

## EVOLUÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E SUA RELAÇÃO COM O ESTRESSE HÍDRICO: UMA REVISÃO

EVOLUTION OF VEGETATION INDICES AND THEIR RELATIONSHIP TO WATER STRESS: A REVIEW

EVOLUCIÓN DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN Y SU RELACIÓN CON EL ESTRÉS HÍDRICO: UNA REVISIÓN

**Fabiano André Marion<sup>1</sup>**

**Juliano Andres<sup>2</sup>**

**Elvis Rabuske Hendges<sup>3</sup>**

**Resumo:** Os índices de vegetação (IVs) são calculados por meio de razão simples ou normalizada, diferenciação, diferenças de proporções e somas e formação de combinações de dados de bandas espectrais. Os IVs possuem como função realçar o sinal da vegetação e minimizar as variações na irradiância solar e os efeitos do substrato do dossel vegetal. As condições de estresse por déficit hídrico são passíveis de mensuração por meio de IVs, o qual causa redução nas taxas fotossintéticas e de transpiração da planta, resultando na queda substancial do IV. Nesse sentido, o objetivo deste artigo é fornecer uma visão geral da evolução dos IVs, de forma breve e em ordem cronológica, e sua relação com o estresse hídrico. Para isso, foram expostas as principais alterações fisiológicas decorrentes do estresse hídrico, seus efeitos na resposta espectral da vegetação e apresentados os 12 índices criados entre 1973 e 2015 mais recorrentes na literatura científica. O aperfeiçoamento de índices mais antigos ocorre de maneira concomitante ao surgimento de IVs que exploram novas faixas espectrais, ampliando as possibilidades de criação de IVs mais focados nas necessidades de cada usuário. Com os avanços tecnológicos, as maiores possibilidades de surgimentos de novos IVs estão no uso de VANT (veículo aéreo não tripulado), possibilitando a coleta de dados com alta resolução, e nos dados hiperespectrais, que apresentam centenas de estreitas faixas espectrais, podendo adaptar a coleta de informações de acordo com os tipos e alterações fisiológicas na vegetação a serem pesquisadas.

**Palavras-chave:** Sensoriamento remoto da vegetação; Bandas espectrais; NDVI; Déficit hídrico.

---

<sup>1</sup> Doutor em Geografia. Professor da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste). Francisco Beltrão/PR. E-mail: [fabiano.marion@unioeste.br](mailto:fabiano.marion@unioeste.br). Lattes iD: <http://lattes.cnpq.br/5219339866821254>. Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0002-8762-315X>.

<sup>2</sup> Doutor em Geografia. Professor da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste). Francisco Beltrão/PR. E-mail: [juliano.andres@gmail.com](mailto:juliano.andres@gmail.com). Lattes iD: <http://lattes.cnpq.br/2848989519006412>. Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0002-1206-6483>.

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Florestal. Professor da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste). Francisco Beltrão/PR. E-mail: [elvis\\_hendges@hotmail.com](mailto:elvis_hendges@hotmail.com). Lattes iD: <http://lattes.cnpq.br/5292160200165795>. Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0003-2304-5634>

**Abstract:** Vegetation indices (VIs) are calculated using simple or normalized ratios, differentiation, differences in proportions and sums, and formation of combinations of spectral band data. The VIs has the function of enhancing the vegetation signal and minimizing the variations in solar irradiance and the effects of the canopy substrate. The stress conditions due to water deficit are measurable by means of VIs, which cause a reduction in the photosynthetic and transpiration rates of the plant, resulting in a substantial drop in the VI. In this sense, the aim of this article is to provide an overview of the evolution of VIs, briefly and in chronological order, and its relationship with water stress. For this, the main physiological changes resulting from water stress were exposed, its effects on the spectral response of vegetation, and presented the 12 most recurrent indices created between 1973 and 2015 in the scientific literature. The improvement of older indices occurs at the same time as the emergence of VIs that explore new spectral ranges, expanding the possibilities of creating VIs more focused on the needs of each user. With technological advances, the greatest possibilities for the emergence of new VIs are in the use of UAV (unmanned aerial vehicle), enabling the collection of data with high resolution, and in hyperspectral data, which present hundreds of narrow spectral bands, being able to adapt to collecting information according to the types and physiological changes in the vegetation to be surveyed.

**Keywords:** Remote sensing of vegetation; Spectral bands; NDVI; Water deficit.

**Resumen:** Los índices de vegetación (IVs) se calculan utilizando proporciones simples o normalizadas, diferenciación, diferencias en proporciones y sumas, y formación de combinaciones de datos de bandas espectrales. Los IVs tienen la función de mejorar la señal de la vegetación y minimizar las variaciones en la irradiancia solar y los efectos del sustrato del dosel. Las condiciones de estrés por déficit hídrico son medibles mediante IV, que provocan una reducción en las tasas de fotosíntesis y transpiración de la planta, resultando en una caída sustancial del IV. En este sentido, el objetivo de este artículo es ofrecer una visión general de la evolución de los IV, de forma breve y cronológica, y su relación con el estrés hídrico. Para ello, se expusieron los principales cambios fisiológicos derivados del estrés hídrico, sus efectos sobre la respuesta espectral de la vegetación, y se presentaron los 12 índices más recurrentes creados entre 1973 y 2015 en la literatura científica. La mejora de los índices más antiguos se produce al mismo tiempo que la aparición de IVs que exploran nuevos rangos espectrales, ampliando las posibilidades de crear IVs más enfocados a las necesidades de cada usuario. Con los avances tecnológicos, las mayores posibilidades para el surgimiento de nuevos IVs están en el uso de VANT (vehículo aéreo no tripulado), que permite la recolección de datos con alta resolución, y en datos hiperespectrales, que presentan cientos de bandas espectrales estrechas, pudiendo adaptarse a la recopilación de información de acuerdo con los tipos y cambios fisiológicos de la vegetación a estudiar.

**Palabras clave:** Teledetección de la vegetación; Bandas espectrales; NDVI; Déficit hídrico.

## Introdução

Os índices de vegetação (IVs) são transformações de duas ou mais bandas baseadas na resposta espectral da vegetação, geralmente na porção do vermelho (*red*) e do infravermelho próximo (*near infrared* – NIR) do espectro eletromagnético (XUE; SU, 2017). Essas faixas espectrais são as mais importantes no estudo da vegetação, uma vez que detêm mais de 90% da variação de sua resposta espectral (BARET; GUYOT; MAJOR, 1989). O contraste entre a baixa

quantidade de energia refletida no vermelho e alta reflectância do infravermelho próximo foi o foco que impulsionou a criação dos IVs (ROSENDO; ROSA, 2005), podendo ocorrer variações em função das diferentes concentrações dos pigmentos fotossintéticos presentes na folha, da estrutura foliar interna e da concentração de água (GALVÃO *et al.*, 2018).

Jensen (2009) caracteriza os IVs como medidas radiométricas adimensionais que indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação verde, incluindo: o índice de área foliar (IAF); a porcentagem de cobertura vegetal; o teor de clorofila; a biomassa verde; a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida; e a produtividade (ZHAO *et al.*, 2018). Dessa forma, os IVs realçam o comportamento espectral da vegetação e se correlacionam com seus parâmetros biofísicos (ROSENDO; ROSA, 2005).

Os IVs podem ser calculados pela razão simples ou normalizada, diferenciação, diferenças de proporções e somas e formação de combinações de dados de bandas espectrais, cuja função é realçar o sinal da vegetação e minimizar as variações na irradiância solar e os efeitos do substrato do dossel vegetal, ou seja, amenizam os efeitos externos ao alvo (JACKSON; HUETE, 1991).

As condições de estresse por déficit hídrico são passíveis de mensuração por meio de técnicas sensoriamento remoto, pelo uso de dados provenientes de diferentes sensores, localizados em plataformas orbitais e suborbitais e expressos por meio de índices de vegetação - IVs (DONOHUE; MCVICAR; RODERICK, 2009). O aumento da quantidade de vegetação e da atividade fotossintética conduz ao aumento nos valores de IV. Por sua vez, o estresse hídrico causa redução nas taxas fotossintéticas e de transpiração da planta, que se traduzem na redução substancial dos IVs (BONIFACIO; DUGDALE; MILFORD, 1993).

Barnes *et al.*, (2017) comprovaram a capacidade dos IVs em detectar mudanças temporais na atividade fotossintética da vegetação submetida às condições de estresse hídrico. Por isso, os IVs têm sido amplamente utilizados para avaliar a degradação da vegetação, as características do ecossistema e as condições fisiológicas (ZHAO *et al.*, 2018).

Quando determinada planta é submetida às condições de déficit hídrico, ocorrem mudanças nas reações bioquímicas (fechamento dos estômatos, com perda menor de água e diminuição na taxa fotossintética devido à menor absorção do CO<sub>2</sub>), na tentativa de contornar essa situação-problema (FURLANETTO; SILVA, 2017). O déficit hídrico ocorre quando todo o conteúdo de água de um tecido ou célula se encontra abaixo da capacidade de maior estado de hidratação, devido à redução da disponibilidade de água no solo (SANTOS; CARLESSO, 1998).

Os IVs são classificados levando em consideração sua associação predominante com a estrutura da vegetação, bioquímica e fisiologia (GALVÃO *et al.*, 2018). Dessa forma, os autores dividem os índices de vegetação em: (1) índices intimamente relacionados ao esverdeamento e pigmentos foliares - clorofila e carotenoides (NDVI - *normalized difference vegetation index*, EVI - *enhanced vegetation index*, SR - *simple ratio* e VARI - *visible atmospherically resistant vegetation index*); (2) índices associados ao conteúdo de água nas folhas/copa (NDWI - *normalized difference water index*), que indicam estresse no dossel (alterações no pigmento), (PSRI - *plant senescence reflectance index*); (3) índices que expressam eficiência no uso da luz (PRI - *photochemical reflectance index*); e (4) índices que mostram variações espectrais associadas à posição do comprimento de onda da borda do vermelho (*red edge*), que podem ser afetadas por alterações na concentração de clorofila ou no estresse hídrico (RENDVI - *red edge normalized difference vegetation index*).

A classificação dos IVs é afetada pelos avanços tecnológicos, já que é atrelada à modernização das plataformas e sensores. A partir de 2000, experiências e tentativas têm sido feitas no sentido de demonstrar a viabilidade do imageamento hiperespectral (centenas de bandas), que possibilita utilizar intervalos mais específicos (bandas estreitas), de acordo com a finalidade desejada, como nas posições da banda *red edge* (XUE; SU, 2017).

O principal fator de diferenciação entre bandas largas (multiespectrais) e estreitas (hiperespectrais) está na sua aplicabilidade: enquanto na alta resolução espectral o intervalo de interpretação também é menor, devido ao fato de que as informações coletadas são muito específicas, nos índices de bandas largas, podem ser mais universalmente aplicados à avaliação da vegetação, mas sua especificidade - por causa da informação em massa - é baixa. No presente artigo, evitou-se a diferenciação de bandas estreitas e largas, portanto, fez-se uso de uma abordagem mais tradicional para discernir os índices. Dessa forma, o objetivo é fornecer uma visão geral da evolução dos IVs mais recorrentes na literatura científica, de forma breve e em ordem cronológica, e sua relação com o estresse hídrico. Os índices mencionados aqui são verificados e referenciados no banco de dados online (<https://www.indexdatabase.de/>) (HENRICH *et al.*, 2009).

### **A vegetação e sua interação com o espectro eletromagnético**

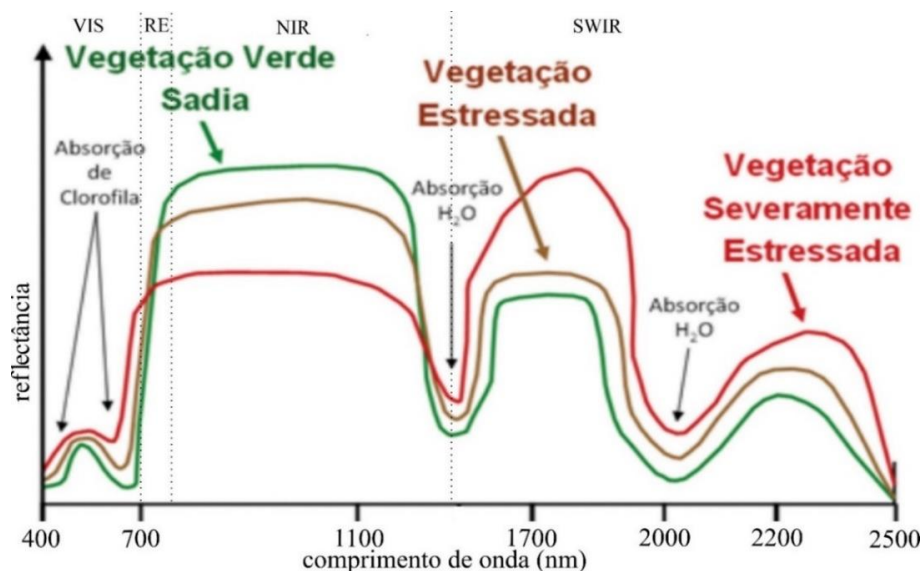
A interação da vegetação com o espectro eletromagnético se caracteriza em função das condições ambientais e de seu estágio de desenvolvimento fenológico, fortemente correlacionado ao processo de fotossíntese. Desse modo, o aproveitamento da radiação não é o

mesmo em toda a extensão do espectro eletromagnético. Galvão *et al.* (2018) dividem o espectro eletromagnético em seis regiões espectrais: visível - subdividida em azul (*blue*), verde (*green*) e vermelho (*red*) (400 a 700 nm); borda do vermelho (*red edge*) (701 a 760 nm); infravermelho próximo - 1 (*near infrared* - NIR1) (761 a 900 nm); infravermelho próximo - 2 (*near infrared* - NIR2) (901 a 1.400 nm); infravermelho de ondas curtas - 1 (*short wave infrared* - SWIR1) (1.401 a 1.900 nm); e infravermelho de ondas curtas - 2 (*short wave infrared* - SWIR2) (1.901 a 2.500 nm).

Ao explicar o processo de fotossíntese, Moreira (2007) ressalta que as radiações correspondentes ao *blue* (450 a 500 nm) e ao *red* (650 a 720 nm) são as mais aproveitadas, por apresentarem baixa reflectância em decorrência das bandas de absorção da radiação, incidente pelos pigmentos da planta em 480 nm (carotenoides) e em 620 nm (clorofila). A energia em torno de 560 nm é menos aproveitada pela vegetação e, portanto, refletida, conferindo cor verde à vegetação sadia (MENESES; ALMEIDA, 2019).

Quando a planta atinge a senescência ou é afetada por estresse, os pigmentos de clorofila diminuem, permitindo que os carotenos e outros pigmentos se tornem dominantes e alterem a resposta espectral. Essas plantas terão reflectância bem maior, principalmente nas faixas do *green* e no *red* do espectro, fazendo com que apareçam amareladas ou cloróticas. De fato, o aumento da reflectância no visível é a mais consistente resposta da reflectância foliar ao estresse (JENSEN, 2009), conforme pode ser observado na figura 1.

**Figura 1** - Comparação da resposta espectral da vegetação sadia e estressada (diagrama esquemático).



Fonte: Adaptado de Souza Filho *et al.* (2008).

Na região do visível, a resposta espectral das folhas é influenciada, principalmente, pelos pigmentos encontrados nos cloroplastos, como clorofila (65%), carotenos (6%) e xantofilas (29%), variando conforme a espécie (PONZONI, 2001). O pigmento clorofila, predominante na folha, é responsável pela fotossíntese, convertendo a energia das radiações do visível em energia química a ser utilizada pela planta.

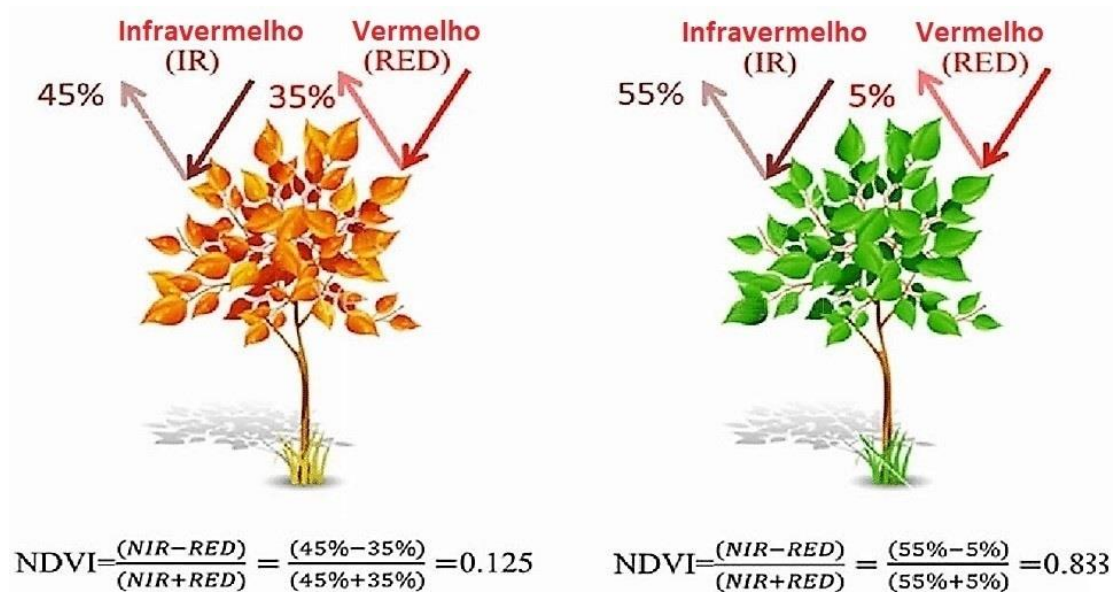
A diminuição da quantidade de água causa alterações no comportamento espectral e acarreta a degradação de proteínas e de pigmentos, o que torna as folhas menos aptas a absorver radiação eletromagnética na região do visível, resultando no aumento da porcentagem de reflectância (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

Ao passar do espectro do visível para a região do NIR, ocorre aumento significativo na reflectância, em razão de a energia do NIR ser fortemente refletida pelas estruturas celulares internas da folha (XUE; SU, 2017). Jensen (2009) explica que, se as plantas absorvessem a energia do NIR com a mesma eficiência do visível, elas poderiam ser irreversivelmente danificadas, o que as faria refletir ou transmitir a energia dessa região. No espectro, essa mudança no comportamento do visível para o NIR ocorre no estreito intervalo de comprimento de onda de 701 a 760 nm (*red edge*), caracterizado por um rápido aumento da reflectância com o comprimento de onda (GALVÃO *et al.*, 2018; SANO *et al.*, 2019).

No âmbito do NIR, a vegetação verde e sadia se caracteriza por alta reflectância, alta transmitância e baixa absorção, quando comparada ao visível. As folhas verdes absorvem

pouca energia, apresentando alta reflectância causada pelo espalhamento resultante dos diferentes índices de refração do líquido intracelular e dos espaços intercelulares do mesófilo (MOREIRA, 2007). A figura 2 exemplifica como as alterações fisiológicas em uma planta interferem na sua resposta ao NDVI.

**Figura 2** - Exemplo do cálculo do NDVI para uma planta sadia e para uma planta estressada.



**Fonte:** Adaptado de: Li, Tian e Ahamed (2014).

No SWIR, a reflectância diminui substancialmente. Jensen (2009) explica que isso ocorre devido à diminuição de água nos espaços de ar intercelular da planta, fazendo com que a energia do SWIR incidente nas folhas seja mais intensamente espalhada pelas interfaces das paredes celulares, principalmente de 1.500 a 1.800 nm e de 2.100 a 2.300 nm.

Fatores externos à vegetação em si, como, por exemplo, disponibilidade de água, podem causar alterações na relação água/ar no mesófilo. Com a perda de umidade da folha, a reflectância aumenta, promovendo alterações na sua estrutura interna (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012). O grau de absorção de energia solar que incide na vegetação, na faixa do SWIR, ocorre em função da quantidade total de água presente na folha, a qual depende da porcentagem de umidade e da sua espessura (MOREIRA; ASSUNÇÃO, 1984).

### Índices de vegetação – IVs: da origem até os dias atuais

Devido à importância das bandas do *red* e do NIR para os estudos da vegetação, os primeiros IVs foram criados por meio de proporções simples baseadas nessas duas bandas espectrais para contrastar as diferenças da vegetação com os demais objetos terrestres (ROSENDO; ROSA, 2005). Entretanto, não existe consenso na literatura acerca do(os) criadores(es) do primeiro IV. Ayanlade (2017) aponta que, em 1968, Birth e MacVey criaram o *ratio vegetation index* (RVI) (equação 1), também conhecido por *simple ratio* (SR) e, em 1972, Pearson e Miller criaram o *vegetation index number* (VIN) (equação 2). Entretanto, Sue e Xu (2017) consideram que o primeiro IV foi o RVI, criado para contrastar a diferença da vegetação com os demais objetos terrestres, em 1969, por Jordan.

$$RVI = \frac{RED}{NIR} \quad (1)$$

$$VIN = \frac{NIR}{RED} \quad (2)$$

Apesar de serem simples, esses índices são usados até hoje, principalmente em comparações, pois são fáceis de ser computados e interpretados (AYANLADE; 2017). No entanto, se a vegetação é esparsa, ela é afetada pela reflectância do solo. Além do mais, esses índices não possuem distribuição normal, o que facilita a comparação (BANNARI *et al.*, 1995).

Os IVs representam medidas integrativas da atividade fotossintética da vegetação com variações estruturais do dossel, as quais são úteis no monitoramento, análise de séries temporais e estudos de detecção de mudanças (interanual e sazonal) (HUETE *et al.*, 2002). Os autores também alertam que os valores obtidos podem ser afetados pelo solo, por ângulos solares e pela atmosfera, os quais interferem diferentemente em cada banda espectral e de acordo com o instrumento utilizado. Para os autores, quando calculados a partir de dados obtidos sobre o mesmo alvo, mas com diferentes instrumentos, os resultados podem não ser os mesmos, devido às características e funções de respostas relativas de cada sensor (filtro de banda).

O *normalized difference vegetation index* (NDVI) é atualmente o índice mais aplicado nos estudos da vegetação (AYANLADE, 2017; SUE; XU, 2017) e foi criado por Rouse *et al.* (1973a) a partir da normalização matemática, para melhorar a interpretação e visualização das informações (equação 3).



$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3)$$

Dessa forma, o NDVI varia entre -1,0 e +1,0, o que constitui uma vantagem prática para a análise de seus resultados quando comparado com índices não normalizados, como o VIN, que é sempre positivo e tem intervalo matematicamente infinito (0 a infinito). A faixa do *red* no numerador do NDVI foi implantada para dimensionar os resultados, criando, assim, valores negativos (AYANLADE, 2017).

Apesar de o NDVI estar diretamente relacionado à capacidade fotossintética (absorção de energia), refletindo também a influência do estresse hídrico (HUETE *et al.*, 2006; FURLANETTO; SILVA, 2017), Gao (1996) adverte que, pelo fato de o NDVI ser baseado no espectro eletromagnético das bandas do *red* e do NIR, regiões de forte absorção pelas clorofilas e alta reflectância do dossel da vegetação, o NDVI representa clorofilas ao invés do conteúdo de água, sendo, para esse fim, de uso limitado.

Xue e Su (2017) entendem que o NDVI não corrige os efeitos atmosféricos e tem faixa dinâmica curta, subestimando a vegetação esparsa devido aos efeitos do solo. Jackson e Huete (1991) apontam outro problema: a saturação, quando a cobertura vegetal é densa, uma vez que as bandas do *red* e do NIR, tem pesos iguais na fórmula. Para eliminar valores negativos e normalizar o histograma das análises que empregam o NDVI, Rouse *et al.* (1973b) criaram o *transformed vegetation index* (TVI) (equação 4).

$$TVI = \sqrt{NDVI + 0,5} \quad (4)$$

O TVI utiliza a soma de 0,5 para impedir valores negativos. Dessa forma, não há diferenças entre NDVI e TVI em termos de saída de imagem ou detecção de vegetação ativa. Entretanto, por ser mais sensível a fatores como condição das nuvens, atmosfera e características do solo, Ayanlade (2017) ressalta que o TVI deve ser usado com grande cautela.

A partir da década de 1980, a atenção dos pesquisadores de sensoriamento remoto foi direcionada para o problema da reflectância do solo, que limitava seu uso em situações em que apresentasse alta intensidade de brilho, com interferência na interpretação das condições da

vegetação. Uma das tentativas mais bem-sucedidas foi a de Huete (1988), ao propor o *soil-adjusted vegetation index* - SAVI (equação 5) com o propósito de corrigir as deficiências do NDVI relativas às reflectâncias do solo, contendo fator não linear (L) que se correlaciona com a densidade da vegetação.

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} (1 + L) \quad (5)$$

Ao criar o índice, Huete (1988) estabelece que o fator L pode variar de 0 a 1, conforme a densidade da vegetação. Em áreas de cobertura vegetal muito baixa, deve-se utilizar o fator 1 para L; em cobertura vegetal intermediária, fator 0,5; e em alta densidade de vegetação, fator 0,25. Para valor L igual a zero, SAVI e NDVI equivalem. O estudo de Huete (1988) foi base para a criação do EVI (*enhanced vegetation index*).

Quando a vegetação é esparsa, o índice usado é muito influenciado por parâmetros do solo e por fatores atmosféricos, o que ensejou, a partir dos anos 1990, a realização de pesquisas para a criação de IVs que lidassem com essa questão (SUE; XU, 2017). Nesse sentido, Kaufman e Tanré (1992) incorporaram a diferença entre a radiância do comprimento de onda do *blue* e do *red* para corrigir o espalhamento atmosférico e a absorção de ozônio, criando assim, o ARVI (*atmospherically resistant vegetation index*) (equação 6). Os autores fornecem indicações de diferentes valores para gama ( $\gamma$ ) a serem usados, conforme as características da área de estudo, sendo o valor de 1 o mais recomendado.

$$ARVI = \frac{NIR - RED - \gamma(RED - BLUE)}{NIR + RED - \gamma(RED - BLUE)} \quad (6)$$

A partir da segunda metade da década de 1990, surgiram estudos referentes a IVs utilizando bandas além do *blue*, do *red* e do NIR, tais como: a do *red edge* por Gitelson, Merzlyak e Lichtenthaler (1996) e a do SWIR - *normalized difference water index* (NDWI) por Gao (1996) – equação 7.

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (7)$$

Antes mesmo da implementação das bandas do *red edge* nos sistemas orbitais multiespectrais e hiperespectrais, Gitelson, Merzlyak e Lichtenthaler (1996), ao estudarem a refletância de amostras foliares na faixa entre 680 e 750 nm (*red edge*), concluíram que ela é altamente correlacionada com o conteúdo de clorofila, o que pode tornar o índice pelo menos cinco vezes mais sensível à clorofila existente na vegetação. Dessa forma, a substituição da banda do *red* pela do *red edge* (faixa de transição entre o visível e o NIR) possibilitou a implementação do *red edge normalized difference vegetation index* (RENDVI) (equação 8).

$$RENDVI = \frac{NIR - RED\ EDGE}{NIR + RED\ EDGE} \quad (8)$$

Barnes *et al.* (2017) reforçam a importância da banda do *red edge* para estimar o teor de clorofila, uma vez que encontraram o melhor desempenho na borda do vermelho (*red edge*) do espectro eletromagnético. Segundo os autores, essa região é conhecida por ser sensível às diferenças no seu teor, correlacionada positivamente com a capacidade fotossintética.

Liu e Huete (1995) analisaram exaustivamente a interferência do solo e da atmosfera em IVs e perceberam que a redução da interferência de um deles pode implicar o aumento do outro. Dessa forma, para eliminar os fatores perturbadores provenientes do solo e dos efeitos atmosféricos, Huete *et al.* (2002) criaram o EVI a partir da combinação do SAVI com o ARVI. Assim, com a redução dos efeitos do substrato do dossel e da influência da atmosfera, o EVI aprimora o monitoramento da vegetação, pois trata-se de um índice não normalizado desenvolvido para melhorar o sinal da vegetação, otimizando a sensibilidade em regiões com alta quantidade de biomassa (HUETE *et al.*, 2002; PAN; GAO; WANG, 2018). A fórmula foi projetada com bandas do Landsat, mas os autores também apresentam versão generalizada (equação 9).

$$EVI = 2,5 * \frac{NIR - RED}{NIR + (C1 * RED) - (C2 * BLUE) + L} \quad (9)$$

Conforme Huete *et al.* (2002), o EVI possui um fator de ajuste para solos (L) e dois coeficientes (C1 e C2), que descrevem o uso da banda *blue* para correção da banda do *red* quanto ao espalhamento atmosférico por aerossóis. Os coeficientes de sua equação (C1, C2 e L) são determinados por valores empíricos, os quais assumem 6, 7,5 e 1, respectivamente. Dependendo do tipo de alvo, o fator L pode ser ajustado entre 1 e 0. A diminuição de L reduz a influência topográfica sobre áreas florestais, mas também a sensibilidade do EVI ao IAF (GALVÃO *et al.*, 2016).

Conforme Gitelson *et al.* (2002), quando o índice de área foliar (IAF) é alto, a razão RED / NIR é menos efetiva para avaliar a fração de vegetação, porque a reflectância do NIR satura em frações mais altas de vegetação, entretanto a relação GREEN / RED acompanha a fração de vegetação em alta correlação. Além disso, os autores perceberam que, adicionando a banda do *blue* à fórmula, como fator de autocorreção para a atmosfera, eles poderiam aumentar a correlação do índice com o IAF. Por isso, criaram o *visible atmospherically resistant vegetation index* (VARI) (equação 10).

$$VARI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED - BLUE} \quad (10)$$

Outra tentativa em melhorar o NDVI foi realizada por Gitelson (2004), ao criar o WDRVI (*wide dynamic range vegetation index*). Quando o IAF é alto, o NDVI perde sua precisão devido à diminuição da reflectância do NIR. O WDRVI aprimora a faixa dinâmica do NDVI, aplicando parâmetro de ponderação à reflectância do NIR (equação 11).

$$WDRVI = \frac{(\alpha NIR - RED)}{(\alpha NIR + RED)} \quad (11)$$

Se  $\alpha$  for igual a 1, WDRVI é equivalente ao NDVI. Se  $\alpha$  for igual à razão (RED / NIR), o WDRVI será zero. Após os procedimentos de validação, chegou-se a valor satisfatório de 0,20 para  $\alpha$ . O WDRVI busca, de maneira simples, aprimorar a faixa dinâmica para ambientes de alta biomassa (IAF > 2). No entanto, quando a biomassa diminui (IAF < 1), o NDVI ainda é a melhor escolha para analisar a vegetação (GITELSON, 2004; SUE; XU, 2017).

Um dos índices mais promissores é o VDVI (*visible band-difference vegetation index*), criado por Wang *et al.* (2015) (equação 12). Ao utilizarem VANT (veículo aéreo não tripulado), o VDVI apresentou precisão superior a 90% em comparação com outros índices que utilizam a faixa do visível (WANG *et al.*, 2015). Portanto, é uma grande promessa para o monitoramento da vegetação.

$$VDVI = \frac{2(GREEN - RED - BLUE)}{2(GREEN + RED + BLUE)} \quad (12)$$

### Considerações finais e perspectivas para estudos futuros

Os primeiros IVs, criados com base na biofísica vegetal e sem corrigir quaisquer características perturbadoras, foram os propulsores dos índices atuais. Devido a sua simplicidade, são ainda muito usados na atualidade, a exemplo do NDVI, criado em 1973 e que aparece na grande maioria das pesquisas que utilizam IVs. Assim, esses índices simples, baseados no comportamento antagônico das faixas espectrais, ainda são a base de todas as pesquisas feitas com novos IVs.

Próximo ao início da década de 1980, a atenção das pesquisas com IVs em sensoriamento remoto foi direcionada para o problema da influência da refletância do solo em áreas de vegetação esparsa. Assim, foram criados índices baseados no NDVI, com coeficientes de ajuste ao solo, a exemplo do SAVI.

Na década de 1990, o foco mudou e levou a índices que corrigissem os distúrbios atmosféricos, como o ARVI e o EVI. À medida que avançamos para o início dos anos 2000, tentativas de criar um índice mais completo (correções de solo e atmosféricas em um mesmo IV) foram realizadas. O EVI tornou-se bastante difundido por apresentar a correção para ambos, entretanto, devido à maior dependência da reflectância no NIR, é mais sensível aos efeitos direcionais, quando comparado com índices normalizados.

Atualmente, ainda ocorre o aperfeiçoamento de índices mais antigos, em conjunto com o surgimento de IVs que utilizam o espectro do visível, ampliando as possibilidades de criação de índices mais eficazes de acordo com as necessidades de cada usuário, mesmo para aqueles que não possuem câmeras hiperespectrais. Isso apoia-se no fato de que câmeras e VANT estão cada vez mais acessíveis, permitindo uma maior autonomia de voo e, conseqüentemente, uma maior abrangência das áreas imageadas.

Os avanços tecnológicos e, conseqüentemente, o aumento da disponibilidade de VANT

e sensores (multi e hiperespectrais) possibilitam um maior número de bandas e, com isso, faixas espectrais mais ajustadas. Assim, o futuro do monitoramento da vegetação pode estar nessas bandas estreitas, as quais possibilitam adaptar a coleta de dados de acordo com os tipos e estágios fenológicos pesquisados, aumentando as possibilidades de surgimentos de novos IVs. No entanto, como já afirmado, o uso de bandas mais amplas também significa uma gama maior de interpretações.

## Referências

AYANLADE, A. Remote Sensing vegetation dynamics analytical methods: a review of vegetation indices techniques. **Geoinformatica Polonica**, v. 16, p. 11-17, 2017. DOI: 10.4467/21995923GP.17.001.7188

BANNARI, A.; MORIN, D.; BONN, F.; HUETE, A. R. A review of vegetation indices. **Remote Sensing Reviews**, v. 13, n. 1-2, p. 95-120, 1995. DOI: 10.1080/02757259509532298

BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. J. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM 12th, 1989, Vancouver, Canada. **Anais...** Vancouver: IEEE, 1989. p. 1355-1358. DOI: 10.1109/IGARSS.1989.576128

BARNES, M. L.; BRESHEARS, D. D.; LAW, D. J.; LEEUWEN, W. J.D.; MONSON, R.K.; FOJTIKA, C. Beyond greenness: Detecting temporal changes in photosynthetic capacity with hyperspectral reflectance data. **PLoS One**, v. 12 n. 12, p. 128-143, 2017. DOI: 10.1371/journal.pone.0189539

BONIFACIO, R.; DUGDALE, G.; MILFORD, J. R. Sahelian rangeland production in relation to rainfall estimates from Meteosat. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 14, p. 2695-2711, 1993. DOI: 10.1080/01431169308904302

DONOHUE, R. J.; MCVICAR, T. R.; RODERICK, M. L. Climate-related trends in Australian vegetation cover as inferred from satellite observations, 1981–2006. **Global Change Biology**, v. 15, n. 4, p. 1025-1039, 2009. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01746.x

FURLANETTO, R. H.; SILVA, C. R. da. Monitoramento remoto de plantas submetidas à condição de seca. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v. 10, n. 3, p. 115-126, 2017. DOI.: 10.5935/PAeT.V10.N3.13

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 & Remote Sensing**, v. 53, n. 3, p. 360-381, 2016. DOI.: 10.1080/15481603.2015.1134140

GALVÃO, L. S.; EPIPHANIO, J. C. N.; BREUNIG, F. M.; FORMAGGIO, A. R. Crop type discrimination using hyperspectral data. In: THENKABAIL, P. S.; LYON, J. G.; HUETE, A. **Biophysical and Biochemical Characterization and Plant Species Studies**. 2a ed. Boca Raton: CRC Press, 2018, p. 183–210. DOI.: 10.1201/b11222-25

GAO, B. C. NDWI – Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257-266. 1996. DOI.: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3

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

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 76-87, 2002. DOI.: 10.1016/S0034-4257(01)00289-9

GITELSON, A. A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. **Journal of Plant Physiology**, v. 161, n. 2, p. 165-173, 2004. DOI.: 10.1078/0176-1617-01176

HENRICH, V.; JUNG, A.; GÖTZE, C.; SANDOW, C.; THÜRKOW, D.; GLÄBER, C. Development of an online indices database: Motivation, concept and implementation. 6th EARSeL Imaging Spectroscopy SIG Workshop Innovative Tool for Scientific and Commercial Environment Applications. **Anais...** Tel Aviv, Israel, March 16-18, 2009.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X

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

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; SHIMABUKURO, Y.; RATANA, P.; SALESKA, S. R.; HUTYRA, L. R.; YANG, W. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical research letters**, v. 33, n. 6, 2006. DOI: 10.1029/2005GL025583

JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting Vegetation Indices. **Preventive Veterinary Medicine**, v. 11, n. 3-4, p. 185-200, 1991. DOI: 10.1016/S0167-5877(05)80004-2

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução da 2 ed.: José Carlos N. Epiphanyo (coordenador); Antonio R. Formaggio; Athos R. Santos; Bernardo F. T. Rudorff; Cláudia M. Almeida; Lênio S. Galvão. São José dos Campos: Parêntese. 2009. 598 p.

KAUFMAN, Y. J.; TANRE, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 2, p. 261-270, 1992. DOI: 10.1109/36.134076

LI, L.; TIAN, L. F.; AHAMED, T. Preharvest Monitoring of Biomass Production. In: SHASTRI, Y; HANSEN, A.; RODRÍGUEZ, L.; TING, K. C. (Ed.). **Engineering and Science of Biomass Feedstock Production and Provision**. New York: Springer, 2014. p 61-83. DOI: 10.1007/978-1-4899-8014-4\_4

LIU, H. Q.; HUETE, A. R. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 2, p. 457-465, 1995. DOI: 10.1109/TGRS.1995.8746027



MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. Fundamentos de espectrorradiometria. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; BAPTISTA, G. M. M. (Ed.). **Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019, p. 11-38.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação**. 3.ed. Viçosa: UFV, 2007. 315 p.

MOREIRA, M. A.; ASSUNÇÃO, G. V. **Princípios básicos, metodologias e aplicações de Sensoriamento Remoto na agricultura**. São José dos Campos: INPE, 1984. 64 p.

PAN, X.; GAO, Y; WANG, J. Response differences of MODIS-NDVI and MODIS-EVI to climate factors. **Journal of Resources and Ecology**, v. 9, n. 6, p. 673-680, 2018. DOI.: 10.5814/j.issn.1674-764x.2018.06.010

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. M. (Ed.). **Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: Editora da UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p. 157-199.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 176 p.

ROSENDO, J. S.; ROSA, R. A utilização de sensores com resolução moderada (MODIS) no estudo da vegetação na bacia do rio Araguari-MG. **Sociedade & Natureza**, v. 17, n. 33, p. 91-104. 2005.

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.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL J. A.; DEERING, D. W.; HARLAN, J. C. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation**. NASA/GSFC: Final Report, Greenbelt, Maryland, USA, 112 p., 1973b.

SANO, E. E.; PONZONI, F. J.; MENESES, P. R.; BAPTISTA, G. M. M.; TONIOL, A.; GALVÃO, L. S.; ROCHA, W. J. S. F. Reflectância da vegetação. In: MENESES, P.R.;

ALMEIDA, T.; BAPTISTA, G. M. M. (Ed.). **Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019, p. 189-223.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v2n3p287-294

SOUZA FILHO, C. R. de; AUGUSTO, V.; OLIVEIRA, W. J.; LAMMOGLIA, T. Detecção de exsudações de hidrocarbonetos por geobotânica e sensoriamento remoto multi-temporal: estudo de caso no Remanso do Fogo (MG). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 2 suppl, p. 228-243, 2008.

WANG, X.; WANG, M.; WANG, S.; WU, Y. Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images. *Nongye Gongcheng Xuebao / Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol. 31, n. 5, p. 152–159. 2015. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.05.022

XUE, J.; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. **Journal of Sensors**, v. 2017, 2017. DOI: 10.1155/2017/1353691

ZHAO, A.; ZHANG, A.; CAO, S.; LIU, X.; LIU, J.; CHENG, D. Responses of vegetation productivity to multi-scale drought in Loess Plateau, China. **Catena**, v. 163, p. 165-171, 2018. DOI: 10.1016/j.catena.2017.12.016.

*Recebido em 2 de novembro de 2021.  
Aceito em 28 de novembro de 2021.  
Publicado em 13 de dezembro de 2021.*