

Análise do efeito topográfico sobre índices de vegetação utilizando imagens Rapideye na Serra do Mar – PR

Analysis of the topographic effect on vegetation indices using Rapideye images in Serra do Mar – PR

Elaine de Cacia de Lima Frick*, Tony Vinicius Moreira Sampaio*, Fabio Marcelo Breunig**

* Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná (UFPR – Curitiba - PR, Brasil), elaineclfrick@gmail.com, tony2sampaio@gmail.com

** Departamento de Engenharia Florestal, UFSM FW - Universidade Federal de Santa Maria – Campus de Frederico Wesphalen, breunig@ufsm.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v56i0.85922>

Resumo

Ao explorar dados espectrais da vegetação deve-se considerar eliminar ou reduzir os efeitos da geometria de iluminação e observação, bem como as implicações associadas aos efeitos topográficos. O objetivo deste estudo foi analisar o efeito topográfico sobre índices de vegetação (SR, NDVI, EVI e RENDVI) na região da Serra do Mar, no estado do Paraná, utilizando dados da constelação Rapideye, após o emprego dos métodos semiempíricos de correção topográfica Minnaert e Correção-C. Observou-se que os dois métodos de correção empregados diminuíram o efeito topográfico nas bandas, proporcionando diminuição no valor do desvio padrão, o que propiciou uma menor correlação entre o fator cosseno e a refletância. Para o método Minnaert observou-se uma diferença significativa (95% confiança) entre todas as bandas não corrigidas e as corrigidas topograficamente. Para o método da Correção-C, a diferença não foi significativa ($p\text{-value} > 0,05$) para as bandas Red-Edge e NIR. Na avaliação sobre os índices de vegetação calculados com as imagens sem e com correção topográfica, foi aplicado o teste não paramétrico de Wilcoxon, atestando que apenas a correção Minnaert apresentou uma diferença significativa de 95%, sendo para este estudo o método mais eficaz na redução do efeito topográfico. Apesar da magnitude do efeito das diferenças da métrica de Cohen (r) ter sido baixa, se faz necessária aplicação de métodos de correção topográfica para uma redução consistente do efeito topográfico nos índices de vegetação de terrenos acidentados, proporcionando a extração de informações espectrais mais fidedignas. Percebeu-se ainda que índices normalizados são menos sensíveis aos efeitos topográficos.

Palavras-chave:

Sensoriamento remoto, Informações espectrais, Iluminação local, Correção topográfica.

Abstract

When exploring vegetation spectral data, consideration should be given to eliminating or reducing the effects of illumination and observation geometry, as well as the implications associated with topographic effects. The goal of this study was to analyze the topographic effect on vegetation

indices (SR, NDVI, EVI, and RENDVI) in the Serra do Mar region, in the state of Paraná, using data from the Rapideye constellation after using employing the semi-empirical methods of correction topographic Minnaert and Correction-C. It was observed that the two correction methods reduced the topographic effects on the bands, providing a decrease in the standard deviation values, which provided a lower correlation between the cosine factor and the reflectance in per-pixel analysis. For the Minnaert method, a significant difference (95% confidence) was observed among all uncorrected and topographically corrected bands. For the Correction-C method, the difference was not significant (p -value > 0.05) for the Red-Edge and NIR bands. Nonparametric Wilcoxon test was applied to evaluate the vegetation indices calculated with and without topographic correction. The results showed that only the Minnaert correction showed a significant difference of 95%, being for this study the most effective method in reduction of the topographical effect. Despite even though the magnitude of the effect of the differences in the Cohen metric (r) was low, it is necessary to apply topographic correction methods for a consistent reduction of the topographic effects on the vegetation indices of rough terrain, providing the extraction of more reliable spectral information. Also was noticed that normalized indices are less sensitive to topographical effects.

Keywords:

Remote sensing, Spectral information, Local lighting, Topographic correction.

I. INTRODUÇÃO

Segundo Teillet, Guindon e Goodenouch (1982), nas pesquisas realizadas utilizando respostas espectrais dos alvos, os efeitos das condições de contorno devem ser corrigidos na imagem. Dentre os efeitos destacam-se o terreno, uma vez que a refletância varia conforme a inclinação e a orientação da vertente imageada, que está sujeita aos efeitos de variações das condições atmosféricas, de iluminação e observação. Para Ponzoni et al. (2014) são tratados como “iluminação local” a associação dos efeitos causados pela geometria de aquisição de dados e os causados pelas características da topografia em áreas de relevo acidentado. No Brasil estes efeitos são comuns em áreas de florestas tropicais e subtropicais localizadas em latitudes médias (PONZONI et al., 2014; BREUNIG et al., 2015).

Pesquisadores passaram a considerar a influência indireta da topografia sobre a variação radiométrica em imagens e a avaliar a importância de sua correção para obter informações espectrais com melhor acurácia (MOREIRA, VALERIANO, 2014; PONZONI et al., 2014; GALVÃO et al., 2016; MOREIRA et al., 2016; PONZONI, 2016; GAIDA et al., 2016; OLIVEIRA, GALVÃO, PONZONI, 2019). Nesse sentido, os vários métodos de correção topográfica podem ser agrupados em três categorias principais: razão de banda, métodos empíricos ou semiempíricos e os físicos (WEN et al., 2009; ZHANG, GAO, 2011; BALTHAZAR, VANACKER, LAMBIN, 2012).

Entre os métodos disponíveis, se destacam os métodos semiempíricos de Minnaert e a Correção-C. A correção Minnaert é um método bastante utilizado proposto por Smith, Lin e Ranson (1980) que se apropria de conceitos do trabalho do astrofísico Minnaert (1941). A Correção-C é um método, segundo Oliveira, Galvão e Ponzoni (2019), que considera parâmetros topográficos e dados radiométricos em diferentes bandas espectrais, utilizado com frequência por pesquisadores como Riaño et al. (2003), Hantson e Chuvieco (2011), Moreira e Valeriano (2014) e por eles mesmos, por apresentar bons resultados ao reduzir a variação espectral de alvos semelhantes em terrenos acidentados.

Como forma de avaliar o desempenho das correções topográficas em áreas de Floresta Atlântica em região de relevo acidentado, índices de vegetação foram utilizados nos estudos de Moreira e Valeriano (2014), Moreira et al. (2016), e Oliveira, Galvão e Ponzoni (2019). Segundo Huete, Didan e Leeuwen (1999) os índices de vegetação possibilitam realizar o monitoramento da vegetação, e avaliação das características biofísicas e bioquímicas em perspectiva espacial e temporal.

O índice de Razão Simples (SR), por exemplo, foi o primeiro a ser utilizado em trabalhos, obtido pela razão simples entre a refletância no infravermelho próximo e a refletância na região do vermelho (JORDAN, 1969). O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) desenvolvido por Rouse et al. (1973), favorece a identificação de mudanças temporárias na pigmentação do dossel, o monitoramento de mudanças na dinâmica da vegetação, apresentando uma alta correlação com a densidade da vegetação e a porcentagem de cobertura (FREITAS, MELLO, CRUZ, 2005; KRISHNASWAMY et al., 2009). Índice de vegetação melhorado (EVI) melhora algumas respostas contidas na vegetação, por ser mais sensível às variações estruturais e arquitetônicas do dossel, além de reduzir as influências atmosféricas e do solo (HUETE et al., 2002). E o Índice de vegetação de diferença normalizada da borda vermelha (RENDVI), procura ressaltar as alterações da vegetação no limite do comprimento de onda do vermelho (alterações do conteúdo de água, por exemplo) (GITELSON, MERZLYAK, LICHTENTHALER et al., 1996).

Oliveira, Galvão e Ponzoni (2019) analisaram a sensibilidade de 16 índices de vegetação em relação aos efeitos topográficos utilizando dados hiperespectrais, apontando que os índices de vegetação possuem sensibilidades diferentes aos efeitos da topografia, com a magnitude dos efeitos sendo dependente das regiões espectrais de operação dos índices e das condições de declividade e orientação do terreno. Assim, a dependência do índice das bandas utilizadas na sua formulação pode levar a índices mais isotrópicos ou anisotrópicos (GAIDA et al., 2016).

O objetivo deste trabalho foi analisar o efeito topográfico sobre índices de vegetação na região da Serra do Mar, no estado do Paraná utilizando dados da constelação Rapideye após o emprego de métodos de correção topográfica semiempíricos Minnaert e Correção-C.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo refere-se à bacia hidrográfica do rio Jacareí com área de 40,17 km², localizada entre os municípios de Morretes e Paranaguá-PR, na região da Serra do Mar e do Litoral Paranaense. A seleção desta área ocorreu devido à região ter sido cenário, em 2011, de um evento de movimento de massa de grandes proporções por apresentar um relevo bastante acentuado (SILVEIRA et al., 2013), conforme Figura 1.

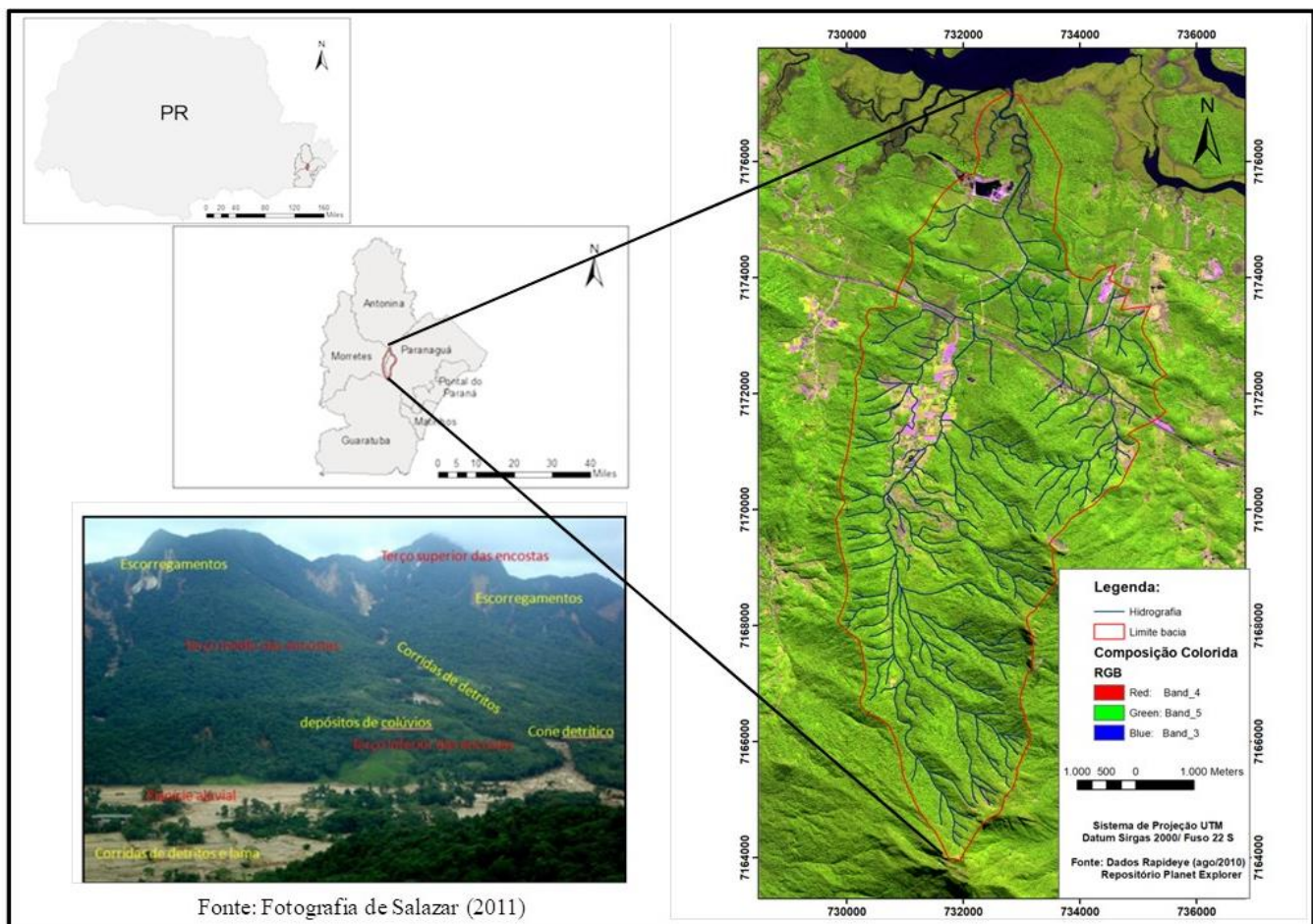


Figura 1 - Localização da área de estudo. Fonte: organizado pelos autores, 2021.

As altitudes encontradas na área de estudo partem de 0 m na Planície Litorânea, a mais de 1400 m na Serra do Mar. Segundo Silveira et al. (2013, p.627) as maiores declividades estão na margem direita do rio Jacareí, “com valor predominantemente superior a 40%, intrinsecamente condicionada pela diferença litológica, onde os corpos graníticos sustentam o elevado gradiente altitudinal, resultante de processos exógenos de erosão diferencial e endógenos de soerguimento de blocos”. Os tipos de solos encontrados na área segundo estudo geotécnico da MINEROPAR (2011) são: Gleissolos, Latossolos, Argissolos, Cambissolos, Neossolos Litólicos e Afloramentos Rochosos.

Em relação ao tipo climático, nas elevações da Serra do Mar a partir de 700 m de altitude, classifica-se segundo Köppen como tipo Cfb (Subtropical Úmido - Mesotérmico com verões frescos). Os índices pluviométricos são relativamente elevados, a diferença local decorre de chuvas orográficas com grande volume d’água nas cabeceiras das encostas devido à ascensão das massas úmidas frente ao relevo montanhoso (PINTO, 2015). A formação florestal presente na área de estudo constitui a Floresta Ombrófila Densa (Floresta Atlântica) que se “caracteriza por apresentar árvores de grande porte, acompanhadas por lianas e epífitas em abundância, influenciadas diretamente pelas massas de ar quentes e úmidas do oceano Atlântico e, pelas chuvas relativamente intensas e bem distribuídas ao longo do ano” (RODERJAN et al., 2002, p. 75).

Aquisição e pré-processamento dos dados de Sensoriamento Remoto

Para compor a extensão da bacia do rio Jacareí foram adquiridas as bandas Blue, Green, Red, Red-Edge e NIR de duas cenas RapidEye-4 (*tiles* 2227324 e 2227224) do repositório Planet Explorer (<https://api.planet.com/>). As imagens de 19/08/2010 foram pré-processadas em nível 3A– OrthoProduct– (*Radiometric, sensor and geometric corrections applied to the data*) com correção geométrica, apresentando resolução espacial nominal de 5 m.

Como a variação de direção e ângulo de iluminação influenciam diretamente a refletância dos alvos, fez-se necessário a conversão dos números digitais para valores físicos de radiância aparente e na sequência, os valores de radiância foram convertidos para refletância de superfície através do algoritmo FLAASH (*Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) (<https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/flaash.html>). Para sua execução no software Exelis Envi 5.3 (L3Harris Geospatial, 2021), foram utilizados os parâmetros da aquisição das imagens, a visibilidade padrão (40 km), modelo atmosférico subtropical (conforme a estação da imagem) e o modelo de aerossol rural.

Modelagem Topográfica

Para a modelagem topográfica (redução dos efeitos topográficos) adotou-se o modelo digital de elevação ALOS PALSAR com resolução espacial nominal de 12,5 m e reamostrado para 5 m para compatibilizar com a resolução espacial das bandas Rapideye.

A partir dos dados de azimute solar e elevação solar obtidos dos metadados das cenas Rapideye, obteve-se o valor do ângulo zenital solar, que com declividade e orientação de vertente, foram os parâmetros para o cálculo da iluminação local (*cosi* ou fator cosseno). Segundo Gaida (2015) há necessidade de modelagem prévia das condições locais de iluminação do terreno pelo sol, a qual requer o cálculo do cosseno do ângulo local de incidência solar (*cosi* ou fator cosseno) em relação à normal de cada pixel contido na imagem utilizada. Então, o fator cosseno foi calculado através da Equação 1 e utilizado nas correções topográficas.

$$\cos i = (\cos \varphi_s \cdot \cos \theta_z) + [\sin \varphi_s \cdot \sin \theta_z \cdot \cos (\theta_n - \varphi_n)] \quad (1)$$

Onde, φ_s representa o ângulo de declividade e φ_n representa o ângulo de orientação do terreno. Por sua vez, θ_z representa o ângulo zenital solar e θ_n o ângulo azimute solar.

O primeiro método para correção topográfica empregado no estudo foi o de Minnaert (Equação 2):

$$L \cos(\theta_e) = L_n \cdot [\cos(\theta_i) \cos(\theta_e)]^k \quad (2)$$

Onde, θ_e é o ângulo de visada efetivo; k é a constante de Minnaert; L_n é a refletância normalizada; L é a refletância detectada pelo sensor; e θ_i ($\cos i$) é o ângulo de incidência (ângulo entre a normal à superfície e o feixe de luz solar).

Para aplicação da Equação 2 foi necessário primeiramente obter de cada banda o valor da constante de Minnaert, ou constante k , que varia de 0 a 1 e mede o quanto uma superfície é Lambertiana (Tabela 1), através da regressão linear ($y = k_x x + b$), para obtê-la, a média dos valores de iluminação (fator cosseno) e de refletância de vegetação foram extraídas para cada banda das cenas Rapideye a partir da definição de 80 (oitenta) áreas amostrais, sendo definidas em locais com maior declividade na bacia e que apresentassem maior e menor iluminação (Figura 2).

Tabela 1 – Constante K obtida para cada banda a partir de regressão linear.

Regiões Espectrais	Cenas RapidEye	
	2227324	2227224
B1 – Azul	0,20	0,21
B2 – Verde	0,43	0,48
B3 – Vermelho	0,51	0,59
B4 – Red-edge (Borda vermelha)	0,57	0,68
B5 – Infravermelho próximo	0,58	0,73

Fonte: Organizado pelos autores, 2021.

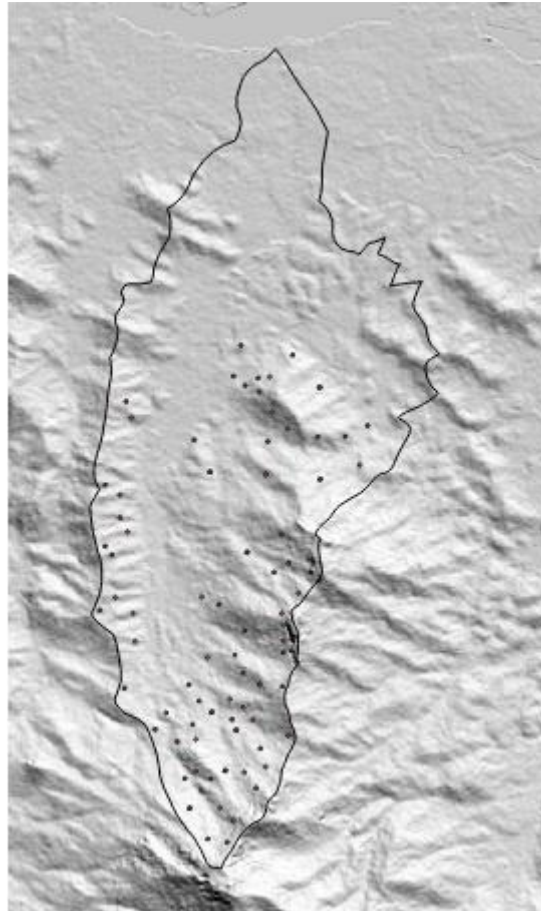


Figura 2 - Distribuição das amostras sobre o fator cosseno. Fonte: organizado pelos autores, 2021.

Depois de estimado o valor de k, houve a aplicação da Equação 3, que se refere a obtenção da refletância normalizada, outra variável necessária para rodar o modelo Minnaert (Equação 2 já citada).

$$L_n \frac{L \cdot \cos(\theta_n)}{[\cos(\theta_i) \cos(\theta_n)]^k} \quad (3)$$

O segundo procedimento de correção topográfica empregado no teste foi à Correção-C através da Equação 4:

$$\rho_h = \rho_t \left(\frac{\cos \theta_z + C}{\cos i + C} \right) \quad (4)$$

Onde, ρ_h representa a refletância em uma superfície horizontal e ρ_t representa a refletância em uma superfície inclinada, e C é uma proporção de coeficientes de uma regressão linear entre a refletância de superfície para cada banda espectral. A regressão linear mencionada é dada pela Equação 5:

$$\rho_{\lambda,i} = b_{\lambda} + m_{\lambda} \cdot \cos \gamma \quad (5)$$

Para a Correção-C os valores de “C” foram obtidos com a seleção de 1000 pontos em cada banda, através da regressão linear no momento da aplicação do algoritmo.

A avaliação do desempenho da correção topográfica e dos algoritmos aplicados para as bandas foi realizada através da extração dos valores de refletância das 80 áreas amostrais, por meio dos seguintes métodos: Análise e comparação visual das imagens pré e pós-correção topográfica; Análise do desvio Padrão dos valores de refletância em cada banda; Análise da correlação entre refletância espectral e fator cosseno para cada banda; Análise de diferenças ao nível de significância de 5% entre imagens não corrigidas e corrigidas topograficamente, utilizando tratamentos estatísticos realizados no OriginPro 2016 (OriginLab, 2016).

Geração dos índices de vegetação e avaliação dos efeitos topográficos

Para avaliar o efeito da correção topográfica sobre índices de vegetação, foram gerados dois cenários: sem correção e com correção topográfica, para os seguintes índices de vegetação: SR, NDVI, EVI e RENDVI (Tabela 2).

Tabela 2 – Índices de vegetação selecionados na análise dos efeitos de topografia.

Índice	Equação	Referência
SR	$SR = \frac{NIR}{RED}$	Jordan (1969)
NDVI	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Rousse et al. (1973)
EVI	$EVI = 2,5 \cdot \frac{NIR - RED}{NIR + (C1 \cdot RED) - (C2 \cdot BLUE) + L}$	Huete et al. (2002)
RENDVI	$RENDVI = \frac{NIR - RedEdge}{NIR + RedEdge}$	Gitelson, Merzlyak, Lichtenthaler (1996)

Para a determinação de EVI, o fator de ajuste de fundo do dossel (L) foi definido como 1 (um), enquanto os coeficientes do termo de resistência ao aerossol C1 e C2 foram definidos para 6 e 7,5, respectivamente. Fonte: Organizado pelos autores, 2021.

O tratamento estatístico dos dados foi realizado para verificar se os valores extraídos dos índices de cada área amostral apresentavam diferenças estatisticamente significativas ao nível de 5% (entre os índices de vegetação com e sem correção topográfica), indicando se os índices se apresentam sensíveis à modelagem topográfica. Os testes estatísticos aplicados foram: Shapiro-Wilk (teste w), proposto por Shapiro e Wilk (1965) para descobrir se os dados apresentavam normalidade; Wilcoxon (teste z), proposto por Wilcoxon (1945) para verificação da significância entre o conjunto de dados; e para mensurar o tamanho do efeito, ou seja, se realmente o conjunto de dados apresenta magnitude das diferenças, a métrica “r” de Cohen (1988) foi aplicada (Equação 6). Ao se calcular a métrica de Cohen como um complemento ao teste de significância da hipótese, é possível medir a potencial significância real de um efeito em uma intervenção, através da descrição do tamanho dos efeitos observados (LINDENAU e GUIMARÃES, 2012).

$$r = \frac{Z}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

Onde, Z proveniente do teste de Wilcoxon; raiz quadrada da soma dos tamanhos das amostras.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desempenho dos métodos de correção topográfica

A análise da correção topográfica sobre as bandas espectrais foi iniciada de forma visual comparando as bandas sem correção topográfica com as bandas corrigidas pelos métodos adotados. Observa-se que as imagens (Figura 3) em composição colorida (R4G5B3) 3B e 3C mostram-se mais suavizadas em comparação a imagem 3A, permitindo o aumento de refletância de áreas muito escuras. Porém, pixels muito escuros da imagem original que se referem ao local mais íngreme da bacia não foram completamente corrigidos pelos dois métodos por ser uma área com condições de iluminação extrema, de difícil correção topográfica. Nota-se ainda pela imagem da Figura 3C, na qual foi aplicado o método de Correção-C, não foi possível eliminar todo o efeito topográfico, apresentando uma rugosidade maior do que na imagem da Figura 3B, em concordância com Galvão et al. (2015), que trabalhou com dados com resolução espacial grosseira. Ao sul do recorte espacial notam-se as áreas sombreadas em que se encontram as maiores declividades da bacia, evidenciando a aparente anisotropia da área, onde ocorre o controle geológico por meio dos grandes maciços compostos por granitos intrusivos e migmatitos, escarpamento de falhas e diversos diques de Diabase cortando as rochas migmatíticas, com direção preferencial E-W.

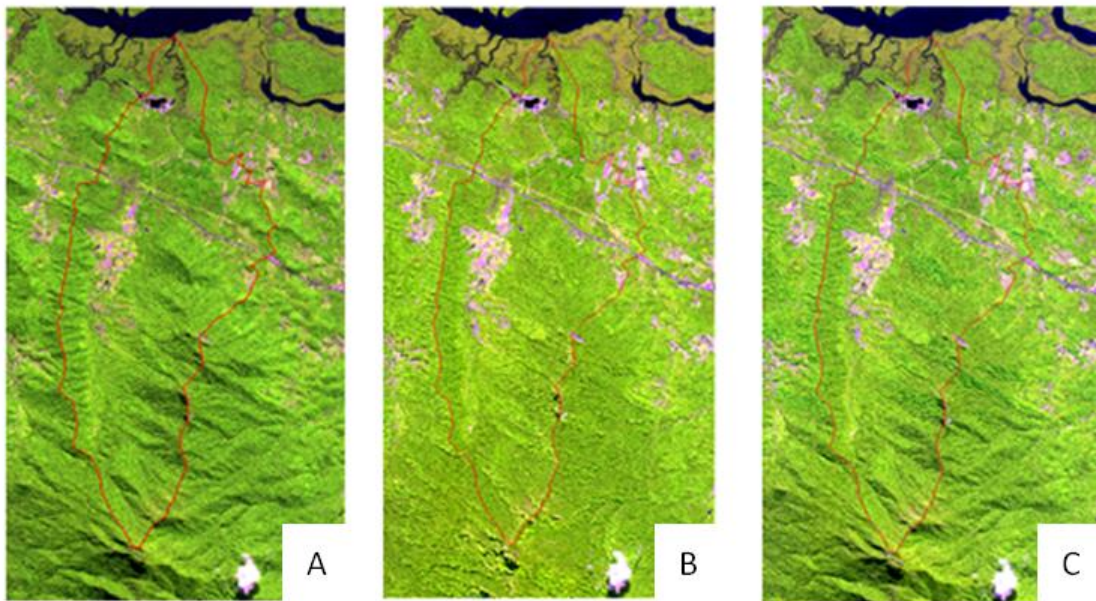


Figura 3 - Avaliação através de composições coloridas falsa cor (R4G5B3) - (3A) imagem sem correção, (3B) correção topográfica de Minnaert, e (3C) Correção-C. Fonte: repositório Planet Explorer – Imagens RapidEye (19/08/2010) . Fonte: Organizado pelos autores, 2021.

Conforme esperado e em consonância com os trabalhos de Ponzoni (2016) Moreira et al. (2016), e Oliveira, Galvão e Ponzoni (2019), após as imagens serem submetidas aos métodos de correção topográfica, tiveram as variações de iluminação local do terreno visivelmente reduzidas. Para avaliar o processo de correção topográfica sobre as imagens foi realizada uma análise estatística, em que foi possível observar e comparar o desvio padrão das bandas corrigidas topograficamente com o das bandas sem correção (Tabela 3).

Tabela 3 – Comparação do desvio padrão das refletâncias das bandas sem correção e das bandas com correção topográfica

Região Espectral	Sem Correção Desvio Padrão	Minnaert Desvio Padrão	Correção-C Desvio Padrão
Azul	0,004	0,004	0,004
Verde	0,007	0,005	0,006
Vermelho	0,004	0,003	0,003
Red-Edge	0,019	0,011	0,016
Infravermelho próximo	0,067	0,035	0,054

Fonte: Organizado pelos autores, 2021.

Observa-se na tabela acima que para todas as bandas houve uma diminuição no valor do desvio padrão, corroborando com os trabalhos de Law e Nichol (2004), Moreira e Valeriano (2014), Moreira et al. (2016) e Oliveira, Galvão e Ponzoni (2019), que atestam que onde o desvio padrão é menor, há redução nos efeitos de iluminação/observação do terreno. Cabe destacar que o efeito da sombra (direção do espalhamento frontal) e o do hot spot (retroespalhamento) introduzem uma grande variabilidade nos dados.

Com as correções combinadas de BRDF (*bidirectional reflectance distribution function*) e topográficas, os efeitos de iluminação, visada e topográfica deveriam ser minimizados.

Ao comparar os dois métodos aplicados, verifica-se que as bandas corrigidas pelo método Minnaert apresentaram os valores de desvio padrão menores, o que indica para este estudo que este método apresentou maior redução do efeito topográfico se comparado à Correção-C. Procedeu-se com a terceira avaliação sobre a eficiência da correção topográfica, que segundo Hantson e Chuvieco (2011) é referente à diminuição do coeficiente de correlação entre o ângulo incidente e a refletância da superfície. Na Tabela 4, observa-se a relação entre o fator cosseno e a refletância das bandas sem correção e corrigidas topograficamente.

Tabela 4 – Comparação do coeficiente de correlação entre fator cosseno e refletância

Região Espectral	Sem Correção R	Minnaert R	Correção-C R
Azul	0,534	-0,050	0,076
Verde	0,777	-0,066	0,535
Vermelho	0,781	-0,113	0,399
Red-Edge	0,866	-0,067	0,771
Infravermelho próximo	0,898	-0,071	0,691

Fonte: Organizado pelos autores, 2021.

Segundo Oliveira, Galvão e Ponzoni (2019); Breunig et al. (2015); e Gaida et al. (2016) para atestar se houve minimização dos efeitos de iluminação local do terreno sobre a resposta espectral das bandas corrigidas, a relação entre a refletância espectral e o fator cosseno deve ser reduzida, isto pôde ser visto na TABELA 4 (acima) tanto para a correção do método Minnaert quanto para a Correção-C, contudo percebe-se que há uma menor relação para o método Minnaert, o que indica que este método trouxe um melhor resultado na redução do efeito topográfico sobre as bandas.

Como o discutido no trabalho de Teillet, Guindon e Goodenouch (1982) a correlação entre o fator cosseno e a refletância das bandas foi maior para as bandas com maior comprimento de onda. Isto pode ser conferido neste trabalho na coluna “Sem Correção” da Tabela 4, apesar de bandas isoladas como o verde e vermelho apresentarem valores próximos. Para Teillet, Guindon e Goodenouch (1982) o menor efeito em comprimentos de ondas menores, provavelmente se deve à maior dispersão atmosférica e à baixa refletância da vegetação.

A quarta análise realizada referiu-se à aplicação de teste estatístico pareado, para analisar se as diferenças dos valores de refletância das áreas amostrais entre as bandas sem correção e com correção pelo

método Minnaert e pela Correção-C se diferiram significativamente. O teste paramétrico t de Student proposto por Student (1908); foi aplicado para os valores de refletância das bandas (extraídas das áreas amostrais) que apresentaram normalidade dos dados a partir da aplicação do teste de Shapiro-Wilk e para aquelas bandas em que os dados (valores de refletância) não apresentaram normalidade e o Teste não paramétrico de Wilcoxon foi adotado, ambos com nível de confiança de 95%.

Para este estudo todas as bandas corrigidas pelo método Minnaert apresentaram diferenças significativas, ou seja, com p-value < 0,05, isso indica que a correção topográfica contribuiu significativamente para reduzir a influência da iluminação/observação, ou o efeito topográfico, na refletância das bandas espectrais (MOREIRA et al., 2016) .

Já para a Correção-C duas bandas (Red-Edge e NIR) apresentaram valor de p > 0,05, ou seja, não apresentando diferenças estatisticamente significativas ao nível de 5% de significância. Cabe destacar que nessas bandas a vegetação apresenta alta transmitância, que pode levar a um espalhamento maior e menor correção por parte do modelo, em que outros fatores podem ser responsáveis, como a resolução espacial.

Após a análise estatística sobre o processo de correção topográfica, este estudo corrobora com os resultados de Ponzoni (2016) apesar de terem empregado o algoritmo de Minnaert modificado, eles concluíram que este forneceu valores de refletância de superfície superiores aos estimados pelo modelo de Correção-C, o que pôde ser comprovado neste estudo ao comparar os diferentes modelos de correção.

Porém, uma questão que deve ser observada aqui quanto à eficiência do método de Correção-C, pode ter relação com a seleção dos pontos amostrais utilizados para estimar o valor “C”, pois segundo Ponzoni (2016) como o processo de amostragem para este método é aleatório, os valores de “C” podem ser fortemente impactados pelo procedimento de amostragem. Para Reese e Olsson (2011), a forma mais adequada de estimar o valor “C” refere-se à seleção de pontos, que representem todas as condições da iluminação local da área de estudo, sendo que se houver uma seleção exclusiva de pontos em áreas sombreadas tende a levar a sobrecorreção topográfica da cena, enquanto a seleção de pontos em áreas muito iluminadas produz uma subcorreção.

Análise do efeito topográfico sobre os índices de vegetação

Ao analisar a estatística descritiva em relação às médias dos valores dos índices de vegetação com correção topográfica e sem correção, obtidas das áreas amostrais, destaca-se o fato do SR ter a maior variação entre as médias tanto pelo método Minnaert quanto para a Correção-C. Para o Minnaert o valor da média do SR foi de 14,620 sem correção para 14,770 com correção e para a Correção-C foi de 14,620 para 14,666. No

NDVI para o Minnaert a média foi de 0,869 para 0,8705, respectivamente sem correção e com correção, e para a Correção-C o valor médio passou de 0,8688 para 0,868. O EVI apresentou os valores médios para o método Minnaert de 0,588 sem correção para 0,622 com correção, e para a Correção-C foi de 0,588 para 0,602. E por fim, o RENDVI que apresentou a menor variação entre os valores médios para o método Minnaert indo de 0,550 para 0,552 e de 0,550 para 0,556 para a Correção-C.

As correções topográficas empregadas possibilitaram uma redução do efeito topográfico nos índices de vegetação, uma vez que a cobertura florestal densa que se concentra em áreas menos iluminadas tiveram aumento nas médias dos seus valores. Em geral, cabe destacar que o SR e o EVI são índices que não promovem uma normalização nos dados ou são correlacionados com uma banda (GALVÃO et al., 2011), o que explica uma diferença maior entre as médias dos valores dos seus valores ante a correção topográfica do que os demais índices (NDVI, EVI e RENDVI), que por promoverem uma normalização, compensam parcialmente os efeitos topográficos. Visualmente percebe-se ao analisar os índices de vegetação na Figura 4, que o SR e o EVI foram os que apresentaram maior variação entre sem correção e com correção do método Minnaert.

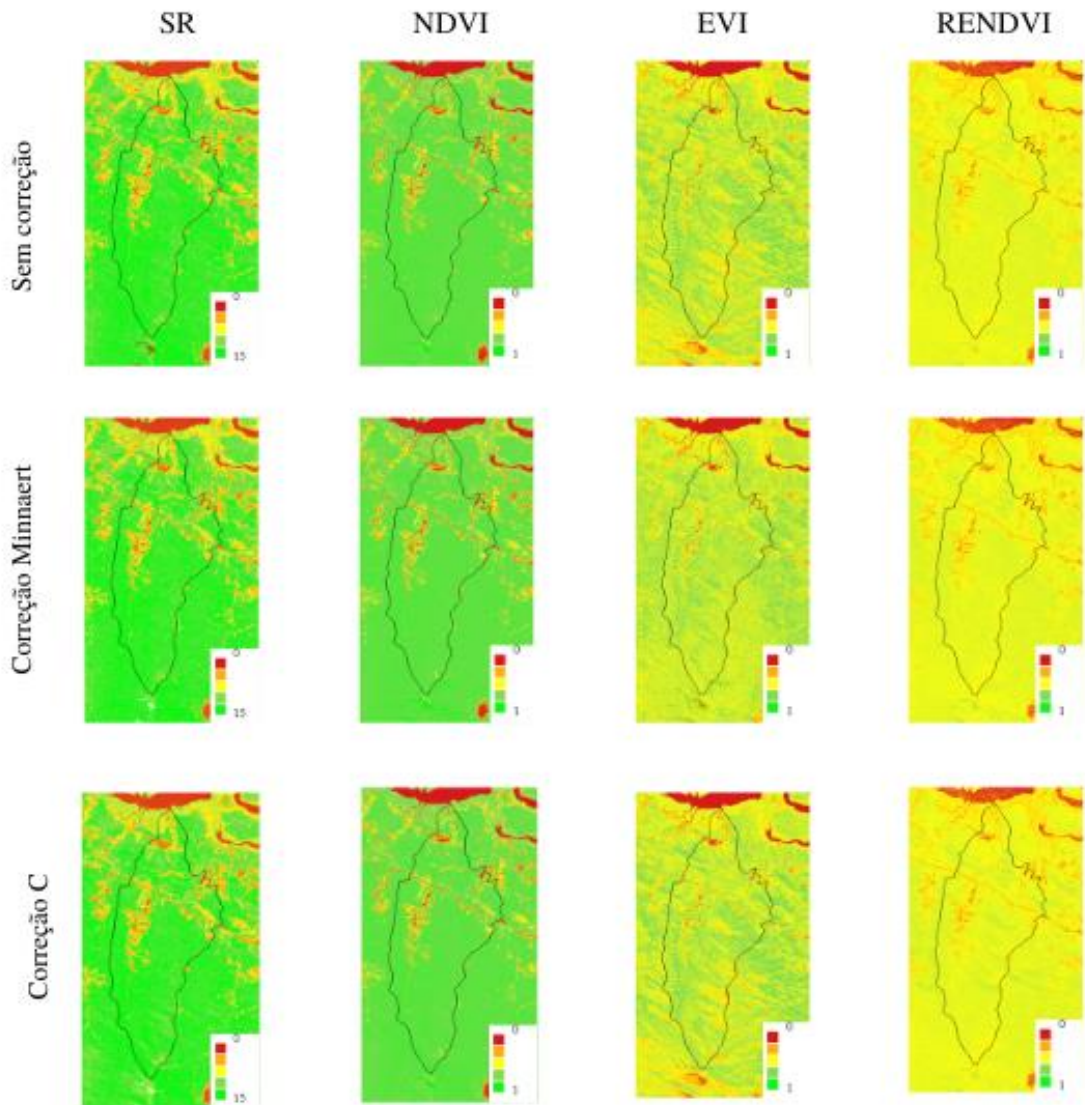


Figura 4 - Índices de vegetação com e sem correção topográfica. Organizado pelos autores, 2021.

Assim, como para as bandas espectrais, foi averiguado se entre os índices de vegetação sem aplicação de correção topográfica e os corrigidos topograficamente apresentaram diferenças significantes ao nível de significância de 5%. Para tanto, o teste de normalidade de Shapiro-Wilk foi aplicado, resultando nos valores contidos na Tabela 5. Para o teste de Shapiro-Wilk, a normalidade dos dados se dá com $p\text{-value} > 0,05$, desta forma, nota-se que nem todos os índices de vegetação apresentaram, devido a isto optou-se por utilizar o Teste não-paramétrico de Wilcoxon ao invés do teste T de Student.

Tabela 5 – Valores do teste de normalidade de Shapiro-Wilk.

Região Espectral	Sem Correção	Minnaert	Correção-C
	R	R	R
Azul	0,534	-0,050	0,076
Verde	0,777	-0,066	0,535
Vermelho	0,781	-0,113	0,399
Red-Edge	0,866	-0,067	0,771
Infravermelho próximo	0,898	-0,071	0,691

Legenda: S/C - sem correção; C – Correção-C. Fonte: Organizado pelos autores, 2021.

O teste de Wilcoxon foi aplicado com nível de significância de 5% para comparar os valores dos índices calculados a partir das imagens corrigidas topograficamente e não corrigidas topograficamente. A análise referiu-se a obter o *p-value*, sendo o que se apresenta inferior a 5% diferiram significativamente, portanto indicando que a correção foi efetiva na redução dos efeitos de iluminação e da topografia.

Para os quatro índices calculados a partir das imagens corrigidas pelo algoritmo de Correção-C, três apresentaram *p-value* > 0,05, sendo 0,118; 0,299; e 0,132 para SR, NDVI e RENDVI respectivamente, refutando a hipótese nula de que as populações se diferiam significativamente. Para o EVI o *p-value* foi 0,019 sendo o único a apresentar uma diferença significativa. O que indica que o método de Correção-C não foi eficiente neste estudo na minimização do efeito topográfico de todos os índices de vegetação. Nesse ponto, cabe destacar que outras formas de amostragem para a seleção dos dados de entrada poderiam ser testadas, já que foi aleatória no momento de rodar o algoritmo de correção.

Já para os índices de vegetação avaliados sobre as bandas corrigidas pelo método Minnaert, obteve-se o *p-value* menor que 0,05, sendo: 0,005; 0,019; 0,009; e 0,035 para SR, NDVI, EVI e RENDVI respectivamente, ou seja, corroborando com a hipótese nula de que as populações sem correção e com correção topográfica Minnaert apresentaram diferenças a nível de significância de 95%.

Apesar de todos os índices de vegetação calculados sobre as bandas corrigidas pelo método Minnaert apresentarem diferenças, nota-se que dos quatro, o menos sensível à correção topográfica foi o RENDVI, o qual teve uma menor variação dos valores médios e teve um *p-value* maior do que os demais, ou seja, isto pode ser justificado pelo fato de ser o único índice em que se utilizou a banda Red-Edge em substituição à banda do Red.

Os índices mais sensíveis aos efeitos topográficos foram os não normalizados, sendo o SR com maior *p-value* seguido do EVI, que extrai o verdor do dossel, minimizando o efeito de fundo e as variações do aerossol

atmosférico (HUETE et al., 2010), sendo a princípio menos sensível a saturação. Ademais, ele apresenta uma forte dependência da banda do NIR (BREUNIG et al., 2015). Corroborando com Oliveira, Galvão e Ponzoni (2019) que ao analisarem 16 índices de vegetação utilizando dados hiperespectrais, concluíram que os índices apresentam sensibilidades distintas aos efeitos topográficos.

Devido às diferenças significativas obtidas de todos os índices pelo método Minnaert a métrica “r” de Cohen que é análoga ao “d” de Cohen por se tratar de dados que não apresentam distribuição normal foi calculada, com intuito de avaliar a magnitude do efeito da correção topográfica, obtendo-se os seguintes valores: 0,203; 0,173; 0,190; e 0,155 para SR, NDVI, EVI e RENDVI, respectivamente. A magnitude do tamanho do efeito segundo a classificação de Cohen (1988) neste caso foi considerada pequena para os quatro índices de vegetação, contudo não foi nula, ou seja, as diferenças significativas foram confirmadas pela métrica de Cohen, confirmando que a aplicação do algoritmo Minnaert de correção topográfica foi eficaz na redução do efeito topográfico, possibilitando a extração de informações de vegetação com maior confiabilidade.

Autores como Lee e Kaufman (1986); Ekstrand (1996); e Huete et al. (1999) consideraram, por exemplo, que o NDVI por ser um índice normalizado, supera os efeitos topográficos. Todavia, segundo Teillet, Staenz e William (1997); e Vanonckelen, Lhermitte e Rompaey (2013) a análise da remoção do efeito topográfico deve levar em conta o índice de vegetação empregado, os dados espectrais e topográficos disponíveis e com qualidade, recorte espacial de estudo e a metodologia de correção adotada, entre outros fatores.

Moreira et al. (2016) avaliaram o NDVI, RVI, EVI e SAVI apontando que NDVI e RVI foram menos sensíveis ao efeito topográfico do que EVI e SAVI, mas que todos os índices mostraram ser totalmente independentes do efeito topográfico somente após a correção. Assim como neste estudo, Moreira et al. (2016) concluíram que a correção topográfica é necessária para uma redução consistente do efeito topográfico nos índices de vegetação de terrenos acidentados.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, assim, como aponta Oliveira, Galvão e Ponzoni (2019) a modelagem topográfica apresentou um bom desempenho, já que possibilitou a geração de imagens corrigidas topograficamente com aspecto aplainado, obtendo-se uma redução do desvio-padrão da refletância em todas as bandas espectrais. Além do fato de ter ocorrido à redução da correlação existente entre os valores de refletância espectral e o fator cosseno. Contudo, ao comparar os dois métodos de correção topográfica empregados, o método de

Minnaert apresentou maior eficiência na redução do efeito topográfico quando comparado à Correção-C para esta área de estudo, data e dados testados, sendo isto constatado em todas as bandas do Rapideye corrigidas neste estudo e consequentemente nos índices de vegetação aplicados.

Os índices de vegetação calculados antes e após a correção Minnaert apresentaram diferença significativa de 95% e mesmo que a magnitude do tamanho do efeito tenha sido considerada baixa, segundo a métrica “r” de Cohen, há de se considerar a aplicação dos algoritmos de correção topográfica. Concluindo que ao trabalhar com informações espectrais de áreas acidentadas como, por exemplo, a área escolhida neste estudo, se faz sempre necessária a aplicação de métodos que possibilitem a redução dos efeitos topográficos sobre índices de vegetação. Percebeu-se ainda que índices normalizados foram menos sensíveis aos efeitos topográficos, e que os índices SR e EVI não normalizados apresentaram maior variação entre as médias e o menor *p-value* obtido.

Como nos estudos de Shepherd e Dymond (2003), Zhang e Gao (2011), Moreira et al. (2016) sugere-se também que sejam abordados diferentes tipos de relevo, latitude, data de aquisição de imagens e sensores, assim como avaliar outros métodos de correção topográfica para análise da remoção do efeito topográfico sobre áreas de relevo acidentado.

V. REFERÊNCIAS

BALTHAZAR, V., VANACKER, V., LAMBIN, E. Evaluation and parameterization of ATCOR3 topographic correction method for forest cover mapping in mountain areas. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.* v.18, p. 436–450, 2012. DOI:10.1016/j.jag.2012.03.010.

BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; DOS SANTOS JR, GITELSON A. A.; DE MOURA, Y. M.; TELES, T. S.; GAIDA, W. Spectral anisotropy of subtropical deciduous forest using MISR and MODIS data acquired under large seasonal variation in solar zenith angle. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.* v. 35, p.294–304, 2015. DOI:10.1016/j.jag.2014.09.017.

COHEN, J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2.^a ed. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.

EKSTRAND, S. Landsat TM-Based Forest Damage Assessment: Correction for Topographic Effects. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 62, n. 2, p. 151–161, 1996.

EXELIS. Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH). 2015. Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/FLAASH.html>>. Acesso em: 7 out. 2020.

FREITAS, S.R.; MELLO, M.C.S.; CRUZ, C.B.M. Relationships between forest structure and vegetation indices in Atlantic Rainforest. *Forest Ecol. Manag.* p. 353-362, 2005. DOI:10.1016/j.foreco.2005.08.036.

GAIDA, W.; BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; TELES, T. S.; BALBINOT, R. 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*, n. 91, p. 105-123, 2016. DOI: 10.14350/rig.52159.

GALVAO, L. S.; SANTOS, J. R.; ROBERTS, D. A.; BREUNIG, F. M.; TOOMEY, M.; MOURA, Y. M. On Intra-annual EVI Variability in the Dry Season of Tropical Forest: a Case Study with MODIS and Hyperspectral Data. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, n. 9, p. 2350-2359, Set. 2011. DOI: 10.1016/j.rse.2011.04.035.

GALVÃO, L. S.; BREUNIG, F. M.; TELES, T. S.; GAIDA, W.; BALBINOT, R. Investigation of terrain illumination effects on vegetation indices and VI-derived phenological metrics in subtropical deciduous forests. *GIScience and Remote Sensing*, v. 53, n. 3, p. 360-381, 2016. DOI:10.1080/15481603.2015.1134140.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N.; LICHTENTHALER, H. K. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. *Journal of Plant Physiology*, v. 148, n. 3/4, p. 501-508, 1996. DOI: 10.1016/S0176-1617(96)80285-9.

HANTSON, S., CHUVIECO, E. Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.* 13, p. 691-700, 2011. DOI:10.1016/j.jag.2011.05.001.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; LEEUWEN, W. VAN. Modis vegetation index. *Vegetation Index and Phenology Lab*, v. 3, n. 1, p. 129, 1999.

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*, vol. 83, p. 195-213, 2002. DOI:10.1016/S0034-4257(02)00096-2.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; LEEUWEN, W. VAN; MIURA, T.; GLENN, E. Modis vegetation index. In: Ramachandran, B., Justice, C., Abrams, M. (eds) *Land Remote Sensing and Global Environmental Change. Remote Sensing and Digital Image Processing*, vol 11. Springer: New York, 2010. DOI:10.1007/978-1-4419-6749-7_26.

JORDAN, C.F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50, p.663-666, 1969.

KRISHNASWAMY, J.; BAWA, K.; GANESHIAH, K. N.; KIRAN, MC. Quantifying and mapping biodiversity and ecosystem services: Utility of a multi-season NDVI based Mahalanobis distance surrogate. *Remote Sensing of Environment*, p.857-867, 2009. DOI:10.1016/j.rse.2008.12.011.

L3Harris Geospatial, 'Image Processing & Analysis Software - Interactive Data Language (ENVI-IDL - v. 5.6)' (Boulder, CO: Exelis, 2021). Disponível em: <https://www.exelisvis.com/envi/>.

LAW, K. H.; NICHOL, J. Topographic correction for differential illumination effects on IKONOS satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 35, p. 641-646, 2004.

LEE, T. Y. L. T. Y.; KAUFMAN, Y. J. Non-Lambertian Effects on Remote Sensing of Surface Reflectance and Vegetation Index. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 24, n. 5, p. 699-708, 1986.

LINDENAU, J. D.; GUIMARÃES, L. S. P. Calculando o tamanho de efeito no SPSS. *Rev HCPA*, v.32 (3), 2012.

MICROLAB Inc, 'OriginPro' (Northampton: OriginLab Corporation, 2016), p. n/a. Disponível em: <https://www.originlab.com/>.

MINNAERT, M. The Reciprocity Principle in Lunar Photometry. *Astrophys Journal*. 1941, 93, 403-410.

- MINEROPAR (MINERAIS DO PARANÁ S/A). Mapeamento Geológico Geotécnico da Porção Leste da Serra do Mar do Estado do Paraná. MINEROPAR (Minérios do Paraná S/A), 2011. 91p.
- MOREIRA, E. P.; VALERIANO, M. D. M.; RENNÓ, C. D.; FRANÇA, H. Efeito da topografia sobre a classificação do uso e baseada em objetos. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 68, p. 505–517, 2016.
- MOREIRA, E. P.; VALERIANO, M. M. Application and evaluation of topographic correction methods to improve land cover mapping using object-based classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 32, n. 1, p. 208–217, 2014. DOI: 10.1016/j.jag.2014.04.006.
- OLIVEIRA, L. M. de; GALVÃO, L. S.; PONZONI, F. J. Topographic effects on the determination of hyperspectral vegetation indices: a case study in southeastern Brazil. *Geocarto International*, p. 1-18, 2019. DOI: 10.1080/10106049.2019.1690055.
- PINTO, R. C. Identificação e mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa através de Avaliação Multicritério em Sistema de Informações Geográficas – Análise Conceitual e uma proposta. 2015. 213p. Tese (Doutorado em Geografia). UFPR: Curitiba, 2015.
- PONZONI, F. J. Impact of topographic correction on soil and vegetation cover spectral characterization by Tm/Landsat 5 imagery. *Cerne*, v. 22, n. 3, p. 289– 298, 2016. DOI:10.1590/01047760201622032121.
- PONZONI, F. J.; SILVA, C. B.; SANTOS, S. B.; MONTANHER, O. C.; SANTOS, T. B. Local illumination influence on vegetation indices and plant área index (PAI) relationships. *Remote Sensing*, v. 6, n. 7, p. 6266–6282, 2014. DOI:10.3390/rs6076266.
- RAPIDEYE AG SATELLITE. Imagery Product Specifications, Version 6.1. Planet: 2016. Disponível em: <https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/160625-RapidEye%20Image-ProductSpecifications.pdf>. Acesso em: 20 set. 2019.
- REESE, H.; OLSSON, H. C-correction of optical satellite data over alpine vegetation areas: a comparison of sampling strategies for determining the empirical c-parameter. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, n. 6, p. 1387–1400, 2011. DOI:10.1016/j.rse.2011.01.019.
- RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; SALAS, J.; AGUADO, I. Assesment of different topographic corrections in Landsat -TM data for mapping vegetation types. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 41, n. 5, p. 1056–1061, 2003.
- RODERJAN, C. V., GALVÃO, F., KUNIYOSHI, Y. S., & HATSCHBACH, G. G. As Unidades Fitogeográficas do Estado do Paraná. *Ciência & Ambiente*, Santa Maria, n. 24, p. 75-92, 2002.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: *EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM*, 3., Washington, D.C., 1973. Anais... Washington, D.C.: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973a. v.1, p. 309-317.
- SHEPHERD, J. D.; DYMOND, J. R. Correcting satellite imagery for the variance of reflectance and illumination with topography. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n. 17, p. 3503-3514, 2003. DOI: 10.1080/01431160210154029.
- SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; FERREIRA, A. M.; GÓIS, J.R.; MIO, G.; SILVEIRA, R. M. P.; MASSULINI, N. E. B.; LEONARDI, T. M. H. Emprego de atributos topográficos no mapeamento da susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacaré/Paraná. *Sociedade e Natureza*, v.24, p. 623-639, 2013. DOI: 10.1590/S1982-45132013000300014.

SMITH, J.A., LIN, T.L., RANSON, K.J. The Lambertian assumption and Landsat data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 46 (9), p. 1183–1189, 1980.

TEILLET, P. M.; GUINDON, B.; GOODENOUGH, D. G. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian. International Journal of Remote Sensing*, v. 8, n. 2, p. 84–106, 1982.

TEILLET, P. M.; STAENZ, K.; WILLIAM, D. J. Effects of spectral, spatial, and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions. *Remote Sensing of Environment*, v. 61, p. 139–149, 1997. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00248-9.

VANONCKELEN, S.; LHERMITTE, S.; ROMPAEY, A. Van. The effect of atmospheric and topographic correction methods on land cover classification accuracy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 24, p. 9–21, 2013. DOI: 10.1016/j.jag.2013.02.003.

WEN, J., LIU, Q., LIU, Q., XIAO, Q., LI, X. Parametrized BRDF for atmospheric and topographic correction and albedo estimation in Jiangxi rugged terrain, China. *International Journal of Remote Sensing*. v.30, n.11, p. 2875–2896, 2009. DOI: 10.1080/01431160802558618.

ZHANG, W.; GAO, Y. Topographic correction algorithm for remotely sensed data accounting for indirect irradiance. *International Journal of Remote Sensing*, v. 32, p. 1807–1824, 2011. DOI:10.1080/01431161003623441.