ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Protocolo metodológico para obtenção dos valores de reflectância e de NDVI de imagens Landsat 8/OLI utilizando LEGAL

João Pedro Ocanha Krizek¹, Luciana Cavalcanti Maia Santos²

¹ Graduando em Ciências Biológicas, pesquisador do Grupo de Pesquisa Interdisciplinar em Meio Ambiente, Ensino, Tecnologia e Cidade (AMBIENTEC), Departamento de Ciências e Matemática, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus São Paulo, R. Pedro Vicente, 625, CEP 01109-010, Canindé, São Paulo, SP. (11) 2763-7520. jpokrizek@gmail.com ² Coordenadora de Pesquisa, Inovação e Pós-Graduação, Profa. Dra. Efetiva, Líder do AMBIENTEC, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus Pirituba, Av. Mutinga, 951, CEP 05110-000, Jardim Santo Elias, São Paulo, SP. (11) 2504-0100. santos.lucianacm@gmail.com

Artigo recebido em 03/04/2020 e aceito em 05/04/2021

RESUMO

A obtenção dos valores de reflectância se mostra imprescindível para se calcular índices de vegetação, como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Este índice é utilizado para classificar a distribuição global da vegetação e para inferir variáveis ecológicas e ambientais, como a produção de fitomassa. Apesar disso, não é incomum encontrar trabalhos que utilizam os números digitais (ND) para a obtenção direta dos índices de vegetação; entretanto, tais números digitais não representam valores físicos reais e, portanto, não podem ser utilizados diretamente para o cálculo do NDVI. Assim, o objetivo deste artigo é demonstrar um protocolo metodológico para a conversão dos ND das imagens Landsat 8/OLI em valores de reflectância e a subsequente obtenção do NDVI, através da LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico), e, dessa forma, possibilitar a replicação e execução de outras pesquisas que visem obter esse índice de vegetação no *software* SPRING. Além disso, objetivou-se também demonstrar a importância da conversão dos ND em reflectância, a partir da comparação de uma imagem NDVI gerada através da reflectância com a mesma imagem NDVI gerada por meio dos dados brutos. Os resultados apontaram que a obtenção do NDVI através dos valores brutos de imagens de sensoriamento remoto, sem a necessária conversão dos números digitais em valores reais de reflectância, leva a resultados incorretos na estimativa de dados ecológicos da vegetação, subestimando a fitomassa. Dessa forma, esse trabalho ressalta a importância de se seguir um protocolo metodológico para a estimativa correta da fitomassa, produtividade e outros parâmetros da vegetação.

Palavras-chave: protocolo, NDVI, reflectância, Landsat 8, SPRING.

Methodological protocol for obtaining reflectance and NDVI values from Landsat 8/OLI images using LEGAL

ABSTRACT

Obtaining reflectance values is essential for calculating vegetation indices, such as the NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). This index is used to classify the global distribution of vegetation and to infer the ecological and environmental parameters such as phytomass production. Nevertheless, it is common to find works that use digital numbers (DN) to directly obtain vegetation indices; however, such digital numbers do not represent actual physical values and therefore cannot be used directly for NDVI calculation. Thus, this paper aims to demonstrate a methodological protocol for DN conversion of Landsat 8/OLI images into reflectance values and then for obtaining NDVI through the LEGAL (Spatial Language for Algebraic Geoprocessing). Therefore, this protocol enables the replication and execution of other studies aimed to obtain this vegetation index using SPRING. In addition, the objective was also to demonstrate the importance of converting DN to reflectance by comparing an NDVI image generated from reflectance with the same NDVI image generated through the raw data. The results showed that obtaining the NDVI through the raw values of remote sensing images, without the conversion of digital numbers to real reflectance values, leads to incorrect results in the estimation of ecological vegetation data, underestimating phytomass, thus emphasizing the importance of following a methodological protocol for the correct estimation of biomass, productivity and other phytological parameters.

Keywords: protocol, NDVI, reflectance, Landsat 8, SPRING.

Introdução

Estudos têm demonstrado que dados de sensoriamento remoto são aplicados nos mais diversos campos do conhecimento. Nas ciências

ambientais, por exemplo, dados de sensoriamento remoto podem ser utilizados em estudos de identificação de culturas (Santos et al., 2020),

conservação do solo (Silva, 2020), condições hídricas (Caturegli et al., 2020), estimativa de produtividade (Rodigheri et al., 2020), caracterização de manguezais (Santos e Bitencourt, 2016), conservação da biodiversidade (Leveau et al., 2020) e desastres ambientais (Sausen e Lacruz, 2015).

A vegetação é um alvo complexo do sensoriamento remoto, por apresentar vários componentes refletoras e múltiplas propriedades de reflexão foliar em uma mesma planta, além de assentar-se sobre um substrato constituído de solo ou restos vegetais que, por sua vez, apresentam propriedades de reflexão própria, interferindo no processo de medição das propriedades de reflexão da vegetação (Epiphany et al., 1996).

Análises da vegetação e detecção de mudanças são realizadas com o intuito de se avaliar os recursos naturais e monitorar a cobertura vegetal. Consequentemente, a detecção quantitativa da vegetação verde é uma das principais aplicações do sensoriamento remoto na tomada de decisões e gerenciamento ambiental da vegetação (Marcussi et al., 2010). Tal detecção pode ser obtida através dos índices de vegetação, os quais ressaltam diferenças existentes entre a vegetação e os demais alvos, além de sintetizar informações de duas bandas espectrais em apenas uma. O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é um dos principais índices de vegetação. Para sua adequada determinação, é necessária a conversão dos valores brutos das imagens de satélites em valores físicos de reflectância (Neto et al., 2008; Shimabukuro e Ponzoni, 2017).

O objetivo deste artigo é demonstrar um protocolo metodológico para a conversão dos números digitais (ND) das imagens Landsat 8/OLI em valores de reflectância e a subsequente obtenção do NDVI, através da LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algebrico), e, dessa forma, possibilitar a replicação e execução de outras pesquisas que visem obter esse índice de vegetação através do SPRING e utilizando as imagens Landsat 8/OLI. Além disso, objetiva-se também demonstrar a importância da conversão dos ND em reflectância, a partir da comparação de uma imagem NDVI gerada a partir da reflectância com a mesma imagem NDVI gerada através dos dados brutos. Nossa hipótese é a de que a imagem NDVI calculada a partir dos dados brutos terá valores diferentes daqueles presentes na imagem NDVI obtida corretamente a partir da reflectância.

A elaboração deste artigo é justificada pela quase completa ausência de trabalhos que descrevam a obtenção de imagens de reflectância através do SPRING. Apesar do manuscrito de

Neto et al. (2008) ser uma exceção, os autores apresentam uma metodologia pautada nas constantes de calibração – as quais não são facilmente obtidas para imagens Landsat 8/OLI. Dessa forma, propõe-se aqui um novo protocolo metodológico, desta vez pautado nos termos aditivos e multiplicativos das imagens Landsat 8/OLI, os quais podem ser obtidos facilmente no arquivo metadados.

Conversão dos números digitais em valores reais de reflectância

Diferentes índices de vegetação podem ser utilizados para o estudo e a avaliação da vegetação. Tais índices são calculados com o objetivo de ressaltar e distinguir o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e os demais alvos da superfície terrestre (Moreira, 2011) e têm sido utilizados em pesquisas que visam caracterizar certos parâmetros biofísicos da vegetação, tais como fitomassa (Filho et al., 2020), produtividade (Rodigheri et al., 2020), radiação fotossinteticamente ativa absorvida (Veloso et al., 2020) e índice de área foliar verde (Tang et al., 2020).

As variáveis espectrais utilizadas no cálculo de índices de vegetação são derivadas, basicamente, da reflectância de imagens de satélite na região do vermelho (0,65 a 0,72 μm) e do infravermelho próximo (0,7 e 1,3 μm), no espectro eletromagnético. Devido às propriedades do mesofilo, a absorção da radiação é mais acentuada nos comprimentos de onda do vermelho; na região do infravermelho próximo, a absorção é extremamente baixa (Taiz et al., 2017). Isso assegura que, tratando-se de vegetação viva, a razão (ρ_{IVP}/ρ_V) será alta. Alvos não vegetados, como corpos hídricos e solo exposto, ou alvos como vegetação morta ou estressada não terão essas respostas espectrais específicas e, portanto, sua razão (ρ_{IVP}/ρ_V) irá apresentar um valor menor. Assim, a razão (ρ_{IVP}/ρ_V), intitulada *Relative Vigor Index* (RVI), por exemplo, pode fornecer uma medida da importância da reflectância vegetativa dentro de um determinado pixel. A razão verde/vermelha (ρ_{VD}/ρ_V), por sua vez, é baseada nos mesmos princípios usados pela razão (ρ_{IVP}/ρ_V), embora seja menos efetiva. A Tabela 1 apresenta os índices de vegetação mais comumente utilizados em estudos ecológicos e agrônomicos. Índices de razão simples (RVI) e índices normalizados (NDVI, TVI, CTVI, TTVI, NRVI) baseiam-se no contraste entre a resposta da vegetação na faixa do vermelho e do infravermelho; índices complexos (PVI, SAVI, WdVI, SAVI, TSAVI, MSAVI, DVI, WdVI),

por sua vez, consideram o contraste espectral existente entre a vegetação e as características do solo (Bolfe et al., 2012).

Entre os índices de vegetação mais utilizados (Tabela 1), há o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), o qual tem relação direta com a fitomassa da vegetação. O NDVI tem sido utilizado regularmente para classificar a distribuição global de vegetação e para inferir variabilidades ecológicas e ambientais, produção de fitomassa, radiação fotossintética ativa e produtividade de culturas (Liu, 2007). Além disso,

tal índice tem sido utilizado largamente na literatura para inferir dados ecológicos (como riqueza, abundância e composição) de espécies de aves (Saveraid et al. 2001), besouros (Lassau e Hochuli, 2008; Côrrea et al., 2011); árvores tropicais (Bawa et al. 2002) e aranhas (De Mas et al. 2009). Isso porque tanto a complexidade do *habitat* quanto a heterogeneidade ambiental podem ser medidas através dos índices de vegetação relacionados às informações das comunidades naturais (Côrrea et al., 2011).

Tabela 1. Índices de vegetação comumente usados em estudos ecológicos e agrônômicos. ρ_{IVP} refere-se à reflectância na faixa do infravermelho próximo; ρ_V refere-se à reflectância na faixa do vermelho; a e b representam parâmetros da linha do solo e L é uma constante de minimização da influência do solo.

Índice	Equação	Referência
<i>RVI</i> <i>Relative Vigor Index</i>	$\frac{\rho_{IVP}}{\rho_V}$	Pearson e Millar (1972)
<i>NDVI</i> <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	$\frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V}$	Rouse et al. (1973)
<i>TVI</i> <i>Transformation Vegetation Index</i>	$\sqrt{NDVI} + 0,5$	Rouse et al. (1974)
<i>CTVI</i> <i>Corrected Transformed Vegetation Index</i>	$\frac{(NDVI + 0,5)}{ (NDVI + 0,5) } \cdot \sqrt{ (NDVI + 0,5) }$	Perry e Lautenschlager (1984)
<i>TTVI</i> <i>Thiam's Transformed Vegetation Index</i>	$\sqrt{ (NDVI + 0,5) }$	Silleos et al. (2006)
<i>NRVI</i> <i>Normalized Ratio Vegetation Index</i>	$\frac{RVI - 1}{RVI + 1}$	Baret e Guyot (1991)
<i>PVI</i> <i>Perpendicular Vegetation Index</i>	$\frac{\rho_{IVP} - a \cdot \rho_V - b}{\sqrt{1 + a^2}}$	Richardson e Wiegand (1977)
<i>SAVI</i> <i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i>	$\frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{(\rho_{IVP} + \rho_V + L) \cdot (1 + L)}$	Huete e Jackson (1988)
<i>TSAVI</i> <i>Transformed Soil Adjusted Vegetation Index</i>	$\frac{a \cdot (\rho_{IVP} - a \cdot \rho_V - b)}{\rho_V + a \cdot \rho_{IVP} - a \cdot b}$	Baret et al. (1989)
<i>TSAVI2</i> <i>Transformed Soil Adjusted Vegetation Index</i>	$\frac{a \cdot (\rho_{IVP} - a \cdot \rho_V - b)}{\rho_V + a \cdot \rho_{IVP} - a \cdot b + 0,08 \cdot (1 + a^2)}$	Baret e Guyot (1991)
<i>MSAVI</i> <i>Modified Soil Adjusted Vegetation Index</i>	$\frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V + L} \cdot (1 + L)$	Clevers (1988)
<i>MSAVI2</i> <i>Modified Soil Adjusted Vegetation Index</i>	$\frac{2 \cdot \rho_{IVP} + 1 - \sqrt{(2 \cdot \rho_{IVP} + 1)^2 - 8 \cdot (\rho_{IVP} - \rho_V)}}{2}$	Qi et al. (1994)
<i>DVI</i> <i>Difference Vegetation Index</i>	$a \cdot (\rho_{IVP} - \rho_V)$	Richardson e Wiegand (1977)
<i>WDVI</i> <i>Weighted Difference Vegetation Index</i>	$\rho_{IVP} - a \cdot \rho_V$	Clevers (1988)

Os valores do NDVI gerado são valores reais contidos entre -1 e 1. Superficialmente, corpos hídricos são representados por valores negativos, enquanto alvos como solo exposto são representados por valores muito próximos de zero. Já para a vegetação, quanto maior o valor do *pixel*, maior será a densidade da vegetação ou sua atividade fotossintética (Verona, 2003; Neto et al., 2008). Apesar da importância do índice ser padronizado (e, assim, permitir comparações de diferentes áreas e diferentes vegetações), o NDVI mostra uma pequena dependência do horário de medição e da intensidade de nebulosidade (Fontana et al., 2019). Entretanto, também é verdadeiro que o NDVI é capaz de minimizar

algumas fontes externas de ruído como, por exemplo, sombras de nuvens, diferenças de iluminação, atenuação atmosférica e certas diferenças topográficas (Justice et al., 1998; Silva, 2004), permitindo estudos comparativos entre diferentes locais ou épocas. Essas propriedades tornaram o NDVI um dos índices espectrais mais utilizados em estudos locais, regionais e globais (Zhang et al., 2003).

Correção atmosférica para obtenção do NDVI

Com o objetivo de se obter índices de vegetação via processamento digital de imagens de sensoriamento remoto orbital, faz-se necessário investigar a influência da atmosfera na atenuação

do sinal da radiação solar refletida pela superfície que é detectada pelo sensor do satélite (Bezerra et al., 2011). Tal atenuação incorpora erros na estimativa da reflectância superficial que, por sua vez, influenciam as estimativas do NDVI. Entre os diversos efeitos que a atmosfera pode causar estão a diminuição da faixa de valores digitais possíveis registrados pelo sensor, a diminuição do contraste entre superfícies adjacentes e a alteração do brilho de cada ponto na imagem (Eduardo e Silva, 2013). Isso acontece porque, segundo Zullo Jr. (1994), a presença de gases (como vapor d'água, ozônio, oxigênio e dióxido de carbono) e de aerossóis – isto é, pequenas partículas materiais, diferentes do gelo e da água, em suspensão, com raio variando de 0,10 µm a 10 µm – ocasiona uma maior absorção e difusão da luz solar pela atmosfera.

Dessa forma, para uma estimativa adequada do NDVI a partir de imagens Landsat 8/OLI, faz-se necessário a obtenção da reflectância com a devida correção atmosférica das bandas utilizadas, levando-se em consideração os seguintes parâmetros (Ariza, 2013): coeficiente multiplicativo de reflectância específico por banda; coeficiente aditivo de reflectância específico por banda; ângulo de elevação solar. Nesse sentido, o protocolo aqui proposto permite a realização da correção atmosférica, a partir dos parâmetros mencionados, os quais podem ser obtidos facilmente no arquivo metadados da imagem processada.

Material e métodos

Obtenção das Imagens Landsat 8/OLI

As imagens Landsat 8/OLI podem ser obtidas gratuitamente no site do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), através do endereço eletrônico:

<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>. Nele, imagens de satélites podem ser pesquisadas com base na cobertura máxima de nuvens, órbita e ponto, municípios e coordenadas geográficas, por exemplo.

No presente estudo foi utilizada uma imagem Landsat 8/OLI do litoral Sul do estado de São Paulo, mais especificamente do sistema estuarino-lagunar do município de Cananéia, para a realização da análise comparativa do NDVI. A imagem foi obtida em 28 de janeiro de 2019, às 16h05min (UTC-3), órbita 220 e ponto 77, com resolução espacial de 30 m e resolução radiométrica de 12 bits. A área imageada tem como par de coordenadas geográficas: 48°07' W – 25°07' S e 47°46' W – 24°54' S.

A paisagem analisada (Figura 1) compreende cinco classes de objetos: áreas de

manguezais, áreas de mata, áreas urbanas e de solo exposto, corpos hídricos e praia arenosa.

Equações necessárias para a conversão

A Equação 1 é uma fórmula matemática para a conversão do número digital (ND) em reflectância, a partir de Markham e Barker (1987):

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \left[\left(\frac{L_{máx} - L_{mín}}{ND_{máx}} \right) \cdot (ND) + L_{mín} \right]}{E_{\lambda} \cdot \cos(z) \cdot d_r} \quad (1)$$

onde ρ_{λ} é o valor da reflectância, com correção por ângulo solar; $L_{máx}$ e $L_{mín}$ são constantes de calibração de um determinado sensor; ND é o número digital de cada pixel; E_{λ} é a irradiância solar média no topo da atmosfera; z é o ângulo solar zenital no momento da aquisição e d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol.

Muitos trabalhos com imagens Landsat 5 e 7 usam as constantes de calibração máximas ($L_{máx}$) e mínimas ($L_{mín}$) no processo de conversão dos níveis de cinza em radiância ou reflectância espectral, com base na equação de Markham e Barker (1987). Entretanto, para cada imagem Landsat 8/OLI obtida, os valores de $L_{máx}$ e $L_{mín}$ sofrem alterações (SILVA et al., 2016), dessa forma, não há um valor padronizado na literatura para essas constantes. Portanto, recomenda-se determinar a reflectância com base nos termos aditivos e multiplicativos obtidos do arquivo metadados, de acordo com a Equação 2 (Ariza, 2013):

$$\rho_{\lambda} = \frac{M_{\rho} \cdot Q_{cat} + A_{\rho}}{\sin(\theta_{se})} \quad (2)$$

onde ρ_{λ} é o valor da reflectância, com correção por ângulo solar; M_{ρ} é o coeficiente multiplicativo de reflectância específico por banda e obtido a partir do arquivo metadados (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, onde x é o número da banda); Q_{cat} é o produto quantificado e calibrado para números digitais (ND) – i.e., este valor se refere a cada uma das bandas da imagem; A_{ρ} é o coeficiente aditivo de reflectância específico por banda e obtido a partir do arquivo metadados (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, onde x é o número da banda) e θ_{se} é o ângulo de elevação solar, obtido a partir do arquivo metadados da imagem (SUN_ELEVATION).

Após a determinação dos valores de reflectância das imagens Landsat 8/OLI, pode-se então calcular o NDVI (Equação 3), tal como proposto por Rouse et al. (1973):

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V} \quad (3)$$

reflectância na banda do infravermelho próximo e ρ_V é o valor da reflectância na banda do vermelho.

onde $NDVI$ é o índice de vegetação por diferença normalizada; ρ_{IVP} é o valor da

Figura 1. Mapa de uso e cobertura do solo, obtido a partir de uma classificação supervisionada por máxima verossimilhança (índice $Kappa$ de 95,10%,) da área de estudo utilizada na análise comparativa do NDVI.

Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico

A álgebra de mapas é implementada, no SPRING, através da LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico), uma linguagem de consulta e manipulação espacial que realiza operações sobre dados dos tipos MAPA TEMÁTICO, MODELO NUMÉRICO DE TERRENO e IMAGEM (INPE, 2019). LEGAL teve sua implementação a partir do trabalho de Câmara (1995) e é estruturada por uma lista de sentenças que descreve um procedimento. Um programa em LEGAL é estruturado em três partes: declarações, instanciações e operações (INPE, 2019).

Nas sentenças de declaração, definem-se os dados. Cada plano de informação (PI) a ser manipulado é declarado explicitamente, dando-lhe um nome e associando-o à sua categoria no esquema conceitual, obedecendo a seguinte sintaxe:

`<Modelo><var> (<categoria>);1`

O campo `<Modelo>` deve ser substituído pelo modelo de dados correspondente, tal como Temático, Numérico ou Imagem. O campo `<var>` deve ser substituído pelo nome da variável associada ao PI e o campo `<categoria>` identifica a categoria a qual o dado pertence.

Nas sentenças de instanciação, recuperam-se os dados existentes do banco de dados ou criam-se os novos PI. Um novo PI pode então ser associado ao resultado de operações em LEGAL. Tais operações são realizadas através dos operadores `Recupere` e `Novo`. `Recupere` associa uma variável a um PI existente no banco de dados geográfico. `Novo` cria um novo PI no banco de dados e requer parâmetros que dependem da representação geométrica associada.

¹As sentenças em LEGAL são escritas neste artigo em Courier New, 10.

Abaixo segue a estrutura de uma sentença que recupera dados:

```
<var> = Recupere (Nome = "<PI>");
```

O campo <var> deve ser substituído pelo nome da variável e o campo <PI> deve ser substituído pelo nome do plano de informação que será associado a essa variável.

Por fim, nas sentenças de operação, realizam-se as operações da álgebra de mapas. Abaixo segue um exemplo de operação para obtenção do NDVI:

```
NDVI = Numerico ((B5-B4) / (B5+B4));
```

No presente trabalho, a LEGAL foi utilizada para a criação de dois algoritmos: um para a obtenção dos valores reais de reflectância das bandas do vermelho e do infravermelho próximo da imagem Landsat 8/OLI, a partir da equação de Ariza (2013), e outro para a obtenção da imagem NDVI, tal como na equação de Rouse et al. (1973).

Resultados e discussão

Algoritmo para Obtenção da Reflectância

A Figura 2 descreve um algoritmo em LEGAL gerado no Sistema de Informação Geográfica (SIG) SPRING. A partir dele é

possível converter os ND de qualquer imagem Landsat 8/OLI em valores reais de reflectância, com a devida correção atmosférica. Na linha 3, é importante que o usuário troque "Landsat8_2019" pelo nome atribuído à categoria em seu banco de dados nas quais se encontram os planos de informação referentes às bandas do vermelho (banda 4) e do infravermelho próximo (banda 5). Da mesma forma, o usuário deve alterar as linhas 18 e 19, de modo a recuperar os planos de informação com base no nome em que eles estão registrados no seu banco de dados. Os valores atribuídos às variáveis reais (linhas 9-13) devem ser obtidos no arquivo metadados da imagem utilizada. Os valores de ResX, ResY, Escala, Min e Max podem ser obtidos no próprio SPRING: com o projeto ativo e a respectiva banda selecionada, clica-se em "Editar" e, em seguida, "Plano de Informação...".

Antes da execução do algoritmo (Figura 2), é necessário também que o usuário crie manualmente uma nova categoria, intitulada "Reflectancia", pertencente a um modelo numérico de terreno (MNT). Também destaca-se que as linhas 2, 6, 8, 15, 17, 21 e 25, com fonte colorida em verde, representam comentários que foram inseridos por uma questão explicativa – e, desta forma, podem ser omitidos do algoritmo sem perda funcional.

```

1  {
2  //Declaração das variáveis
3  Imagem banda4, banda5 ("Landsat8_2019");
4  Numerico reflectancia4, reflectancia5 ("Reflectancia");
5
6  //Instanciação de variáveis reais
7
8      //Valores obtidos no arquivo metadados
9      reflectanceMultBanda4 = 0.00002;
10     reflectanceMultBanda5 = 0.00002;
11     reflectanceAddBanda4 = -0.100000;
12     reflectanceAddBanda5 = -0.100000;
13     sunElevation = 57.88578682;
14
15 //Instanciação de variáveis
16
17     //O operador Recupere é usado para associar um plano de informação existente a uma variável
18     banda4 = Recupere (Nome = "b4_Recorte");
19     banda5 = Recupere (Nome = "b5_Recorte");
20
21     // O operador Novo implica na criação de um novo plano de informação, a ser associado à variável
22     reflectancia4 = Novo (Nome = "reflectancia_b4", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 60000, Min = 0, Max = 64314);
23     reflectancia5 = Novo (Nome = "reflectancia_b5", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 60000, Min = 0, Max = 65534);
24
25 //Operação de conversão dos números digitais para reflectância
26 reflectancia4 = Numerico ((reflectanceMultBanda4 * banda4 + reflectanceAddBanda4) / sin(sunElevation));
27 reflectancia5 = Numerico ((reflectanceMultBanda5 * banda5 + reflectanceAddBanda5) / sin(sunElevation));
28 }

```

Figura 2. Algoritmo em LEGAL, gerado no SIG SPRING, para a conversão dos ND da banda 4 (vermelho) e da banda 5 (infravermelho próximo) do LANDSAT 8/OLI em valores reais de reflectância.

Algoritmo para obtenção do NDVI

A figura 3 descreve um algoritmo em LEGAL para obtenção da imagem NDVI a partir dos valores de reflectância obtidos anteriormente.

Antes da execução do algoritmo (Figura 3), é necessário que o usuário crie manualmente uma nova categoria, intitulada "Vegetacao", pertencente a um modelo numérico de terreno

(MNT), a qual será associada o plano de informação referente à imagem NDVI. Também é importante ressaltar que os valores do NDVI gerados são valores reais entre -1 e +1; por isso

os campos Min e Max (linha 13) assumem esses respectivos valores.

```

1 {
2 //Declaração das variáveis
3 Numerico reflectancia4, reflectancia5 ("Reflectancia");
4 Numerico ndvi ("Vegetacao");
5
6 //Instanciação de variáveis
7
8 //O operador Recupere é usado para associar um plano de informação existente a uma variável
9 reflectancia4 = Recupere (Nome = "reflectancia_b4");
10 reflectancia5 = Recupere (Nome = "reflectancia_b5");
11
12 // O operador Novo implica na criação de um novo plano de informação, a ser associado à variável
13 ndvi = Novo (Nome = "ndvi", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 60000, Min = -1, Max = 1);
14
15 //Operação da obtenção do NDVI a partir da reflectancia
16 ndvi = ((reflectancia5 - reflectancia4) / (reflectancia5 + reflectancia4));
17 }

```

Figura 3. Algoritmo em LEGAL, gerado no SIG SPRING, para a obtenção da imagem NDVI a partir dos valores de reflectância da banda 4 (vermelho) e da banda 5 (infravermelho próximo) do LANDSAT 8/OLI.

Comparação entre as imagens NDVI

Posteriormente à programação e execução dos algoritmos apresentados, foi realizada uma análise comparativa entre a imagem NDVI gerada através dos números digitais (dados brutos), sem correção atmosférica, e a imagem NDVI obtida a partir dos valores de reflectância, com a correção atmosférica inclusa. As figuras 4 e 5 ilustram a cena em estudo através dos fatiamentos das grades dos NDVI gerados a partir dos ND e da reflectância, respectivamente.

O intervalo do NDVI calculado a partir dos ND variou entre -0,21 e 0,63 (Tabela 2), com média de 0,28 e desvio padrão de 0,10, ao passo que os valores de NDVI por reflectância variaram entre -0,74 e 0,87, com média de 0,41 e desvio padrão de 0,49. A análise das imagens de NDVI evidencia que há diferença significativa nos resultados dos índices quando calculados pelos números digitais e pelos valores reais de reflectância, como apontado por outros autores (e.g. Francisco et al., 2020).

O NDVI calculado a partir dos valores reais de reflectância (Figura 5) manifestou os melhores resultados, dado que possibilitou uma maior discriminação entre os diferentes alvos da paisagem, sobretudo entre diferentes fitofisionomias, além de minimizar o efeito

topográfico no índice da vegetação situada nas encostas. Esses resultados corroboram aqueles encontrados por Neto et al. (2008), Weiss et al. (2015) e Francisco et al. (2020).

A paisagem analisada neste trabalho corresponde a uma área estuarino-costeira, com diferentes alvos tais como corpos hídricos, área urbana ou de solo exposto, mata atlântica e manguezal (Tabela 3). Como se pode observar na imagem NDVI obtida a partir dos valores reais de reflectância (Figura 5), áreas de manguezais apresentaram valores entre 0,50 e 0,75, enquanto áreas vegetadas de mata atlântica, por sua vez, no geral, apresentaram valores superiores a 0,75 e inferiores a 0,90 (Tabela 3). Esse valor menor de NDVI para os manguezais pode ser explicado pelo caráter semi-denso da vegetação e pela grande ocorrência de solo lamoso nessas regiões, o que contribuem para um valor inferior de NDVI, se comparado às regiões de mata fechada, as quais apresentam vegetação de maior adensamento. Áreas urbanas e impactadas apresentaram valores de NDVI entre 0 e 0,50, indicando uma pequena ocorrência de fitomassa nesses locais, em comparação aos manguezais e às áreas não impactadas de mata atlântica.

Figura 4. Fatiamento da grade do NDVI gerado a partir dos números digitais.

Figura 5. Fatiamento da grade do NDVI gerado a partir dos valores reais de reflectância.

Tabela 2. Estatísticas das imagens NDVI calculadas com base nos ND e na reflectância.

Imagem NDVI	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-padrão
Números digitais	-0,21	0,63	0,28	0,10
Reflectância	-0,74	0,87	0,41	0,49

Tabela 3. Comparação dos valores mínimos e máximos de fatiamento do NDVI para a imagem obtida a partir dos ND (sem correção atmosférica) e para a imagem obtida de acordo com os valores de reflectância (com correção atmosférica), por classe analisada.

Classe	NDVI a partir dos ND sem correção atmosférica		NDVI a partir da reflectância com correção atmosférica	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Corpo hídrico	-0,21	0,00	-0,74	0,00
Área urbana ou de solo exposto	0,00	0,30	0,00	0,50
Vegetação de manguezal	0,00	0,50	0,50	0,75
Vegetação de mata atlântica	0,30	0,63	0,75	0,87

A imagem NDVI obtida a partir dos ND, sem a devida correção atmosférica (Tabela 3), entretanto, acabou apresentando resultados incorretos, confundindo, diversas vezes, áreas vegetadas com áreas urbanas ou de solo exposto. Além disso, os manguezais não puderam ser distinguidos da vegetação de mata atlântica (Figura 4) e considera que ambas as fitofisionomias apresentam valores de fitomassa muito menor do que, de fato, apresentam. Enquanto que na imagem NDVI obtida a partir dos valores reais de reflectância, as áreas de manguezais apresentam valores entre 0,50 e 0,75, na imagem NDVI obtida a partir dos ND, essas áreas apresentam valores subestimados entre 0 e 0,50 (Tabela 3). O mesmo tipo de subestimação da vegetação ocorre com a vegetação de mata atlântica. A imagem NDVI obtida a partir dos ND subestima áreas de vegetação de maior porte para áreas de vegetação de menor porte, bem como confunde áreas de vegetação rasteira com áreas sem vegetação.

Os resultados aqui obtidos evidenciam que áreas vegetadas apresentam valores de NDVI menores quando não aplicada a correção

atmosférica. Isso é explicado porque a presença dos efeitos atmosféricos de difusão e absorção provocados pelos gases atmosféricos e aerossóis alteram os valores reais que deveriam ser registrados pelo sensor (Bezerra et al., 2011; Sanches et al., 2011; Eduardo e Silva, 2013). Dessa forma, observa-se que a influência atmosférica faz com que o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada seja, na maioria das classes, subestimado.

Ressalta-se aqui, ademais, que tais dados subestimados podem, ocasionalmente, levar a gestores e tomadores de decisão a seguirem planos inadequados do ponto de vista ecológico e ambiental, a partir da consequente subestimação da importância da vegetação local da área estudada.

A tabela 4 apresenta uma amostragem de alguns *pixels* contidos nas figuras 4 e 5, onde pode-se constatar a diferença existente entre *pixels* do NDVI gerados a partir dos ND e *pixels* do NDVI gerados a partir dos valores reais de reflectância.

Tabela 4. Valores de alguns pixels amostrados da imagem NDVI obtida a partir dos ND e da imagem NDVI obtida a partir dos valores reais de reflectância.

Classe	Linha	Coluna	NDVI	
			ND	Reflectância
Corpo hídrico	400	397	-0,0607287	-0,349501
	693	1126	-0,0512424	-0,276484
	8	987	-0,0875815	-0,408275
Área urbana ou de solo exposto	214	619	0,153964	0,257462
	354	683	0,110055	0,180253
	331	648	0,276078	0,455408
Vegetação de manguezal	457	648	0,335628	0,651544
	484	603	0,402263	0,729998
	367	369	0,318595	0,602675
Vegetação de mata atlântica	198	184	0,539908	0,831703
	721	653	0,547328	0,832855
	16	639	0,490102	0,793878

Ao comparar as figuras 4 e 5, bem como ao analisar os dados das tabelas 2, 3 e 4, torna-se evidente que os valores de NDVI gerados a partir dos ND são menores do que os determinados pelos valores reais de reflectância. Isso mais uma vez sustenta a argumentação de que análises pautadas em índices de vegetação obtidos a partir dos números digitais brutos sem a devida correção atmosférica podem dar origem a conclusões equivocadas. Isso, por si só, justifica a importância de converter esses números em valores reais de reflectância, tal como foi proposto anteriormente, com os devidos parâmetros de correção. Além disso, a realização desse procedimento no SPRING, através da LEGAL, é extremamente recomendável, dado que o SIG utilizado é gratuito e de fácil acessibilidade aos usuários, podendo ser baixado no site do INPE.

Além do que já foi exposto, o trabalho de Ke et al. (2015) demonstrou que o NDVI calculado a partir de imagens Landsat 8/OLI apresenta maior variabilidade intraclasse em coberturas como uso agrícola e áreas urbanas, permitindo uma maior distinção dos alvos da paisagem. Francisco et al. (2020), respaldados pelo trabalho de Vermote et al. (2016), apontaram que tais características, vinculadas “à maior sensibilidade radiométrica do sensor OLI, evidenciam a melhor capacidade deste sensor para o monitoramento de fenômenos da superfície terrestre em comparação com o seu antecessor, o Landsat 7/ETM” (Francisco et al., 2020).

Conclusões

O NDVI tem sido utilizado constantemente para inferir parâmetros ecológicos da vegetação e, devido a isso, tem sido utilizado largamente na literatura, apresentando grande importância em estudos ambientais.

A obtenção do NDVI através dos valores brutos de imagens de sensoriamento remoto, sem a necessária conversão dos números digitais em valores reais de reflectância, leva a resultados incorretos na estimativa de parâmetros ecológicos da vegetação, como evidenciado no presente estudo. O NDVI é sensível à influência da atmosfera, e sem a devida correção atmosférica, o NDVI dos alvos de vegetação tende a ser subestimado.

A elaboração de um protocolo metodológico para a obtenção de reflectância com a correção atmosférica inclusa foi feita com a intenção de minimizar os efeitos atmosféricos na posterior obtenção do NDVI de imagens Landsat 8/OLI, visto que a atmosfera, por causa dos fenômenos de espalhamento, absorção e refração da energia eletromagnética, afeta a radiação refletida pela superfície que é captada pelo sensor. Tal

protocolo foi planejado, dessa maneira, a possibilitar a replicação e execução de outras pesquisas que visem obter esse índice de vegetação através do SPRING, um SIG gratuito e brasileiro, muito utilizado em estudos de sensoriamento remoto e geoprocessamento. Trata-se de um protocolo inédito, que poderá constituir base de referência para pesquisadores, estudantes e gestores não familiarizados com o desenvolvimento de algoritmos, mas que visem à obtenção correta e adequada de imagens NDVI através do SPRING.

Ficou evidente, também, que a existência de tais protocolos metodológicos que permitem a obtenção de valores reais de reflectância é de elevada importância para que as estimativas de NDVI resultem em dados precisos, já que a atmosfera tende a atenuar a radiação refletida pela superfície. Com modelos matemáticos aplicados em algoritmos construídos em LEGAL, é possível recuperar os reais valores de reflectância e reconstruir as características espectrais da superfície terrestre, a partir da obtenção de valores corretos de NDVI.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Pró-reitoria de Pesquisa, Inovação e Pós-Graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (PRP-IFSP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de Bolsa de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI) ao primeiro autor.

Referências

- Ariza, A. 2013. Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission) Versión 1.0. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Baret, F.; Guyot, G.; Major, D. J. 1989. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. *Photogrametria*, 43, 241-256.
- Baret, F.; Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 3, 161-73.
- Bawa, K. et al. 2002. Assessing biodiversity from space: an example from the Western Ghats, India. *Conservation Ecology*, 6, 7.
- Bezerra, M. V. C.; Silva, B. B.; Bezerra, B. G. 2011. Avaliação dos efeitos atmosféricos no albedo e NDVI obtidos com imagens de satélite. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 7, pp. 709-717.
- Bolfe, E. L.; Batistella, M.; Ferreira, M. C. 2012. Correlação de variáveis espectrais e estoque de carbono da biomassa aérea de sistemas

- agroflorestais. *Pesq. agropec. bras.*, 47, 1261-1269.
- Câmara, G. 1995. Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos. São José dos Campos: INPE. 264 p. Tese de Doutorado.
- Caturegli, L. et al. 2020. Effects of water stress on spectral reflectance of bermudagrass. *Scientific Reports*, 10, 1-12.
- Clevers, J. G. P. W. 1988. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 25, 53-69.
- Corrêa, C. C. et al. 2011. Utilização do NDVI na avaliação da resposta de besouros herbívoros à complexidade e heterogeneidade ambiental em diferentes escalas no Bioma cerrado. *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Curitiba, 2011, pp. 3103-3110.
- De Mas, E. et al. 2019. Spatial modeling of spider biodiversity: matters of scale. *Biodiversity and Conservation*, 18, 1945-1962.
- Eduardo, B. F. S.; Silva, A. J. F. M. 2013. Avaliação da influência da correção atmosférica no cálculo do índice de vegetação NDVI em imagens Landsat 5 e RapidEye. *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Foz do Iguaçu, 2013, 1442-1449.
- Epiphany, J. C. N, et al. 1996. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 31, n. 6, pp. 445-454.
- Filho, M. G.; Kuplich, T. M.; De Quadros L. F. L. 2020. Estimating natural grassland biomass by vegetation indices using Sentinel 2 remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 41, pp. 2861-2876.
- Florenzano, T. G. 2011. Iniciação em sensoriamento remoto. 3. ed. ampl. e atual. São Paulo: Oficina de Textos.
- Fontana, D. C. et al. 2019. NDVI e alguns fatores de variabilidade. *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos, 2019.
- Francisco, C. N. et al. 2020. Análise do impacto da correção atmosférica no cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada a partir de Imagem Landsat 8/OLI. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13, 76-86.
- Huete, A. R.; Jackson, R. D. 1988. Soil and atmosphere influences on the spectra of partial canopies. *Remote Sensing of Environment*, 25, 89-105.
- Huete, A. R. et al. 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59, 440-451.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2019. Site <<http://www.dpi.inpe.br/spring/english/tutorial/legal.html>>, acessado em 01 de junho de 2019.
- Justice, C. O. et al. 1998. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1228-1249.
- Ke, Y. et al. 2015. Characteristics of Landsat 8 OLI-derived NDVI by comparison with multiple satellite sensors and in-situ observations. *Remote Sensing of Environment*, 164, 298-313.
- Lassau, S. A.; Hochuli, D. F. 2008. Testing predictions of beetle community patterns derived empirically using remote sensing. *Diversity and Distributions*, 14, 138-147.
- Leveau, L. M.; Federico, I. I.; Isabel-Bellocq, M. 2020. From town to town: Predicting the taxonomic, functional and phylogenetic diversity of birds using NDVI. *Ecological Indicators*, 19, 1-11.
- Liu, W. T. H. 2007. Aplicações de Sensoriamento Remoto. Campo Grande: Editora UNIDERP.
- Marcussi, A. B. et al. 2010. Utilização de índices de vegetação para os sistemas de informação geográfica. *Caminhos de Geografia*, 11, 41-53.
- Markham, B. L.; Barker, J. L. 1987. Radiometric Properties of U.S. processes Landsat MSS data. *Remote Sensing of Environment*, 17, 39-71.
- Moreira, M. A. 2011. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 4. ed. atual. e ampl. Viçosa: Ed. UFV.
- Neto, R. T. B. et al. 2008. Determinação de valores físicos de imagens TM/Landsat-5 utilizando a linguagem LEGAL para obter índices de vegetação. *Anais do II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, Recife, 2008.
- Pearson, R. L.; Miller, R. D. 1972. Remote mapping of starting crop biomass for estimation of the productivity of the short grass prairie. *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment* 8, Ann Arbor, 1972, v. 2, pp. 1355-1373.
- Perry, C. R.; Lautenschlager, L. F. 1984. Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 14, 169-182.

- Qi, J. et al. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, v. 48, 119-126.
- Richardson, A. J.; Wiegand, C. L. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1,1541-1552.
- Rodigheri, G. et al. 2020. Net Primary Productivity and Dry Matter in Soybean Cultivation Utilizing Datas of NDVI Multi-Sensors. 2020 IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS), Santiago, Chile, pp. 115-120.
- Rouse, J. W. et al. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Proceedings of the Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium 3*, Washington, 1973. v. 1, pp. 309-317.
- Rouse, J. W. et al. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. *Greenbelt: NASA*.
- Sanches, I. D. A. et al. 2011. Análise comparativa de três métodos de correção atmosférica de imagens Landsat 5 – TM para obtenção de refletância de superfície e NDVI. *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Curitiba, 2011, pp. 7564-7571.
- Santos, L. C. M.; Bitencourt, M. D. 2016. Remote sensing in the study of Brazilian mangroves: review, gaps in the knowledge, new perspectives and contributions for management. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, v. 16, pp. 1-17.
- Santos, R. A. et al. 2020. Remote sensing as a tool to determine biophysical parameters of irrigated seed corn crop. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 41, n. 2, pp. 435-446.
- Sausen, T. M.; Lacruz, M. S. P. 2015. *Sensoriamento remoto para desastres*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Saveraid, E. H. Et al. 2001. A comparison of satellite data and landscape variables in predicting bird species occurrences in the Greater Yellowstone Ecosystem, USA. *Landscape Ecology*, v. 16, pp. 71-83.
- Shimabukuro, Y. E.; Ponzoni, F. J. 2017. *Mistura espectral: modelo linear e aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Silleos, N. G. et al. 2006. Vegetation indices: advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. *Geocarto International*, v. 21, pp. 21-28.
- Silva, B. B. et al. 2016. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 20, n. 1, 2016, pp. 3-8.
- Silva, E. T. J. B. 2004. *Utilização dos índices de Vegetação do Sensor MODIS para Detecção de Desmatamentos no Cerrado: Investigação de Parâmetros e Estratégias*. Brasília: Universidade de Brasília. 146 p. Dissertação de Mestrado.
- Silva, L. A. 2020. Uma revisão de literatura sobre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no monitoramento de áreas degradadas por empreendimentos minerários. *Holos Environment*, 20, 198-213.
- Tang, C. W. et al. 2020. Quantitative monitoring of leaf area index in wheat of different plant types by integrating NDVI and Beer-Lambert law. *Scientific Reports*, 10, 1-10.
- Taiz, L. et al. 2017. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed.
- Veloso, G. A. et al. 2020. Modelling gross primary productivity in tropical savanna pasturelands for livestock intensification in Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17, 1-8.
- Vermote, E. et al. 2016. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, v. 185, pp. 46-56.
- Verona, J. D. 2003. *Classificação e Monitoramento Fenológico Foliar da Cobertura Vegetal na Região da Floresta Nacional do Tapajós – Pará, Utilizando Dados Multitemporais do Sensor Thematic Mapper (TM) do Landsat*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003. 161 p. Dissertação de Mestrado.
- Weiss, C.V. da C. et al. 2015. Análise comparativa entre métodos de correção atmosférica em imagens do sensor Operational Land Imager (OLI), plataforma Landsat 8. *Scientia Plena*, 11, 1-8.
- Zhang, X. Y. et al. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, v. 84, pp. 471-475.
- Zullo Junior, J. 1994. *Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. 189 p. Tese de Doutorado.