas de algumas espécies dominantes no inverno. Assim, dois grupos podem ser identificados na Figura 3. Cabe destacar que os valores da reflectância bidirecional apresentados nessa figura referem-se às imagens

MISR adquiridas ao nadir. Para avaliar os padrões de resposta em função da geometria de visada (ângulo zenital do sensor) foi elaborada a Figura 4.

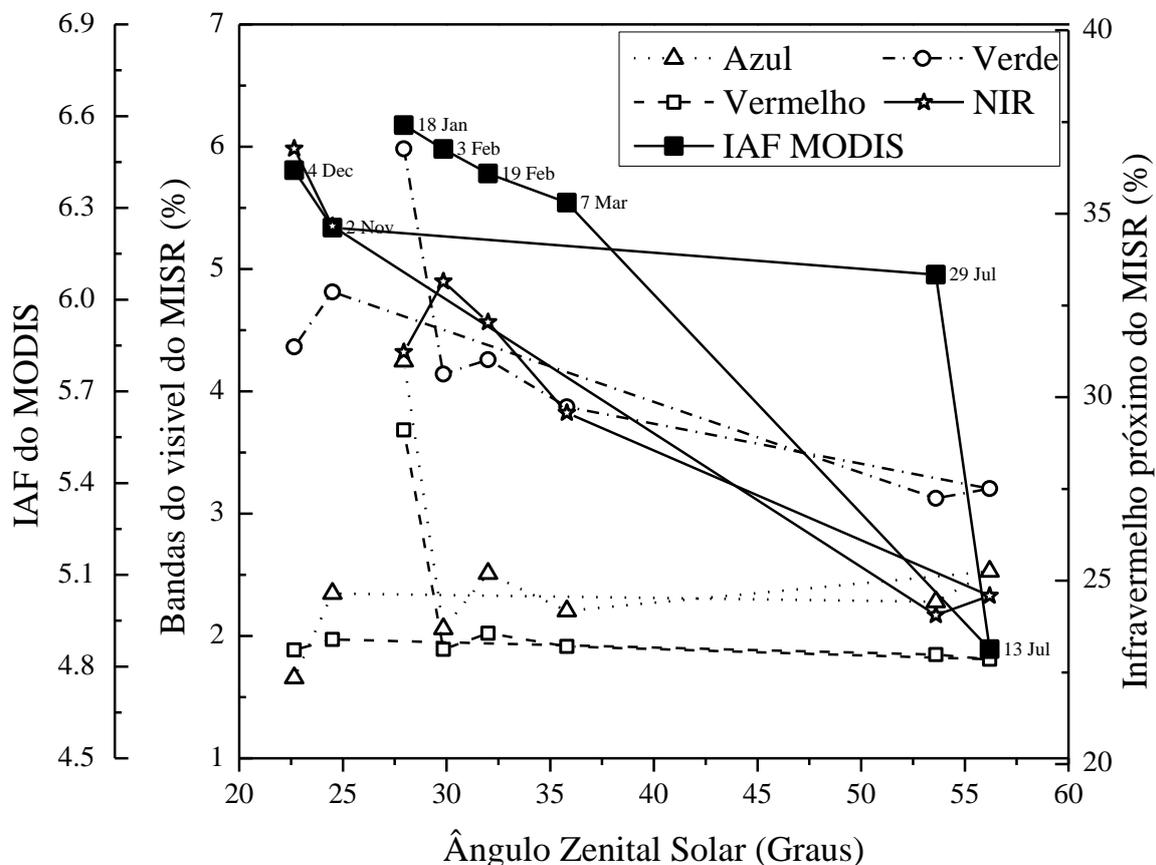


Figura 3. Efeito da geometria de iluminação considerando a relação entre o índice de área foliar (IAF MODIS) e a reflectância bidirecional de diferentes bandas do MISR.

Figure 3. Illumination geometry effect considering the relationships between the leaf area index (MODIS LAI) and the bidirectional reflectance factor of the MISR bands.

Na Figura 4 são apresentados os valores da reflectância bidirecional normalizados para o nadir de algumas câmeras fora do nadir do MISR. Os resultados mostram que existe uma nítida divisão entre as imagens adquiridas nas direções do retroespalhamento (ângulos negativos na figura) e do espalhamento frontal. O motivo desse agrupamento está relacionado à maior presença de dossel iluminado, no caso do retroespalhamento, e a maior presença de sombra vista pelo sensor na direção do espalhamento frontal.

Na avaliação das mudanças ao longo do ano (datas indicadas na base dos gráficos da Figura 4), verifica-se um significativo aumento da influência do ângulo zenital solar para todas as bandas do MISR. Todavia, deve-se considerar que durante o inverno ocorre a perda de folhas de algumas espécies dominantes. Dessa forma, o aumento da anisotropia no inverno parece ser derivado do efeito combinado do aumento do ângulo zenital solar e da perda de folhas.

Para entender melhor o padrão de resposta da reflectância bidirecional, foram simuladas distintas condições de iluminação e IAF no modelo de transferência radiativa PROSAIL. Os resultados permitiram elaborar gráficos com o padrão de resposta para distintas configurações de geometria (Figura 5). Essa figura mostra que à medida que o ângulo zenital solar aumenta, o impacto dos efeitos direcionais sobre os índices de vegetação aumenta. O NDVI apresentou maior estabilidade para todas as geometrias de iluminação simuladas. Por outro lado, o EVI se mostrou bastante dependente da geometria de iluminação. À medida que

o ângulo zenital solar aumenta, o EVI tende a apresentar valores menores (forte dependência da fração sombra).

Considerando os cenários de floresta sempre verde, apenas o ângulo zenital tende a influenciar os índices de vegetação ao longo do ano. Contudo, quando uma floresta subtropical decidual é considerada, a variação do valor do IAF induz a distintos valores do NDVI e EVI. Nesse ponto, pode-se verificar que o NDVI é mais estável às variações de IAF do que o EVI. Apesar das variações do IAF simuladas, em todos os casos os impactos da geometria de iluminação se mantiveram presentes e em magnitudes semelhantes.

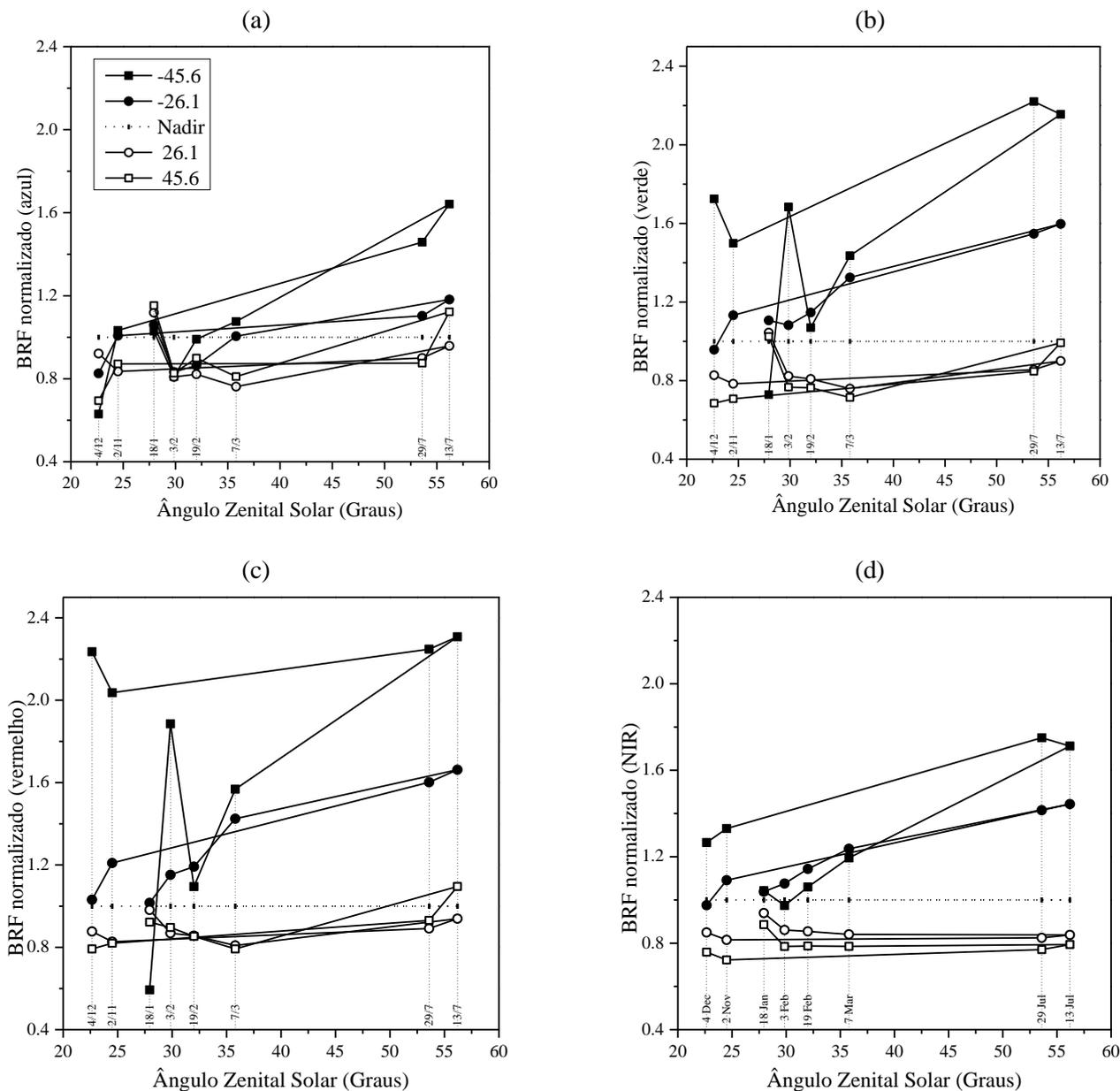


Figura 4. Efeito do ângulo zenital solar sobre o valor da reflectância bidirecional das bandas do (a) azul, (b) verde, (c) vermelho e (d) infravermelho próximo (NIR) do MISR.

Figure 4. Solar zenith angle effect on the bidirectional reflectance factor for the (a) blue, (b) green, (c) red and (d) near infrared MISR bands.

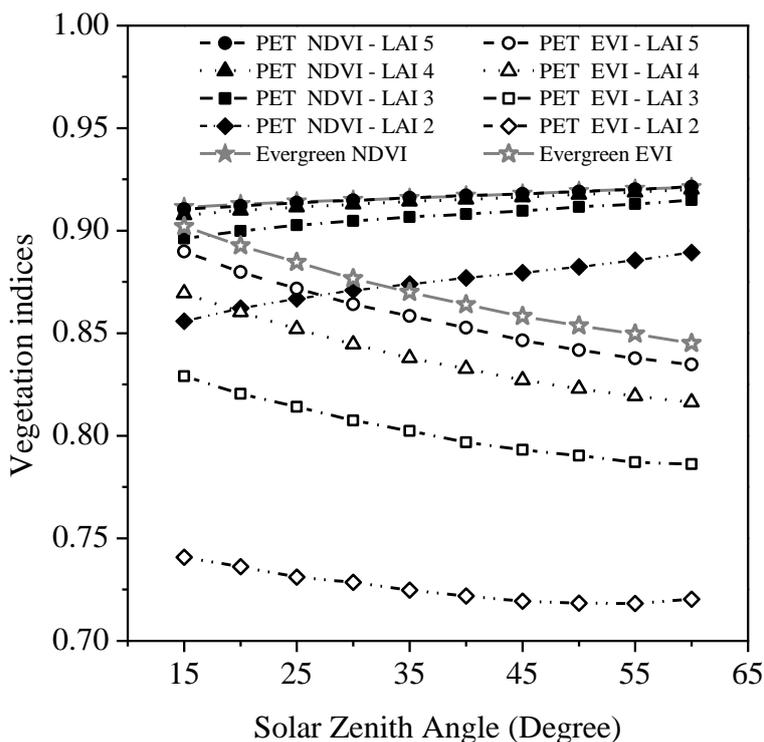


Figura 5. Efeito do ângulo zenital solar sobre a refletância bidirecional simulada para florestas com distintos valores de índice de área foliar (IAF), com foco nos índices de vegetação NDVI e EVI. As simulações foram feitas para florestas decíduas (PET) e sempre verdes (tropicais).

Figure 5. Effect of the solar zenith angle on the bidirectional reflectance factor simulated for different leaf area index (LAI) values of forests, focusing on NDVI and EVI. The simulations were performed for deciduous forest (PET) and evergreen forest (tropical).

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram que o valor da reflectância bidirecional é maior na direção do retroespalhamento em comparação a direção do espalhamento frontal em função da maior presença de dossel iluminado e sombreado, respectivamente.

Considerando as variações intra-anuais, os efeitos direcionais são mais proeminentes no inverno do que no verão para imagens adquiridas ao nadir. Esse fato é função do aumento do ângulo zenital solar e da perda de folhas pelas espécies de grande porte. A combinação desses dois parâmetros apresentou maior impacto no cálculo do EVI quando comparado ao do NDVI.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) (ARD – processo nº 12/0383-5 de 2012), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processo nº 478085/2013-3) e à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (processo nº 2013/03908-3) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

BREUNIG, F.M.; GALVÃO, L.S.; FORMAGGIO, A.R. Caracterização espectral e temporal da vegetação nativa do Parque Estadual do Turvo e da Terra Indígena do Guarita – RS, com produtos MODIS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. Anais... São José dos Campos:

- INPE, 2011b. p. 1765-1772. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFRTRW/3A45QL2>>. Acesso em: 15 ago. 2012.
- DOTY, B. The Grid Analysis and Display System (GrADS) Version 2.0. Global Environment and Society (IGES) - Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies – COLA. 2011. COLA/IGES 4041 Powder Mill Rd. Suite 302, Calverton, MD 20705 – USA
- DWYER, J.; SCHMIDT, G. The MODIS reprojection tool. In Qu, J.J.; Gao, W.; Kafatos, M.; Murphy, R.E.; Salomonson, V.V. (Eds.), *Earth Science Satellite Remote Sensing*. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. Cap. 13, p. 162-177.
- EXCELIS - VIS – Visual Information Solutions. ENVI 5.1. Attn: Webmaster, 4990 Pearl East Circle, Boulder, CO 80301, USA. 2013.
- Feret, J, C Francois, G Asner, A Gitelson, R Martin, L Bidel, S Ustin, G Lemaire, and S Jacquemoud. 2008. “PROSPECT-4 and 5: Advances in the Leaf Optical Properties Model Separating Photosynthetic Pigments.” *Remote Sensing of Environment* 112(6): 3030–43. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S003442570800813>.
- FRANCHITO, S.H. *et al.*, 2009. Validation of TRMM precipitation radar monthly rainfall estimates over Brazil. *Journal of Geophysical Research*, 114(D02105), pp.1–9. Available at: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2009/2007JD009580.shtml> [Accessed October 4, 2012].
- GUADAGNIN, D.L. 1994. “Zonificación del Parque Estadual do Turvo, RS, Brasil, y directivas para el plan de manejo.” UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA.
- HUETE, A. R.; 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, n. 1-2, p. 195-213, nov. 2002.
- JACQUEMOUD, S.; USTIN. S.L. 2008. “Modeling Leaf Optical Properties.” *Photobiological Sciences Online (KC Smith, ed.) American Society for Photobiology*. http://www.photobiology.info/Jacq_Ustin.html.
- JACQUEMOUD, S.; VERHOEF, W.; BARET, F.; BACOUR, C.; ZARCO-TEJADA, P.J.; ASNER, G.P.; FRANÇOIS, C.; USTIN. S.L. 2009. “PROSPECT+SAIL Models: A Review of Use for Vegetation Characterization.” *Remote Sensing of Environment* 113: S56–S66. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425709000765> (March 13, 2012).
- Jet Propulsion Laboratory/National Aeronautics and Space Administration - JPL/NASA. MISR View - Multi-angle Imaging SpectroRadiometer Display and Analysis Tool. Version 5.3. JPL/NASA: Open Channel Foundation, 2012.
- KASPER, C.B.; MAZIM, F.D.; SOARES, J.B.G.; OLIVEIRA, T.G. de F.; MARTA, E. Composição e abundância relativa dos mamíferos de médio e grande porte no Parque Estadual do Turvo, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 24, n. 4, p. 1087-1100. 2007.
- ROSA, P.A.; BREUNIG, F.M.; BALBINOT, R.; GALVAO, L.S. Dinâmica da floresta do Parque Estadual do Turvo com índices de vegetação. *Floresta Ambient*. [online]. 2013, v. 20, n. 4, pp. 487-499. Epub Oct 01, 2013. ISSN 2179-8087.
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS-1 Symposium, 3., 1973, Washington, DC. Proceedings... Washington: NASA, 1973. Washington, 10-14 December, NASA SP-351, v. 1, p. 309-317, 1973
- Secretaria Estadual do Meio Ambiente – RS (SEMA). Inventário Florestal: Floresta Estacional Decidual. Disponível em: < <http://www.sema.rs.gov.br/default.asp> >. Acesso em 16 out. 2010.
- Secretaria Estadual do Meio Ambiente – RS (SEMA). O Plano de Manejo do Parque Estadual do Turvo -RS. Porto Alegre: SEMA, 2005. Disponível em: < www.sema.rs.gov.br/upload/Plano_manejo_PETurvo.pdf >. Acesso em 16 out. 2010.
- VERHOEF, W. 1984. “Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: The SAIL Model.” *Remote Sensing of Environment* 16(2): 125–41. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(84\)90057-9](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(84)90057-9).