

Gaida, William; Breunig, Fábio Marcelo; Soares Galvão, Lênio; Sousa Teles, Thiago;
Balbinot, Rafaelo

Variações da reflectância e dos índices de vegetação em função dos parâmetros da
modelagem topográfica no Parque Estadual do Turvo, Rio Grande do Sul, Brasil

Investigaciones Geográficas (Mx), núm. 91, 2016, pp. 105-123

Instituto de Geografía
Distrito Federal, México

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56949503007>

Variações da reflectância e dos índices de vegetação em função dos parâmetros da modelagem topográfica no Parque Estadual do Turvo, Rio Grande do Sul, Brasil

Recibido: 4 de septiembre de 2015. Aceptado en versión final: 20 de mayo de 2016.

Publicado en línea (pre-print): 9 de septiembre de 2016.

William Gaida*

Fábio Marcelo Breunig*

Lênio Soares Galvão**

Thiago Sousa Teles**

Rafaelo Balbinot*

Resumo: Técnicas de sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizadas em estudos florestais, por permitirem avaliar e monitorar importantes áreas florestais, como as do Parque Estadual do Turvo (PET). O PET é o maior remanescente de floresta subtropical decídua do sul do Brasil. Contudo, fatores externos como efeitos topográficos podem influenciar a resposta espectral dos alvos nos produtos de satélites. Este estudo teve como objetivo avaliar a magnitude das variações na reflectância de superfície e nos índices de vegetação em função das características topográficas locais. A metodologia desenvolvida incluiu a aquisição de dados do sensor RapidEye e o modelo digital de elevação ASTER GDEM 2. O efeito da variação da geometria de iluminação foi avaliado a partir de duas cenas RapidEye: junho e outubro de 2012. Dados de orientação de vertentes, altimetria e relevo sombreado foram gerados a partir do ASTER GDEM 2,

permitindo avaliar o efeito topográfico sobre a reflectância e os índices de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI). Os resultados mostraram que as variáveis topográficas afetam a reflectância de todas as bandas RapidEye e os índices de vegetação, especialmente o EVI. Os efeitos topográficos foram mais pronunciados em junho (maior ângulo zenital solar - AZS) do que em outubro (menor AZS). O NDVI foi menos afetado pelas variações sazonais das condições de iluminação e da fenologia do que o EVI. Quanto a orientação, os maiores valores de reflectância e índices de vegetação foram encontrados na orientação norte e os menores na orientação sul.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, estudos florestais, geometria de aquisição de dados, relevo.

* Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Engenharia Florestal, Linha Sete de Setembro s/n, sala 59, bloco de apoio 4, CESNORS/UFSM, 98400-000, Frederico Westphalen, RS, Brasil. Tel.: 55 37448964 ext. 8783. E-mail: u fsm.william@gmail.com; breunig@u fsm.br; rafaelobalbinot@gmail.com

** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Divisão de Sensoriamento Remoto, Caixa Postal 515, Av. dos Astronautas, 1758, Bairro Jardim da Granja, 12245-970, São José dos Campos, SP, Brasil. Tel.: 55 12 3208-6443. E-mail: lenio@dsr.inpe.br; tsteles@dsr.inpe.br

Cómo citar:

Gaida, William, Fábio Marcelo Breunig, Lênio Soares Galvão, Thiago Sousa Teles y Rafaelo Balbinot (2016), "Variações da reflectância e dos índices de vegetação em função dos parâmetros da modelagem topográfica no Parque Estadual do Turvo, Rio Grande do Sul, Brasil", *Investigaciones Geográficas*, núm. 91, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 105-123, dx.doi.org/10.14350/rig.52159.

Variations of reflectance values and vegetation indices as a function of topographic modeling parameters in the Parque Estadual do Turvo, Rio Grande do Sul, Brazil

Abstract. Remote sensing techniques have been widely used in forestry studies as they allow evaluation and monitoring of large forested areas. The Parque Estadual do Turvo (PET) (17 491 ha) is the largest remaining tract of well-preserved subtropical deciduous forest in Southern Brazil, it constitutes the northern-most portion of the Misiones forest of Argentina (10 000 km²). The area is of great environmental importance and is suitable for conducting remote sensing studies using high or even coarse-to-moderate spatial resolution data and related vegetation indices. Both, reflectance values and vegetation indices are affected by external factors that modify the spectral response of surface elements. Among the factors that can induce errors in image interpretation are topographic effects that add spectral variability to satellite products. In addition, previous studies in subtropical forests have shown that the geometry of data acquisition also affects significantly the estimates of vegetation parameters derived from images acquired at off-nadir viewing or by sensors with large field-of-view (FOV).

This study aimed to evaluate the magnitude of variations in bidirectional reflectance values and in vegetation indices derived from those, as a function of local topography, using high spatial resolution data acquired by the RapidEye satellite constellation.

The method included the use of a digital elevation model (DEM) from the Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Global Digital Elevation Map version 2 (ASTER GDEM v2) and two RapidEye scenes. From the DEM, topographical parameters including slope aspect (eight classes), elevation (nine classes with 120-m spacing interval) and shaded relief (shaded, intermediate and sunlit surfaces) were derived. These data provide information on areas with or without direct exposure to solar radiation, depending on topographic features. RapidEye data were acquired on June 28, 2012 and October 17, 2012, corresponding to dates when the forest shows low or high leaf area index (LAI), respectively. Both scenes were acquired with a view angle close to nadir. Solar elevation angles for the June and October images were 37.93° and 71.25°, respectively. The RapidEye data were corrected for atmospheric effects using the Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH[®]). The next step was to perform topographic modeling in order to extract slope, aspect and elevation data. From the topographic variables and the RapidEye metadata, shaded relief was calculated for both scenes. After segmenting the scenes based on the topographic variables, we evaluated the spectral reflectance and vegetation indices, as measured by RapidEye, as a

function of topographic parameters. For this purpose, we randomly sampled 1000 pixels from each topographic class. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Enhanced Vegetation Index (EVI) were calculated from the RapidEye data. The samples were averaged and analyzed using graphics and descriptive statistics. Select transects were analyzed in more detail to evaluate the effects of local topographic parameters on the remote sensing products. In addition, we conducted forest surveys in 14 plots (20 x 50 m) to produce a floristic-structural characterization of the deciduous forest.

The field inventories identified a total of 74 plant species (in 31 families) distributed in three strata and showed the presence of discontinuities within the forest. The results showed that, in addition to seasonal phenological variations, local illumination conditions caused by the relief in the PET contributed to explain the forest spectral response. The topographic variable that most importantly affected the PET spectral response, as measured by RapidEye, was slope aspect. Despite being affected by varying illumination conditions in the two dates, the reflectance and vegetation indices of the June image were most impacted by the shaded relief caused by the low solar elevation and large amount of shadows in the scene. The illumination effects were compounded by the seasonal leaf shedding in the deciduous forests, especially in the upper canopy layer. The winter time (June) scene showed more shaded relief and lower LAI values. In the October scene the shade fraction was substantially reduced and leaf shedding reduced the forest canopy anisotropy. A per band analysis showed that the red and near infrared bands were the ones with the highest dependence on aspect and shaded relief. Increases in elevation caused a positive change in near infrared reflectance and a lower reflectance in the visible bands. The NDVI showed lower dependence on topographical conditions than the EVI. The EVI showed higher sensitivity to illumination conditions, shade and seasonal LAI variations.

We concluded that the analysis of remote sensing data (reflectance values or vegetation indices such as NDVI and EVI) should take into account local topographic effects. In general, the spectral anisotropy in the June scene was higher than in the October scene due the combined effect of deciduousness (leaf shedding), the lower solar elevation and larger amount of shadows.

Keywords: Remote sensing, forestry studies, data acquisition geometry, relief.

INTRODUÇÃO

Técnicas de sensoriamento remoto têm sido aplicadas ao monitoramento florestal, detecção e avaliação de séries temporais em função de condições/cenários sócio-econômico-ambientais diversos. Essa versatilidade nas aplicações tem permitido avanços significativos no monitoramento e redução do desmatamento (Eckert *et al.*, 2011; Grinand *et al.*, 2013), entendimento da fenologia florestal (Hufkens *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2014; Teles *et al.*, 2015), estimativa de atributos biofísicos (Lefsky *et al.*, 1999; Thorp *et al.*, 2012), manejo florestal e silvicultura de precisão (De Wasseige, Defourny, 2004), além de estimativas de estoque/emissão de carbono (Chen *et al.*, 2003; Eckert, 2012).

As feições espectrais da vegetação são originadas principalmente das diferentes concentrações de pigmentos fotossintéticos (faixa espectral do visível), estrutura interna (infravermelho próximo) e pela concentração de água nas folhas (infravermelho de ondas curtas) (Asner, 1998; Jensen, 2009; Ponzoni, 2010). Contudo, condições externas ao alvo como atmosfera, condições de sombreamento, geometria de iluminação e observação podem afetar a resposta da vegetação detectada pelos sensores (Epiphanio *et al.*, 1996). Neste sentido, a vegetação caracteriza-se como um alvo complexo devido às variações das suas propriedades físico-químico-biológicas e a fatores externos não diretamente relacionados com suas propriedades.

Estudos conduzidos em florestas tropicais e subtropicais têm demonstrado que as geometrias de observação e iluminação podem alterar significativamente as estimativas de parâmetros da vegetação elaboradas a partir de imagens adquiridas fora do nadir ou com amplo campo de visada (Galvão *et al.*, 2009; Morton *et al.*, 2013; Breunig *et al.*, 2015). Esses efeitos se somam as características geomorfológicas locais, que podem acentuar os efeitos direcionais de iluminação, observação e a fração de sombra presente nos pixels (Galvão *et al.*, 2013). Na avaliação de uma floresta de ciprestes do Japão, Matsushita *et al.* (2007) reportaram uma forte dependência da reflectância e índices de vegetação das características geomorfológicas

locais. Estudos recentes mostraram que mesmo os índices de vegetação, como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Rouse *et al.*, 1973) e o *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (Huete *et al.*, 2002), são afetados pelas condições de iluminação e observação, incluindo o efeito topográfico local (Matsushita *et al.*, 2007; Zhan *et al.*, 2012; Breunig *et al.*, 2013; Galvão *et al.*, 2013).

A avaliação dos efeitos da topografia local sobre os produtos de sensoriamento remoto, em geral, tem sido feita com uso de imagens com resolução espacial moderada (Sandmeier, 2000) ou simulações de resolução (Sharma *et al.*, 2013). O lançamento da constelação de satélites RapidEye trouxe novas possibilidades de pesquisa para o entendimento do efeito da topografia local sobre a reflectância e índices de vegetação. O sensor RapidEye adquire dados com resolução espacial de cinco metros (Blackbridge, 2015). Estudos combinando imagens RapidEye e dados geomorfológicos para avaliar a resposta espectral de florestas ainda são escassos, apesar do potencial dessa combinação para explicar os efeitos anisotrópicos da floresta.

Por estarem localizadas em regiões de médias latitudes, as florestas subtropicais, ao longo do ano, estão sujeitas a uma grande amplitude intra-anual do ângulo zenital solar (AZS), que pode atingir amplitudes superiores a 30°. Portanto, o AZS é um fator importante para compreender os efeitos topográficos locais sobre a resposta sazonal da vegetação. Soma-se ainda o caráter decidual de muitas espécies das florestas subtropicais do sul do Brasil. O Parque Estadual do Turvo (PET), localizado no noroeste do estado do Rio Grande do Sul, com 17 491,4 hectares, é um exemplo importante desse tipo de vegetação, sendo uma extensão da floresta argentina de Missiones, com aproximadamente 10 000 km² (Brack *et al.*, 1985; Guadagnin, 1994; Bulfe, 2008).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo avaliar as variações da reflectância e dos índices de vegetação NDVI e EVI em função das características topográficas locais do PET, utilizando dados do sensor RapidEye adquiridos com valores distintos de AZS nos meses de junho e outubro.

ÁREA DE ESTUDO

Localizado no município de Derrubadas (Figura 1), o PET contém 56% do total da área de floresta subtropical decídua ainda existente no Estado do Rio Grande do Sul, região sul do Brasil (IBGE, 1986). A estrutura florística apresenta três estratos arbóreos, um estrato arbustivo e um estrato herbáceo. No estrato arbóreo superior predominam árvores com uma média de 20 metros de altura, podendo atingir até 30 metros. Estas árvores não formam uma cobertura vegetal contínua. O estrato arbóreo médio é constituído por árvores com altura entre 10 e 20 metros, apresentando uma maior densidade e a maioria das espécies perenifólias de origem subtropical. O estrato arbóreo do sub-bosque apresenta uma grande densidade de indivíduos, sendo constituído por espécies de pequeno porte e arbustos (SEMA/RS, 2005).

No aspecto geomorfológico, o PET apresenta relevo com modelado de dissecação fluvial mar-

cado pela presença de vales extensos e profundos, situados sobre derrames basálticos da Formação Serra Geral (Guadagnin, 1994). As classes de solos são distintas nas faces do relevo, cujos vales variam de 55 a 140 metros de profundidade (SEMA/RS, 2005). Estas características do relevo do PET tendem a acentuar os efeitos topográficos ou variações locais nas condições de iluminação medidas pelos satélites, dependendo do AZS.

A área de estudo apresenta clima subtropical do tipo Cfa – clima temperado húmido com verão quente (classificação climática de Köppen-Geiger), onde a precipitação anual atinge 1665 mm com ausência de um período de déficit hídrico (Rosa *et al.*, 2013). As temperaturas médias do mês mais quente (janeiro) são superiores a 22° C. No mês mais frio (julho), os valores mínimos e máximos variam entre -3° C e 18° C (SEMA/RS, 2005), constituindo dois períodos térmicos diferenciados (IBGE, 1986). No inverno, a vegetação encontra-se em estado de seca fisiológica, devido a ocorrência

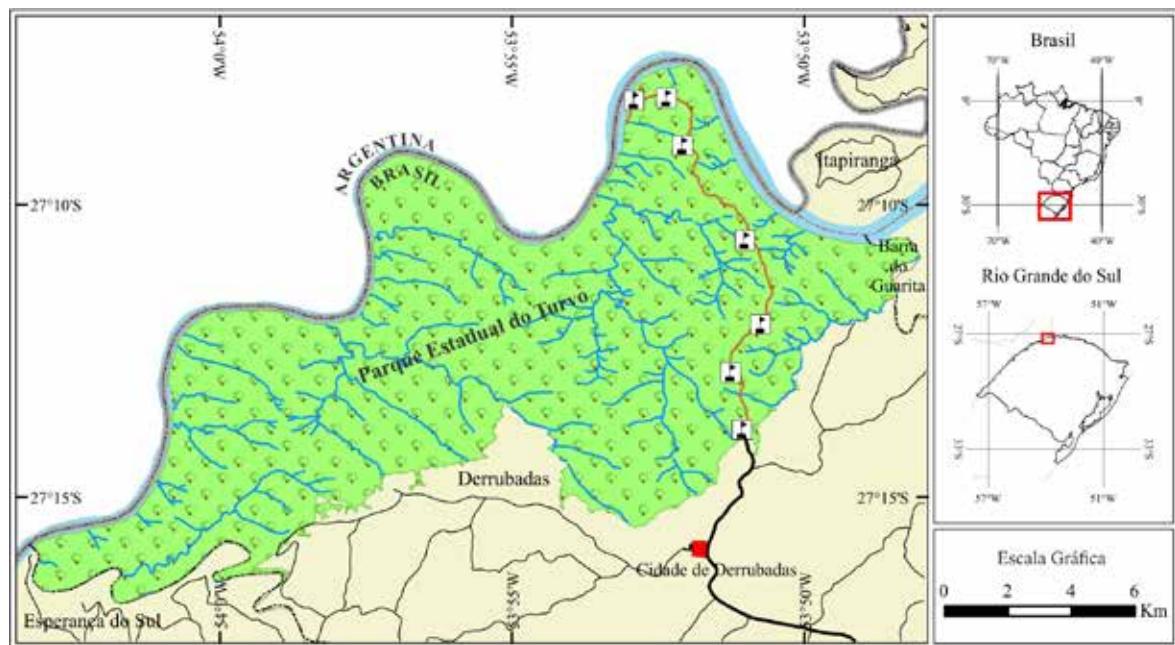


Figura 1. Mapa de localização do Parque Estadual do Turvo (PET) no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Dados vetoriais adquiridos com base na imagem RapidEye de 28 de junho de 2012 e base de dados do IBGE (2014). Os sete pontos ao longo da estrada que corta o PET referem-se aos locais de realização do inventário florestal.

Figure 1. Location map of the State Park of Turvo (PET) in the northwestern portion of the state of Rio Grande do Sul, Brazil. The vector data were acquired using the RapidEye image of June 28, 2012 and IBGE (2014). The location of the seven sample plots of forest inventory along the road that crosses the PET is indicated by squares in white.

das baixas temperaturas. Neste período, algumas espécies do estrato emergente, como a grápia (*Apuleia leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr.) e o angico (*Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan) apresentam caducifolia ou perda significativa de folhas.

METODOLOGIA

Caracterização estrutural e florística da área de estudo

Um levantamento florístico e estrutural foi efetuado sobre indivíduos com mais de 10 cm de diâmetro à altura do peito (DAP). O trabalho de campo foi realizado entre os dias 11 e 14 de setembro de 2013, consistindo no levantamento dos indivíduos contidos em 7 parcelas amostrais de 20 m por 100 m, distribuídas ao longo da estrada que corta o PET (Figura 1). Foram coletadas as seguintes informações: espécie, DAP, altura total e posição na parcela. Esses dados foram utilizados como auxílio para a interpretação das informações espectrais e dos índices de vegetação.

Aquisição e pré-processamento dos produtos de sensoriamento remoto

Foram adquiridas duas cenas do sensor RapidEye: 28 de junho e 17 de outubro de 2012. Estas datas correspondem aos períodos de baixo e alto índice de área foliar (IAF), como também de alto e baixo valor de AZS, respectivamente. Todas as imagens foram obtidas próximo a visada do nadir e adquiridas com correção geométrica e ortorretificação (produto RapidEye nível 3A). Os valores de número digital dos pixels foram transformados em valores de reflectância de superfície por meio do modelo *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes* (FLAASH) (EXELIS, 2014), que permite a correção atmosférica baseada em modelos físicos. Para a correção atmosférica foi escolhido um modelo atmosférico subtropical com modelo de aerossol rural e visibilidade padrão (50 km). O modelo digital de elevação *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Global Digital Elevation Map version 2* (ASTER GDEM 2) foi utilizado para a modelagem topográfica. Não foi aplicada a correção do efeito da topografia sobre

os dados de reflectância de superfície e índices de vegetação.

Modelagem topográfica e índices de vegetação

A partir do modelo ASTER GDEM 2 foi elaborado o modelo de relevo sombreado considerando as características locais do relevo e os parâmetros da geometria de iluminação das cenas RapidEye. Para o mês de junho, utilizou-se o valor do ângulo azimutal solar de 16,37° e o do ângulo de elevação solar de 37,93°. Para o mês de outubro, o valor do ângulo azimutal solar utilizado foi de 22,31° e o ângulo de elevação solar foi de 71,25°. O relevo sombreado foi classificado empiricamente em sombreado, intermediário e iluminado para os seguintes intervalos de valores de cosseno do ângulo de incidência i : 0 – 0,78; 0,78 – 0,87 e 0,87 – 1,0, respectivamente. Dada a alta correlação entre o relevo sombreado e o fator de iluminação para a avaliação dos dados de reflectância e índices de vegetação, o primeiro foi selecionado. A altimetria relativa foi extraída diretamente do modelo ASTER GDEM 2 por meio do fatiamento da amplitude de elevação do PET em 9 classes com intervalos de 40 metros.

Os índices de vegetação EVI e NDVI foram obtidos por meio da reflectância das bandas do sensor RapidEye. O EVI foi obtido com o uso da Equação 1, apresentada por Huete *et al.* (2002):

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

Onde: G corresponde ao fator de ganho, o qual se atribui o valor de 2,5; C_1 e C_2 são coeficientes de correção do espalhamento atmosférico causado pelos aerossóis e assumem os valores de 6,0 e 7,5, respectivamente; L é o fator de ajustamento para correção do efeito de solos, com valor de 1,0.

O NDVI foi obtido com o uso da Equação 2, apresentada por Rouse *et al.* (1973):

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

Onde: ρ_{NIR} representa a banda correspondente à região do infravermelho próximo do

espectro eletromagnético; ρ_{red} representa a banda correspondente à região do vermelho do espectro eletromagnético.

Análise dos dados espectrais em função da modelagem topográfica

A análise da influência do efeito topográfico sobre a reflectância e índices de vegetação foi feita a partir da leitura de pixels contendo valores de reflectância e de índices de vegetação, dentro de cada classe da modelagem topográfica. Devido à grande variação de tamanho entre as classes da modelagem topográfica, foi realizada uma amostragem aleatória de 1000 pixels para cada classe. Os dados resultantes foram organizados em planilhas e analisados estatisticamente e graficamente.

Afim de permitir a comparação entre as bandas, foi realizada a normalização dos valores amostrados em função de cada classe das variáveis topográficas. Os valores amostrados em função da orientação de vertentes foram normalizados a partir dos valores obtidos para a classe de orientação sul (a priori mais baixos). Para a altimetria foi escolhida a classe altimétrica mais baixa, com altitudes entre 120 e 160 metros. Já os valores referentes ao relevo sombreado foram amostrados em função da classe de condição intermediária de iluminação. A análise dos dados foi feita por meio de gráficos.

Para avaliar de forma direta as variações decorrentes da influência das condições de iluminação, foram elaborados dois gráficos tridimensionais a partir de dois transectos orientados nas direções Norte-Sul e Leste-Oeste. Os gráficos permitiram avaliar de forma mais eficaz o comportamento da reflectância e dos índices de vegetação sobre diferentes condições de iluminação determinadas pelo relevo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise dos dados do inventário florestal

Foram identificadas 31 famílias botânicas, 65 gêneros e 74 espécies nas 14 parcelas estudadas. Esses resultados concordam com os reportados na literatura para a mesma área de estudo (Ruschel *et al.*, 2005; Ruschel *et al.*, 2007; Breunig *et al.*,

2015). A maioria das espécies pertence ao estrato de arvoretas, o que compreende 77,13% das espécies, enquanto 21,26% das espécies pertencem ao estrato superior e apenas 1,61% ao estrato dominante. Os estratos de arvoretas e superior foram verificados em todas as sete parcelas, enquanto que espécies com maior altura características do estrato dominante foram verificadas apenas nas parcelas 1, 3 e 7 (Figura 1). Cerca de 20 % dos indivíduos identificados no levantamento estão localizados na parcela 7 (maior diversidade). Em relação ao aspecto topográfico, esta parcela diferencia-se das demais devido à grande declividade do terreno, além de estar localizada mais próxima ao Rio Uruguai.

Modelagem topográfica

Os resultados obtidos a partir da modelagem topográfica permitiram identificar as principais características do relevo local. A área do PET apresenta uma amplitude altimétrica de 360 m, variando de 120 m nas áreas próximas ao rio Uruguai, até 480m nas regiões mais elevadas (Figura 2a). Essa amplitude mostra que, em algumas áreas, o PET apresenta um relevo dissecado com encostas íngremes, associadas aos vales. A orientação de vertentes (Figura 2b) mostrou que as faces com vertentes orientadas na direção Norte ocupam 19,55% da área de estudo, com as vertentes a Leste apresentando menor área ocupada (7,68%). As demais direções apresentam uma cobertura média de 12,50% ($\pm 3,78\%$). A direção de orientação é parâmetro fundamental para o cálculo do relevo sombreado e afeta a quantidade de radiação disponível para a vegetação (entre outros fatores). Dessa forma, pode alterar os valores da reflectância em imagens de satélite. Considerando a trajetória do sol em um dia no Hemisfério Meridional, as vertentes Leste, Nordeste, Norte, Noroeste e Oeste, que recebem maior incidência de radiação solar, correspondem a 64,29% da área total do PET. As vertentes direcionadas a Sudoeste, Sul e Sudeste somam 35,72% da área do PET, sendo aquelas com menor incidência de radiação.

Devido a latitude intermediária, o PET está sujeito a uma grande amplitude do AZS ao longo do ano, que pode ultrapassar 30° de julho para dezembro. Tamanha variação leva a grandes modificações da imagem de relevo sombreado (Figura

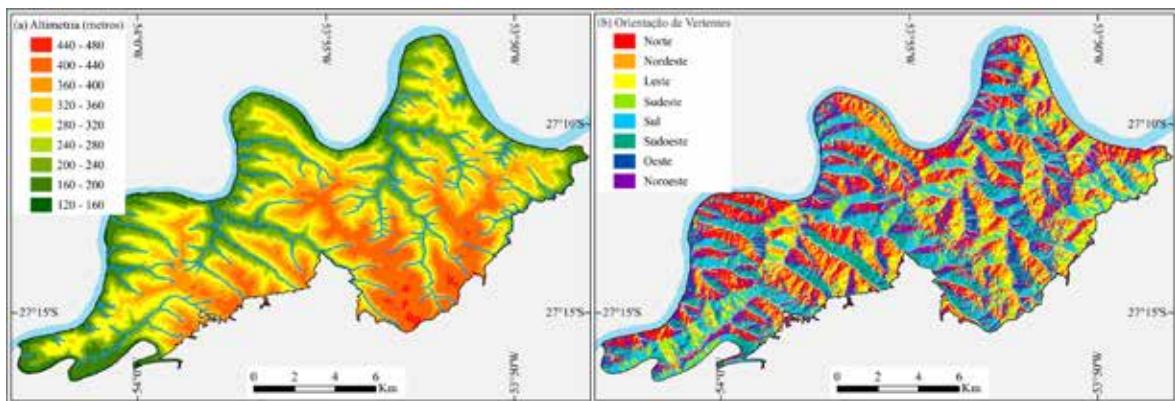


Figura 2. Resultados da modelagem topográfica do modelo ASTER GDEM v2 para (a) altimetria e (b) orientação de vertentes.

Figure 2. Results of the topographic modelling with ASTER GDEM v2 for the (a) altimetry and (b) aspect.

3). Verifica-se uma área sombreada muito maior no inverno (Figura 3a) quando comparado com as cenas adquiridas no final de outubro, com o Sol mais próximo do zênite (Figura 3b). As mudanças ocorridas entre as duas datas estão diretamente ligadas a diminuição do AZS de 52° (junho) para de 19° (outubro), alcançando uma amplitude solar de 33°. Essa variação leva a um maior efeito do sombreamento sobre a resposta espectral da vegetação nas cenas RapidEye adquiridas em junho.

Análise espectral em função da modelagem topográfica

As variações da reflectância de superfície estão associadas com as condições de sombreamento ao longo do ano e ao efeito da perda de folhas das espécies dominantes (SEMA/RS, 2005; Breunig *et al.*, 2015). Este efeito combinado sobre os produtos de sensoriamento remoto foi discutido por Breunig *et al.* (2015), com base na avaliação de imagens do sensor *Multi-angle Imaging Spectroradiometer* (MISR) e com modelos de transferência radiativa. Os resultados reportados são concordantes com

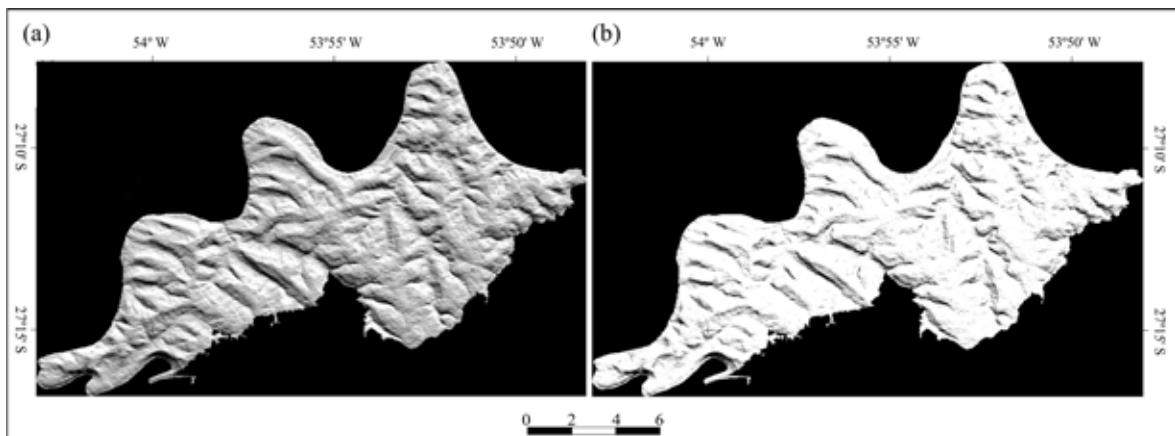


Figura 3. Relevo sombreado para (a) 28 de junho e (b) 17 de outubro, com ângulo zenital solar (AZS) de 52° e 19°, respectivamente.

Figure 3. Shaded relief for (a) June 28 and (b) October 17, 2012 with solar zenith angle (AZS) of 52° and 19°, respectively.

os vistos na inspeção dos espectros de reflectância média do RapidEye (Figura 4), adquiridos para o período de maior AZS (Figura 4a) e menor AZS (Figura 4b). Nas duas datas foi observada a influência das condições topográficas locais, na qual as áreas sujeitas a maior iluminação apresentam maior reflectância. As áreas sombreadas apresentam reflectância mais baixa, conforme esperado. Contudo, quando observada a variação no inverno, esses efeitos são muito mais pronunciados quando comparados com os vistos em meados de outubro de 2012.

A diferença de valores de reflectância entre junho e outubro deve considerar o caráter decidual da floresta combinado ao efeito da topografia local. Em junho, o dossel apresenta perda de folhas e um sombreamento bastante elevado, levando a grandes variações nos espectros (Figura 4a). Com o início do brotamento de folhas na primavera, ocorre uma homogeneização do dossel das espécies dominantes de forma a reduzir a anisotropia do dossel, associado a um aumento de IAF (Epiphanio *et al.*, 1995; Walter-Shea *et al.*, 1997). Em paralelo, ocorre uma redução de aproximadamente 33° no AZS de junho

para outubro, levando a uma redução do efeito de iluminação e tornando a cena mais homogênea, mesmo em áreas sujeitas a sombreamento em outubro (Figura 4b).

A distribuição da reflectância das bandas do vermelho e infravermelho próximo (IVP) na área do PET pode ser comparada (Figura 5). Em todas as bandas analisadas, a cena da data de 28 de junho (Figuras 5a e 5c, respectivamente) parece ser mais influenciada pelas condições topográficas locais do que a cena de 17 de outubro (Figuras 5b e 5d). As bandas mais influenciadas por este efeito foram a do vermelho e do IVP. Além das características do relevo, é importante considerar o efeito causado pelas variações causadas pela caducifólia de algumas espécies dominantes do PET. O trabalho de campo mostrou que, em junho, a floresta apresenta um menor índice de área foliar que em outubro. Ademais, as características florísticas e fitossociológicas introduziram variações nos padrões de reflectância para as distintas parcelas.

No que tange a orientação das vertentes, aquelas orientadas na direção Norte/Noroeste (faces iluminadas) apresentaram menores variações de

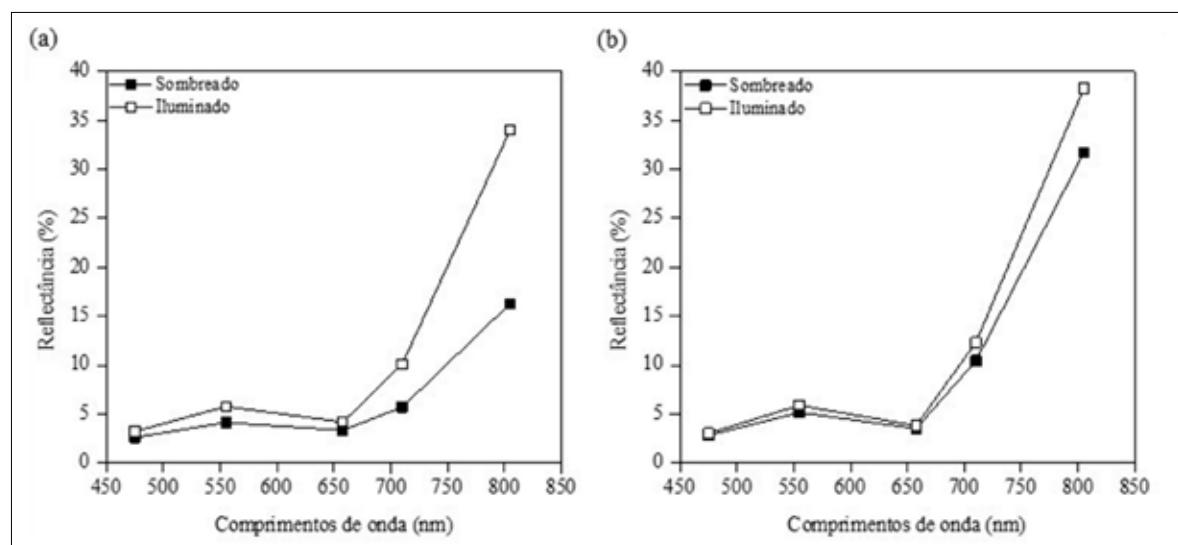


Figura 4. Espectros de reflectância de floresta estacional decidual para (a) 27 de junho e (b) 17 de outubro de 2012. Cada espectro refere-se a média de 1000 pixels aleatoriamente obtidos na área de cada classe de iluminação. As barras de desvio padrão são indicadas.

Figure 4. Reflectance spectra of seasonal deciduous forest for (a) June 27 and (b) October 17, 2012. Each spectrum refers to the average of 1000 pixels randomly selected over each illumination class. The standard deviation bars are indicated.

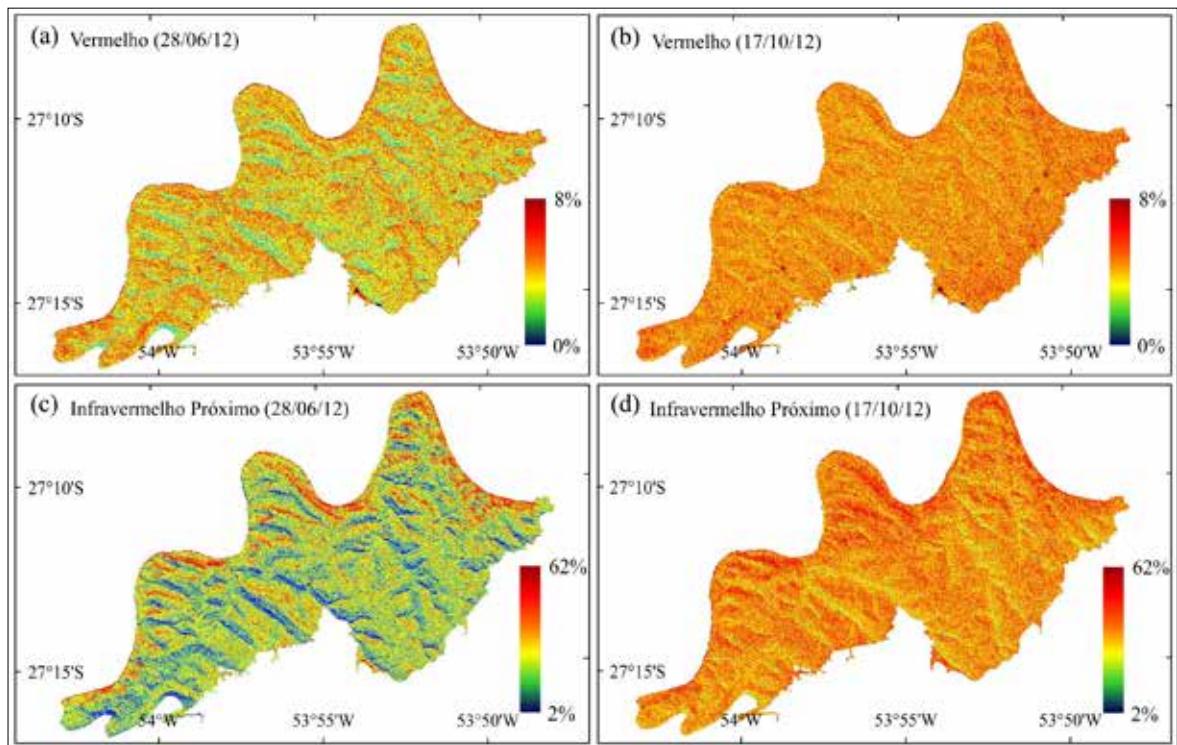


Figura 5. Distribuição espacial da reflectância do vermelho (a e b) e IVP (c e d) da floresta estacional decidual, em função da geometria de iluminação solar para as datas de 28 de junho e 17 de outubro de 2012.

Figure 5. Spatial distribution of red (a and b) and near infrared (NIR) (c and d) reflectance of the seasonal deciduous forest, as a function of the illumination geometry for June 28 and October 17, 2012.

reflectância entre junho e outubro, quando comparadas as vertentes Sul-Sudeste (faces sombreadas). Nas vertentes sul/sudoeste, o sombreamento predomina. As variações na reflectância entre datas são explicadas pelas mudanças fenológicas e florístico-estruturais da floresta estacional decidual do PET e pelo efeito da topografia local.

A avaliação dos gráficos dos valores médios amostrados de reflectância em função das variáveis topográficas (Figura 6) mostrou a existência de grandes tendências admitidas pela reflectância à medida que os parâmetros da modelagem topográfica são alterados. Os gráficos das Figuras 6a e 6b permitiram verificar que as vertentes dispostas nas direções contrárias à da incidência direta de radiação solar apresentaram valores de reflectância consideravelmente menores em relação as vertentes dispostas nas direções com incidência direta de radiação solar.

Considerando as bandas utilizadas na elaboração dos índices de vegetação EVI e NDVI, verificou-se que os valores de reflectância apresentaram maior amplitude de variação entre vertentes dispostas em condições distintas de iluminação/sombreamento na data de junho, sendo verificadas amplitudes de reflectância de 0,57%, 0,84% e 14,65%, respectivamente, para as bandas do azul, vermelho e infravermelho próximo. Na data de outubro, para as mesmas bandas, foram verificadas variações de reflectância de 0,17%, 0,27% e 5,99%. Desta forma, pode ser verificado uma maior isotropia do dossel em outubro. Os valores médios de reflectância amostrados em função da altimetria do PET (Figura 6c e 6d) permitiram verificar que as bandas do azul e vermelho apresentaram um comportamento de redução da reflectância em relação as áreas de maior altimetria do PET. No entanto, a banda do IVP apresentou um padrão

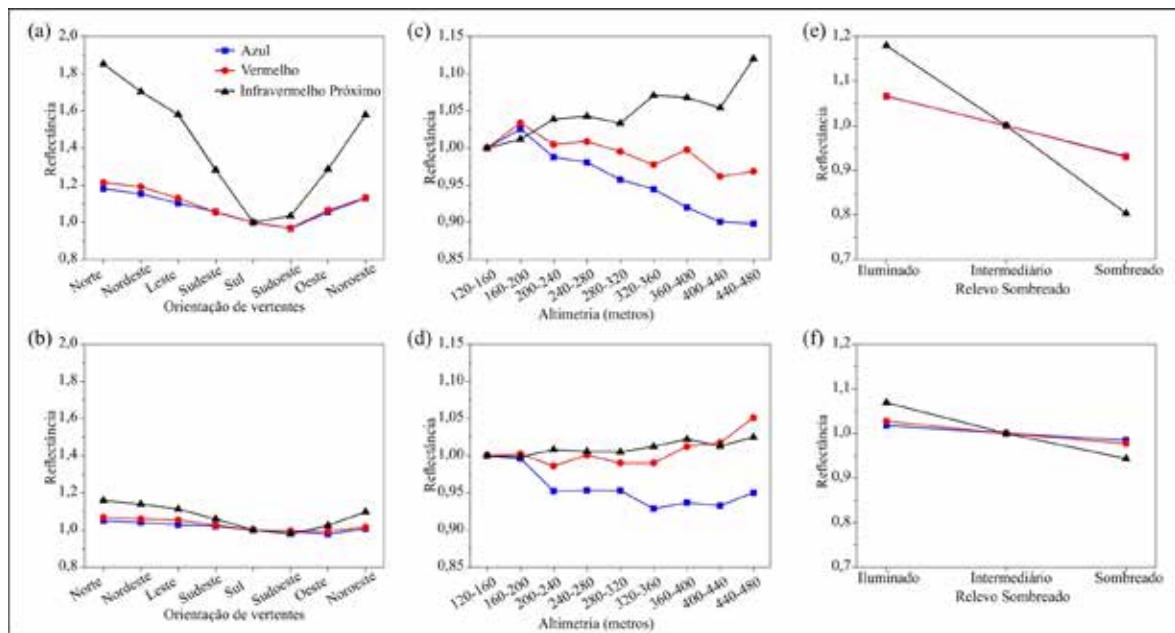


Figura 6. Valores de reflectância normalizada das bandas RapidEye do azul, vermelho e infravermelho próximo, mostrados em função da orientação de vertentes, altimetria e relevo sombreado em (a), (c) e (e) para 28 de junho e em (b) (d) e (f) para 17 de outubro de 2012, respectivamente.

Figure 6. Normalized reflectance values of the blue, red and near infrared RapidEye bands, displayed as a function of the aspect, altimetry and shaded relief in (a), (c) and (e) for June 28, and in (b), (d) and (f) for October 17, 2012, respectively.

contrário, com valores mais elevados de reflectância nas áreas mais altas. Essas duas tendências podem estar associadas a maior absorção por pigmentos em função do maior adensamento do dossel nas áreas mais elevadas. As tendências foram identificadas nas duas datas avaliadas, porém, em outubro com menor variação em função da altitude. É importante destacar que não existe uma relação direta entre altitude e reflectância, mas sim uma relação entre as características da vegetação para distintas altitudes (p.ex., distribuição de espécies), que induzem variações na reflectância.

O cálculo da imagem do cosseno da iluminação (relevo sombreado) mostrou que nas duas datas avaliadas (Figuras 6e e 6f), os maiores valores de reflectância encontram-se nas áreas iluminadas por meio de incidência direta de radiação. Por sua vez, os valores mais baixos foram verificados nas áreas com condições de iluminação intermediárias ou iluminadas de forma indireta. Os baixos valores de reflectância restringiram-se as áreas com grandes

condições de sombreamento, conforme esperado. No entanto, devido as diferenças de AZS entre as duas datas influenciar diretamente na redução das condições de sombreamento, a amplitude de variação dos valores de reflectância sofreu uma redução entre as datas, sendo verificadas amplitudes de 0,39%, 0,52% e 9,22%, respectivamente, para as bandas do azul, vermelho e infravermelho próximo. Na data de outubro, as variações foram de 0,1% para a banda do azul, 0,19% para a banda do vermelho e 4,36% para a banda do IVP. Na data de outubro, devido ao maior brotamento de folhas (aumento da clorofila), foi verificada uma maior absorção por parte das bandas do visível, condicionando uma menor amplitude de variação, em virtude da baixa reflectância. A banda do IVP, no entanto, apresentou elevados valores de reflectância, tendo uma menor influência de baixos valores de reflectância de áreas sombreadas, uma vez que em outubro as áreas sombreadas restringiram-se apenas aos fundos dos vales.

A análise das três bandas avaliadas mostrou que as bandas do vermelho e do IVP foram as que apresentaram maior sensibilidade tanto em relação as condições de estado fenológico da vegetação, quanto as variações de iluminação. Neste sentido, a elaboração dos transectos a partir de vertentes dispostas nos sentidos Norte-Sul e Leste-Oeste mostraram que a orientação das vertentes tende a condicionar as variações da reflectância em função das condições de iluminação associadas a cada direção das vertentes (Matsushita *et al.*, 2007).

Em relação a banda do vermelho, os valores de reflectância para a data de junho (Figura 7a) apresentaram uma grande amplitude de variação associada a direção das vertentes. Na data de junho, os valores de reflectância tendem a ser mais elevados em relação aos valores analisados na data de outubro. Na primeira data ocorrem condições geométricas que propiciam o aumento do sombreamento e a caducifólia das espécies que constituem

o estrato arbóreo dominante, contribuindo para elevar a reflectância na banda do vermelho. Em outubro, em função da absorção da clorofila na banda do vermelho, os valores de reflectância foram baixos em sua maioria (Figura 7c). No entanto, da mesma forma como verificado na data de junho, a vertente orientada ao norte apresentou os valores mais elevados de reflectância, sendo que a vertente com direção sul concentrou os valores mais baixos. Em geral, foi verificado um forte condicionamento da reflectância em função da direção das vertentes.

Na data de junho, o transecto contendo a banda do IVP (Figura 7b) mostrou grande variação nos valores de reflectância. Esta variação mostrou-se relacionada diretamente às condições de iluminação condicionadas pelo relevo, sendo que a vertente com direção norte, que recebe iluminação direta, apresentou os valores mais elevados. Por sua vez, a vertente orientada na direção sul, na qual a incidência de radiação solar é baixa, faz com que

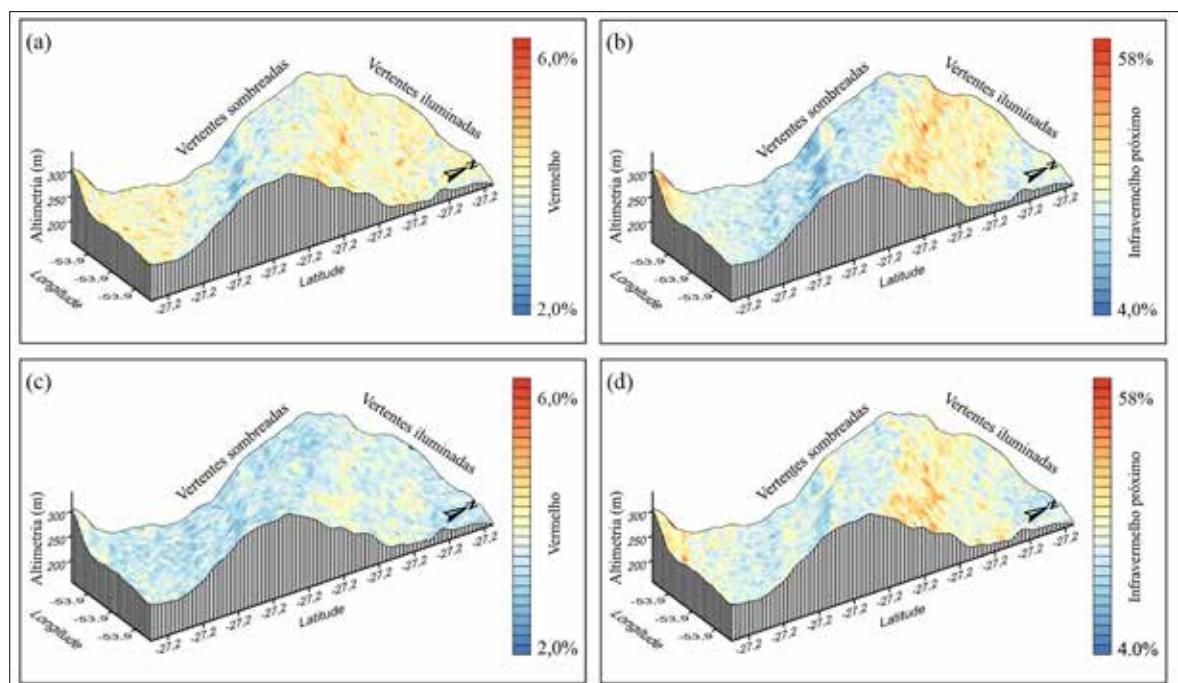


Figura 7. Variação da reflectância das bandas do vermelho e infravermelho próximo do RapidEye em função das características do relevo para um transecto Norte-Sul na data de junho (a, b) e outubro (c, d) de 2012.

Figure 7. Reflectance variation of the red and near infrared RapidEye bands as a function of relief characteristics over a North-South transect for June (a, b) and October (c, d), 2012.

ocorra sombreamento ou menor resposta espectral da vegetação. Desta forma, a análise da reflectância das bandas do vermelho e do IVP aponta que para junho ocorre um condicionamento de reflectância pelas condições de iluminação, sendo este um fator importante na resposta da reflectância da vegetação, além de seus próprios atributos biofísicos. Em outubro, a reflectância da banda do IVP (Figura 7d), embora apresente-se elevada e com menor amplitude de variação em relação a data anterior, possui valores com a mesma tendência em relação a orientação das vertentes e ao condicionamento da incidência de iluminação causada por estas.

Embora as condições de iluminação tendam a mostrar-se como fatores dominantes sobre as características da reflectância, os valores encontrados nos transectos permitiram identificar a ocorrência de uma redução na amplitude de variação das medidas de reflectância para as duas bandas. No IVP, esta redução pode estar relacionada ao estado fenológico da vegetação, visto que em outubro, em

função do período de brotamento das folhas, em especial das espécies caducifólias, tende a ocorrer uma maior isotropia em relação ao cenário de junho. Em relação aos transectos elaborados no sentido Leste-Oeste (Figura 8), foi encontrado um condicionamento menor da iluminação sobre os valores de reflectância, quando comparado com a variação encontrada nas vertentes Norte-Sul.

Analizando os valores da reflectância da banda do IVP foi identificada uma variação maior entre as medidas, sendo que na data de junho (Figura 8b) foi possível identificar de forma mais clara as diferenças de medidas de reflectância entre as vertentes. As vertentes orientadas na direção leste mostraram reflectância mais elevada, enquanto que a vertente disposta no sentido oeste apresentou valores mais baixos de reflectância, conforme esperado. Na data de outubro (Figura 8d), assim como ocorreu no transecto Norte-Sul, foi identificada uma redução nas amplitudes dos valores pelo estado fenológico da vegetação. Da mesma forma, como verificado na

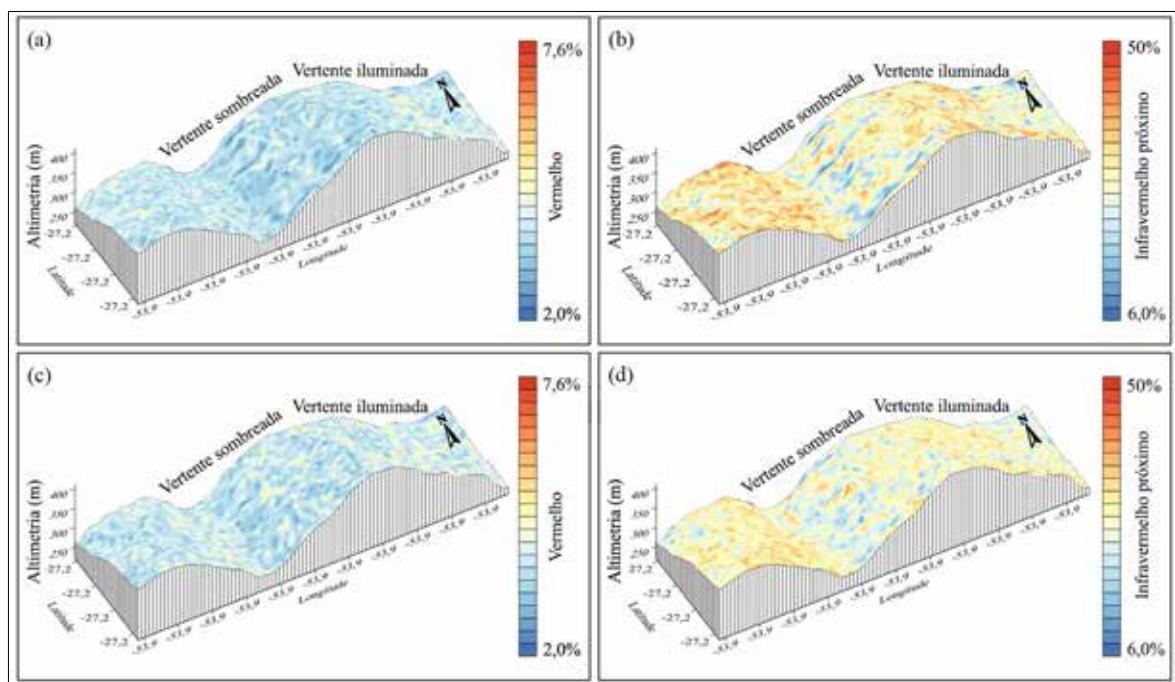


Figura 8. Variação da reflectância das bandas do vermelho e infravermelho próximo do RapidEye em função das características do relevo em um transecto Leste-Oeste em junho (a, b) e outubro (c, d) de 2012.

Figure 8. Reflectance variation of the red and near infrared RapidEye bands as a function of relief characteristics over a East-West transect for June (a, b) and October (c, d), 2012.

data de junho, as medidas de reflectância em outubro apresentaram-se dependentes das condições de iluminação condicionadas pelo efeito topográfico, porém, em menor magnitude. Analisando a reflectância do vermelho (junho-Figura 8a e outubro-Figura 8c), fica clara sua menor dependência do sombreamento quando comparado com o IVP.

Avaliação dos índices de vegetação

Visto que a floresta subtropical decídua predomina no PET, verifica-se que as características locais de topografia controlam em parte as variações dos índices de vegetação (Figura 9). Da mesma forma como verificado por Matsushita *et al.* (2007), o EVI foi mais afetado pelas condições locais de iluminação. Apesar de ser mais sensível às variações estruturais da vegetação, o EVI não normaliza os efeitos externos (topográficos) como faz o NDVI, que é um índice normalizado. De fato, a alta correlação do EVI com a banda do IVP (Galvão

et al., 2011) mostrou que o índice não normaliza os dados, mas sim, representa um índice da diferença entre a reflectância do vermelho e do IVP (Peng *et al.*, 2011; Breunig *et al.*, 2015).

Embora o estudo feito por Matsushita *et al.* (2007) comprove que o EVI apresenta grande dependência em relação ao efeito topográfico (Figura 9c e 9d), para a data de junho foi verificada uma dependência do índice NDVI em relação as áreas sombreadas do PET (Figura 9a). No entanto, esta variação foi menor em relação a apresentada pelo EVI mesmo em áreas com elevado sombreamento. Em relação a data de outubro (Figura 9b), foi identificada uma redução da amplitude dos valores da reflectância, indicando que, à medida em que se avança para a primavera e verão, ocorre uma forte redução da dependência do efeito topográfico devido a redução do AZS e brotamento de folhas novas (redução da anisotropia do dossel). O EVI, que apresentou elevada variação de medidas, conforme

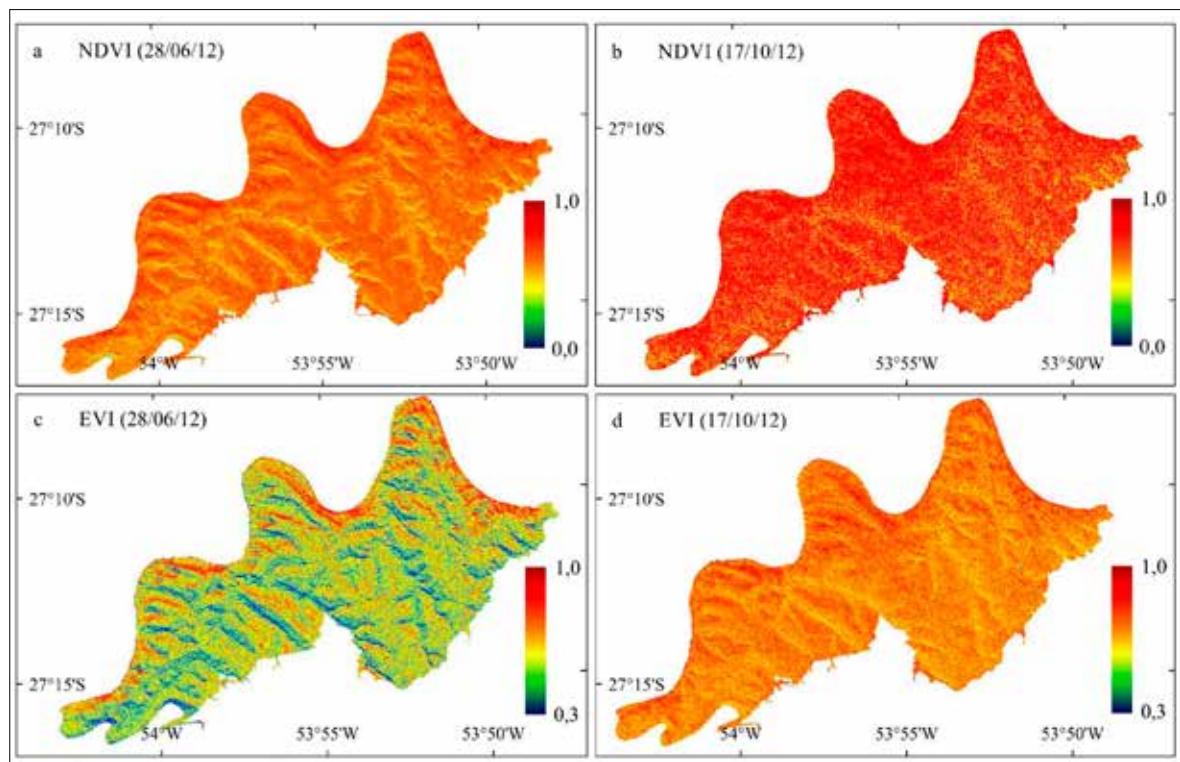


Figura 9. Variações espaciais do NDVI e EVI para as datas de 28 de junho (a, c) e 17 de outubro (b, d) de 2012.

Figure 9. Spatial variation of NDVI and EVI for June 28 (a, c) and October 17 (b, d), 2012.

as diferentes características de iluminação presentes na data de junho (Figura 9c), ainda se mostrou fortemente controlado pelas condições locais de iluminação na data de outubro (Figura 9d).

Cabe destacar que o efeito do brotamento de folhas não foi avaliado para quantificar a intereféncia de cada variável sobre o comportamento do NDVI e EVI, bem como o total de produtividade primária líquida. A distribuição espacial do índice EVI para a área do PET apresentou as mesmas características descritas por Matsushita *et al.* (2007) sobre a sua relação com a influência das condições de iluminação da área no momento da aquisição das imagens. As áreas dos vales e encostas iluminadas são nitidamente visíveis em ambas as datas analisadas.

Tanto o NDVI, quanto o EVI, amostrados em função das variáveis topográficas de orientação de vertentes, altimetria e relevo sombreado, apresentaram variações em relação às condições de sombreamento geradas em função das características do relevo do PET (Figura 10). Embora ocorra uma

variação natural destes índices entre as duas datas avaliadas em função da mudança nas condições fenológicas da vegetação do PET, as diferenças entre as áreas sombreadas e iluminadas são nítidas e são consequência das variações locais de iluminação, deciduidade-brotamento das espécies dominantes e variações locais da distribuição de espécies. Em geral, as diferenças dos índices de vegetação diminuem de junho para outubro devido a um efeito combinado de redução do AZS e o aumento do índice de área foliar (Breunig *et al.*, 2015).

O NDVI (Figura 10a) e EVI (Figura 10b) apresentaram menor dependência da orientação de vertentes em outubro com relação a junho devido a redução do sombreamento e ao brotamento de novas folhas. O EVI novamente foi mais afetado, principalmente no inverno. Apesar de não haver relações de causa-efeito entre altimetria e índices de vegetação, foi identificado um padrão estável para o NDVI em junho (Figura 10c) e outubro (Figura 10d). Para o EVI, uma tendência de aumento do índice com a altitude foi encontrada para ambas

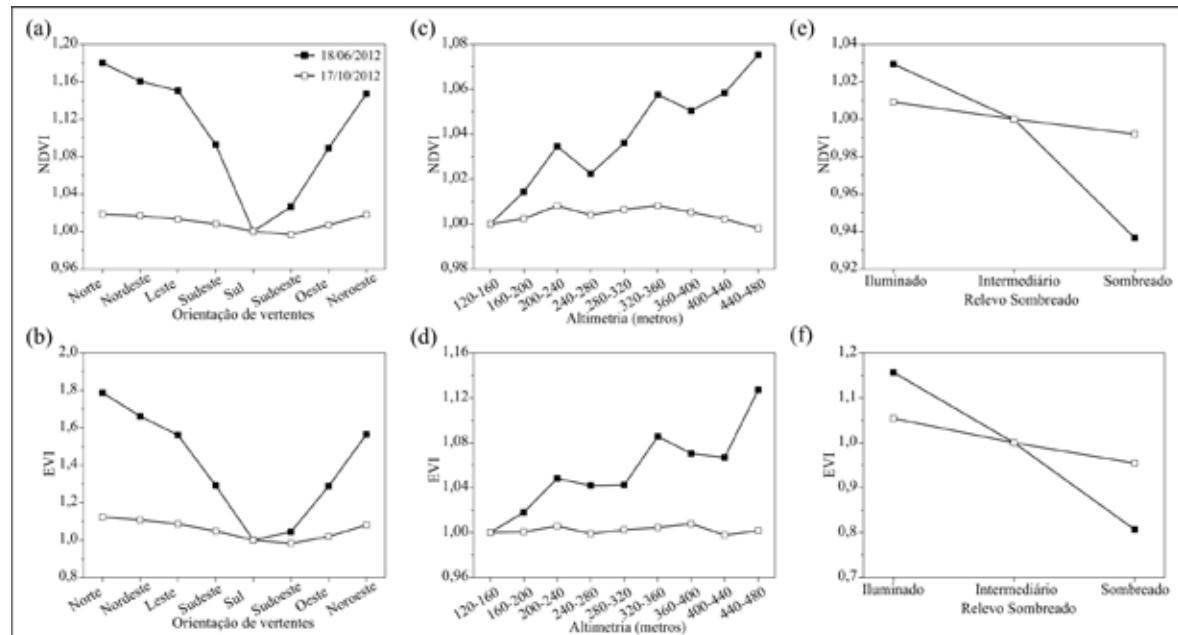


Figura 10. Variações normalizadas do NDVI (a, c, e) e EVI (b, d, f) em função da orientação de vertentes, altimetria e relevo sombreado para 28 de junho e 17 de outubro de 2012.

Figure 10. Normalized variations of NDVI (a, c, e) and EVI (b, d, f) as a function of the aspect, altimetry and shaded relief for June 28 and October 17, 2012.

as imagens RapidEye. Esse padrão pode indicar uma maior sensibilidade do EVI ao brotamento de folhas e a variações na estrutura do dossel (Huete *et al.*, 2002).

A avaliação do NDVI em função do relevo sombreado (Figura 10e) mostrou uma maior amplitude de variação entre cada classe de iluminação na data de junho. Neste sentido, as variações das condições de iluminação tendem a causar uma maior segmentação entre os valores de NDVI associados a cada condição de iluminação. No entanto, na data de outubro verificou-se que as diferenças entre os valores médios amostrados ocorreram de forma menos acentuada, o que mostra que a maior incidência de radiação direta provoca um aumento da reflectância, bem como a redução das áreas sombreadas, reduzindo o efeito topográfico sobre o NDVI. Por meio da análise dos valores médios amostrados de EVI em função do relevo sombreado (Figura 10f) foi verificado que este índice apresentou uma amplitude de variação maior que o NDVI. Os

valores de junho apresentaram grande amplitude de variação associados as classes de iluminação, sendo o valor médio das áreas sombreadas o que apresentou maior variação. Na data de outubro, a amplitude dos valores das classes diminuiu consideravelmente, embora ainda a amplitude entre os valores médios das classes seja maior em comparação com os valores obtidos a partir do índice NDVI. O efeito do sombreamento apresentou um controle mais efetivo sobre os valores do que as áreas com iluminação direta. De forma sintética, os perfis identificados pelos símbolos vazados da Figura 10 tendem a variar pouco ao redor de 1, enquanto que os dados de junho (símbolos sólidos) apresentam grandes variações.

De acordo com os transectos elaborados sobre vertentes orientadas na direção Norte-Sul, os índices de vegetação NDVI e EVI foram influenciados pelas condições de iluminação (Figura 11). Em tese, os índices de vegetação deveriam ressaltar a vegetação de acordo com as suas características

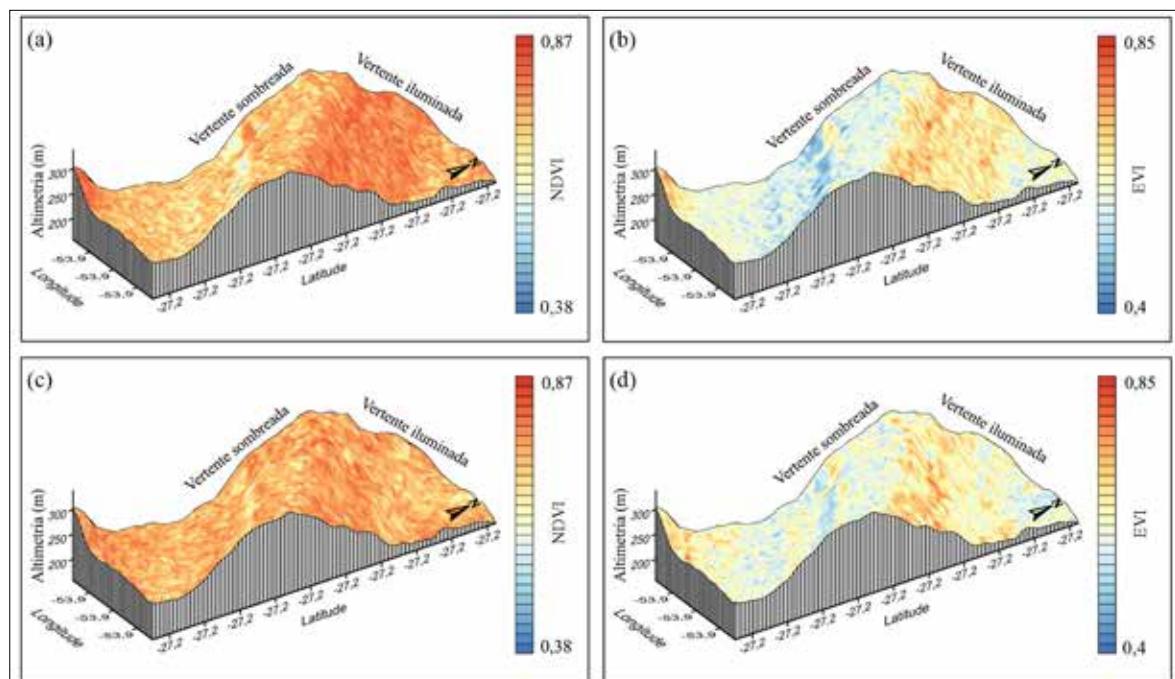


Figura 11. Variação dos índices de vegetação em função das características do relevo, em um transecto norte-sul para o (a) NDVI e (b) EVI de junho e (c) NDVI e (d) EVI de outubro.

Figure 11. Variation of vegetation indices as a function of relief characteristics in a North-South transect for the (a) NDVI and (b) EVI of June and (c) NDVI and (d) EVI of October.

fenológicas e eliminar os efeitos externos. No entanto, quando analisados sobre condições diferentes de iluminação sobre o relevo, os índices NDVI e EVI apresentaram variações de acordo com a diferença de incidência da radiação solar em relação a orientação das vertentes. A Figura 11a mostra que o NDVI de junho apresentou uma variação de acordo com a orientação das vertentes no transecto. A vertente com orientação na direção norte apresentou os valores mais elevados de NDVI, enquanto que valores mais baixos foram encontrados na vertente oposta (sul), caracterizada por apresentar condições de sombreamento causadas pela relação entre o efeito topográfico e a geometria de iluminação. Na data de outubro (Figura 11c), no entanto, a variação verificada foi menor do que na data anterior, ocorrendo valores muito próximos em ambas as vertentes.

O EVI analisado no transecto Norte-Sul (Figuras 11b e 11d) mostrou ser mais sensível as condições de sombreamento, em decorrência da grande amplitude de variação verificada entre as vertentes. Na vertente orientada na direção norte, os valores do EVI mantiveram-se elevados, enquanto que na vertente oposta, os valores encontrados foram mais baixos. Embora se tratando de uma área coberta por floresta, na qual os índices de vegetação deveriam apresentar valores elevados, os efeitos das condições de iluminação afetam a resposta do EVI mesmo na data de outubro (Figura 11d), em que há uma redução dos efeitos topográficos causada pela diminuição do AZS.

Em relação ao transecto Leste-Oeste (Figura não apresentada), o NDVI apresentou-se mais estável em relação ao condicionamento da iluminação causada pelo efeito topográfico. Na data de junho foram identificados baixos valores do índice associados a vertente oeste, enquanto que na data de outubro os valores apresentaram-se de forma quase que homogênia entre as vertentes, não havendo variações consideráveis. Novamente, o índice EVI apresentou grande dependência das condições de iluminação dispostas pelas vertentes, sendo que os maiores valores se concentraram em ambas as datas nas vertentes com orientação leste, as quais apresentam maior incidência de radiação solar em relação as vertentes orientadas na direção oeste.

De maneira geral, entre as duas datas analisadas, as mudanças ocorridas nos valores amostrados de reflectância e nos índices de vegetação estão diretamente relacionadas a variação sazonal das condições de iluminação do PET em função do decréscimo do AZS verificado entre as duas datas. De acordo em Ayoade (2011), a variação do ângulo de incidência solar associada à latitude do lugar é considerado o principal fator que condiciona as variações de iluminação das áreas. Cabe destacar que as características sazonais da vegetação podem influenciar a resposta espectral, resultando em um efeito combinado da geometria e iluminação e fenologia (Breunig *et al.*, 2015).

Com o levantamento florestal das sete parcelas amostrais foi possível perceber que embora o PET seja totalmente coberto por vegetação, o dossel não é homogêneo. Isso se deve a sua estratificação em três estratos arbóreos principais, mais um arbustivo e outro herbáceo, o que configura uma característica de grande sombreamento interno do dossel vegetativo implicando em alterações diretas na resposta espectral da vegetação.

Devido a estas condições, podem ser verificadas variações na resposta das bandas, em especial na banda do vermelho, causadas pelas estruturas não foliares, pelo efeito de substrato (background) e pelo sombreamento sobre os estratos inferiores do dossel (causado pelas árvores de maior porte). Estas variações influenciam na resposta dos índices de vegetação, nos quais o aumento da resposta na banda do vermelho tende a reduzir os valores dos índices.

Embora exista a ocorrência destas características de sombreamento interno do dossel, o sombreamento causado pelo relevo é o que mais influenciou na resposta tanto da reflectância das bandas, quanto na dos valores dos índices de vegetação, formando áreas de maior e menor reflectância. O sombreamento interno afeta de forma mais direta as variações entre pixel vizinhos, especialmente considerando sensores de resolução espacial alta como o RapidEye. Novos estudos, com um maior controle de campo, podem auxiliar no entendimento do efeito do sombreamento interno em florestas caducifólias.

Em geral, o resultado mostra que os índices de vegetação avaliados podem ser influenciados

pelas variações locais de topografia, alterando as estimativas de parâmetros biofísicos e bioquímicos da vegetação (Galvão *et al.*, 2016).

CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que a reflectância da floresta estacional decidual do PET varia fortemente em função dos aspectos geomorfológicos locais, como orientação de vertentes, altitude e relevo sombreado. Em geral, ocorre uma redução da anisotropia do período de maior AZS (junho) para o período de menor AZS (outubro). O estudo do efeito do sombreamento/iluminação mostrou que o NDVI é menos afetado pelas variações sazonais das condições de iluminação do que o EVI. Tanto a reflectância, como os índices de vegetação, apresentaram valores maiores na orientação norte e valores menores na orientação sul.

O estudo chama a atenção para os cuidados necessários quando imagens de diferentes dadas são utilizadas para as estimativas e monitoramento de áreas florestais. Como a floresta do PET é caducifólia, novos estudos são recomendados para avaliar o efeito da deciduidade das espécies dominantes do estrato superior e do sombreamento interno do dossel.

REFERÊNCIAS

- Asner, G. P. (1998), "Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance", *Remote Sensing of Environment*, pp. 234–253, doi:10.1016/S0034-4257(98)00014-5.
- Ayoade, J. O. (2011), *Introdução à climatologia para os trópicos*, 15 ed., Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 332 pp.
- Blackbridge (2015), *RapidEye Satellite Imagery Product Specifications*, Version 6.1 [http://blackbridge.com/RapidEye/upload/RE_Product_Specifications_ENG.pdf: 04 de julho de 2015].
- Brack, P., R. M. Bueno, D. B. Falkenberg, M. R. C. Paiva, M. Sobral, J. R. Stehmann (1985), "Levantamento florístico do Parque Estadual do Turvo, Tente Portela, Rio Grande do Sul, Brasil". *Roessleria*, vol. 7, no. 1, pp. 69-94.
- Breunig, F. M., L. S. Galvão, A. R. Formaggio, J. C. N. Epiphanio (2013), "Influence of data acquisition geometry on soybean spectral response simulated by the prosail model", *Engenharia Agrícola*, vol. 33, pp. 176 – 187, doi: 10.1590/S0100-69162013000100018.
- Breunig, F. M., L. S. Galvão, J. R. Santos, A. A. Gitelson, Y. M. Moura, T. S. Teles, W. Gaida (2015), "Spectral anisotropy of subtropical deciduous forest using MISR and MODIS data acquired under large seasonal variation in solar zenith angle", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 35, pp. 294-304, doi:10.1016/j.jag.2014.09.017.
- Bulfe, N. M. L. (2008), Dinâmica de clareiras originadas de exploração seletiva de uma floresta estacional semidecidual na Província de Misiones, nordeste da Argentina, dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 73 pp.
- Chen, J. M., J. Liu, S. G. Leblanc, R. Lacaze, J. L. Roujeau (2003), "Multi-angular optical remote sensing for assessing vegetation structure and carbon absorption", *Remote Sensing of Environment*, no. 84, pp. 516-525, doi:10.1016/S0034-4257(02)00150-5.
- De Wasseige, C., P. Defourny (2004), "Remote sensing of selective logging impact for tropical forest management", *Forest Ecology and Management*, vol. 188, pp. 161-173, doi:10.1016/j.foreco.2003.07.035.
- Eckert, S. (2012), "Improved Forest Biomass and Carbon Estimations Using Texture Measures from WorldView-2 Satellite Data", *Remote Sensing*, vol. 4, no. 4, pp. 810-829, doi:10.3390/rs4040810.
- Eckert, S., H. R. Ratsimba, L. O. Rakotondrasoa, L. G. Rajaoelison, A. Ehrenspurger (2011), "Deforestation and forest degradation monitoring and assessment of biomass and carbon stock of lowland rainforest in the Analanjirofo region, Madagascar", *Forest Ecology and Management*, vol. 262, no. 11, pp. 1996-2007, doi:10.1016/j.foreco.2011.08.041.
- Epiphanio, J. C. N., A. R. Formaggio, D. M. Valeriano, J. B. Oliveira (1996), "Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo", *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 20, pp. 467-474, doi: 10.1590/S1806-66902014000300002.
- Epiphanio, J. C. N., A. R. Huete (1995), "Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in Alfalfa", *Remote Sensing of Environment*, vol. 51, no. 3, pp. 351-360, doi:10.1016/0034-4257(94)00110-9.
- EXELIS (2014), *ENVI version 5.0*, Boulder, Colorado: Exelis Visual Information Solutions.
- Galvão, L. S., F. M. Breunig, J. R. Santos, Y. M. Moura (2013), "View-illumination effects on hyperspectral vegetation indices in the Amazonian tropical forest", *International Journal of Applied Earth Observation and*

- Geoinformation*, vol. 21, pp. 291-300. doi:10.1016/j.jag.2012.07.005.
- Galvão, L. S., J. R. Santos, D. A. Roberts, F. M. Breunig, M. Toomey, Y. M. Moura (2011), “On intra-annual EVI variability in the dry season of tropical forest: A case study with MODIS and hyperspectral data”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 9, pp. 2350-2359. doi:10.1016/j.rse.2011.04.035.
- Galvão, L.S., D. A. Roberts, A. R. Formaggio, I. Numanata, F. M. Breunig (2009), “View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using offnadir Hyperion data”, *Remote Sensing of Environment*, vol.113, pp.846856. doi:10.1016/j.rse.2008.12.010.
- Galvão, L.S., F. M. Breunig, T. S. Teles, W. Gaida, R. Balbinot, (2016). “Investigation of terrain illumination effects on vegetation indices and VI derived phenological metrics in subtropical deciduous forests”, *GIScience & Remote Sensing*, vol. 53, no. 3, pp. 360-381 (2016), doi: 10.1080/15481603.2015.1134140.
- Grinand, C., F. Rakotomalala, V. Gond, R. Vaudry, M. Bernoux, G. Vieilledent (2013), “Estimating deforestation in tropical humid and dry forests in Madagascar from 2000 to 2010 using multi-date Landsat satellite images and the random forests classifier”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 139, pp. 68-80, doi:10.1016/j.rse.2013.07.008.
- Guadagnin, D. L. (1994), Zonificación del Parque Estadual do Turvo, RS, Brasil, y directivas para el plan de manejo, disertación (Maestría en manejo de vida silvestre), Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Huete, A. R. (2002), “Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 83, no. 1, pp. 195-213, doi:10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
- Hufkens, K., M. Friedl, O. Sonnentag, B. H. Braswell, T. Milliman, A. D. Richardson (2012), “Linking near-surface and satellite remote sensing measurements of deciduous broadleaf forest phenology”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 117, pp. 307-321, doi:10.1016/j.rse.2011.10.006.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1986), *Folhas SH 22 Porto Alegre e parte das folhas SH 21 e SI 22 Lagoa Mirim: Levantamento de Recursos Naturais, Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra*, vol. 33, IBGE, Rio de Janeiro.
- Jensen, J. R. (2009), *Remote Sensing of the environment: an Earth resource perspective*, 2nd ed., Prentice Hall Series in Geographic Information Science, 598 pp.
- Lefsky, M. A., D. Harding, W. Cohen, G. Parker, H. Shugart (1999), “Surface Lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of Eastern Maryland, USA”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 67, pp. 83-98, doi:10.1016/S0034-4257(98)00071-6.
- Matsushita, B., W. Yang, J. Chen, Y. Onda, G. Qiu (2007), “Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest”, *Sensors*, vol. 7, no. 11, pp. 2636-2651, doi:10.3390/s7112636.
- Morton, D. C., G. J. Collatz, D. Wang, J. T. Randerson, L. Giglio, and Y. Chen (2013), “Satellite-based assessment of climate controls on US burned area”, *Biogeosciences*, vol. 10, no. 1, pp. 247-260, doi: 10.5194/bg-10-247-2013.
- Peng, Y., A. A. Gitelson, G. Keydan, D. C. Rundquist, W. Moses (2011), “Remote estimation of gross primary production in maize and support for a new paradigm based on total crop chlorophyll content”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 4, pp. 978-989. doi:10.1016/j.rse.2010.12.001.
- Ponzoni, F. J., Y. E. Shimabukuro (2010), *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação*, São José dos Campos, Parêntese, 127 pp.
- Rosa, P. A., F. M. Breunig, R. Balbinot, L. S. Galvão (2013), “Dinâmica da floresta do Parque Estadual do Turvo com índices de vegetação”, *Floresta e Ambiente*, vol. 20, pp. 487-499, doi: 10.4322/floram.2013.034.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering (1973), “Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS”, *Proceedings of the third Earth Resources Technology Satellite Symposium*, NASA, pp. 309-317.
- Ruschel, A. R., M. Guerra, B. Moerschbacher, R. O. Nodari (2005), “Valuation and characterization of the timber species in remnants of the Alto Uruguay River ecosystem, southern Brazil”, *Forest Ecology and Management*, vol. 217, no. 1, pp. 103-116, doi:10.1016/j.foreco.2005.05.054.
- Ruschel, A. R., R. O. Nodari, B. M. Moerschbacher (2007), “Woody plant species richness in the Turvo State Park, a large remnant of Deciduous Atlantic Forest, Brazil”, *Biodiversity and Conservation*, vol. 16, pp. 1699-1714, doi: 10.1007/s10531-006-9044-7.
- Sandmeier, S. R. (2000), “Acquisition of bidirectional reflectance factor data with field goniometers”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 73, no. 3, pp. 257-269, doi:10.1016/S0034-4257(00)00102-4.
- SEMA/RS – Secretaria Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul (2005), “O Plano de Manejo do Parque Estadual do Turvo - RS”, SEMA, Porto Alegre [http://www.sema.rs.gov.br/upload/Plano_manejo_PETurvo.pdf. 21 de abril de 2013].
- Sharma, R. C., K. Kajiwara, Y. Honda (2013), “Estimation of forest canopy structural parameters using

- kernel-driven bi-directional reflectance model based multi-angular vegetation indices”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 78, pp. 50-57, doi:10.1016/j.isprsjprs.2012.12.006.
- Teles, T. S., L. S. Galvão, F. M. Breunig, R. Balbinot, W. Gaida (2015), “Relationships between MODIS phenological metrics, topographic shade, and anomalous patterns of temperature in seasonal deciduous forest from south Brazil”, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 36, no. 18, doi: 10.1080/01431161.2015.1084437.
- Thorp, K. R., G. Wang, A. L. West, M. S. Moran, K. F. Bronson, J. W. White, J. Mon (2012), “Estimating crop biophysical properties from remote sensing data by inverting linked radiative transfer and ecophysiological models”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 124, pp. 224-233, doi:10.1016/j.rse.2012.05.013.
- Walter-Shea, E. A., J. Privette, D. Cornell, M. A. Mease, C. J. Hays (1997), “Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in alfalfa”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 61, no. 1, pp. 162-177, doi:10.1016/S0034-4257(96)00250-7.
- Wu, C., A. Gonsamo, C. M. Gough, J. M. Chen, S. Xu (2014), “Modeling growing season phenology in North American forests using seasonal mean vegetation indices from MODIS”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 147, pp. 79-88, doi:10.1016/j.rse.2014.03.001.
- Zhan, Z., H. Liu, H. Li, W. Wu, B. Zhong (2012), “The relationship between NDVI and terrain factors: a case study of Chongqing”, *Procedia Environmental Sciences*, no. 12, pp. 765-771, doi:10.1016/j.proenv.2012.01.347.