

ÍNDICES DE VEGETAÇÃO GERADOS POR SENSOR HIPERESPECTRAL EM CULTIVARES DE ALFACE ROXA E VERDE

Iury Pattryck Soares Rocha¹, Ygor Inácio Dias Rosa¹, Marcos Paulo do Carmo Martins¹, Gabriel Rodrigues Silva¹, Gabriel Mascarenhas Maciel¹, Ana Carolina Silva Siquieroli¹

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, Minas Gerais (iury.rocha@ufu.br)

RESUMO: A alface (*Lactuca sativa*) é uma das hortaliças folhosas mais cultivadas no Brasil, com ampla diversidade morfológica e fisiológica. A clorofila, pigmento essencial à fotossíntese, é um indicador relevante para o desenvolvimento da planta e produtividade. Métodos tradicionais para quantificação de clorofila são destrutivos e demorados, enquanto sensores portáteis como o SPAD-502 oferecem alternativas não destrutivas, porém limitadas em precisão sob variações ambientais. Este estudo teve como objetivo correlacionar índices de vegetação obtidos por sensor hiperespectral com o índice SPAD em cultivares de alface roxa (Pira 72) e verde (UFU-66#7), visando pré-validar ferramentas de fenotipagem. As medições foram realizadas aos 50 dias após a semeadura, utilizando espectrômetro Green Wave na faixa de 350–1150 nm. Foram calculados oito índices hiperespectrais, incluindo TCARI, MCARI e NDVI. Para a cultivar roxa, os índices TCARI e MCARI apresentaram correlação significativa com o SPAD ($r = 0,832$; $p < 0,05$), sendo o TCARI mais indicado por considerar a interferência de outros pigmentos como antocianina. Já para a cultivar verde, não houve correlação significativa isolada, mas um modelo de regressão múltipla envolvendo TCARI, GNDVI, RENDVI e NDRE apresentou R^2 de 95%, indicando forte relação com o índice SPAD. Os resultados demonstram o potencial dos sensores hiperespectrais como ferramenta eficiente para fenotipagem em alface, especialmente em programas de melhoramento genético. Estudos adicionais com mais genótipos são recomendados para validação dos índices propostos.

Palavras-chave: *Lactuca sativa*; clorofila; sensoriamento hiperespectral

1 INTRODUÇÃO

A alface (*Lactuca sativa*) é uma das principais hortaliças folhosas produzidas no Brasil, chegando a atingir uma produção de 671.509 toneladas em 2017 (INSTITUTO BRASILEIRO

DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2017). Existem vários tipos distintos de alface que variam em formato, cor e grau de pendoamento (Zhen *et al.*, 2025).

As clorofilas são uma classe de pigmentos com capacidade de absorção de luz (Tamiaki; Kichishima, 2025), que participam ativamente do processo de fotossíntese pelo qual as plantas convertem energia luminosa em energia química, o que impacta no seu desenvolvimento. Assim, apresentam-se uma área-chave de pesquisa com grande potencial para aumentar a produtividade agrícola sustentável (Croce *et al.*, 2024).

Quantificar o teor de clorofila foliar é possível utilizando métodos tradicionais laboratoriais que são destrutíveis, onerosos e demandam grande tempo de análise (Clemente *et al.*, 2021). Como alternativa aos métodos tradicionais, tem-se os dispositivos portáteis não destrutíveis como o Minolta SPAD-502 (Donnelly *et al.*, 2020). No entanto, quando são necessárias muitas leituras, como em programas de melhoramento de alface, esse método se torna demorado e o erro aumenta devido às variações da radiação solar e da radiação fotossinteticamente ativa ao longo do dia (Padilla *et al.*, 2019).

Pesquisas vem sendo conduzidas para fenotipagem de genótipos de alface por sensores RGB e multiespectrais (Maciel *et al.*, 2020, Clemente *et al.*, 2021). No entanto, a utilização de sensores hiperspectrais ainda é incipiente. Estes sensores medem a reflectância em centenas de bandas espectrais estreitas, permitindo a detecção precisa de características fisiológicas das plantas mostrando-se interessante e com potencial para utilização (Lu *et al.*, 2020).

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi obter índices de vegetação gerados por sensor hiperspectral em cultivares de alface roxa e verde, e correlacioná-los aos índices SPAD para pré-validar uma ferramenta de fenotipagem.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na Estação Experimental de Hortaliças da Universidade Federal de Uberlândia, localizada no campus Monte Carmelo – MG (18°42'43,19" S, 47°29'55,8" O; altitude de 873 m). Foram avaliadas duas cultivares de alface sendo a cultivar comercial Pira 72 (roxa e crespa) e UFU-66#7 (verde e lisa), proveniente do Programa de Melhoramento de Alface da UFU.

A linhagens foram semeadas em abril de 2025 em bandejas de poliestireno de 200 células preenchidas com substrato comercial à base de fibra de coco. Após a semeadura, as bandejas permaneceram em uma estufa tipo arco de 5 × 6 m com pé-direito de 3,5 m, coberta com filme de 150 micra. As mudas foram transplantadas para o campo aos 35 dias após a

semeadura (DAS) em canteiros previamente preparados com rotoencanteirador. O espaçamento entre plantas adotado foi de $0,25 \times 0,25$ m. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com três repetições de 16 plantas, arranjadas em quatro linhas por canteiro.

Decorridos 50 DAS foi obtido o índice SPAD por meio do valor médio das quatro plantas centrais de cada parcela, no período de 11h00 a 11h40, utilizando o clorofilômetro modelo Minolta SPAD-502 CFL1030 (Minolta, Osaka, Japão). Simultaneamente, foi obtida a leitura de reflectância, realizada diretamente sobre a planta a uma distância de 30 cm. As leituras espectrais foram realizadas utilizando o espectrômetro Green Wave (StellarNet, Inc., Flórida, EUA) operando na faixa espectral de 350 a 1150 nm, região do azul até o infravermelho próximo, em conjunto com o software StellarPro (versão 2.2.2). A placa de Spectralon foi utilizada como referência padrão de reflectância.

A etapa de processamento foi conduzida no software Spectroscopy Pro-Tools (versão 1.2), por meio da ferramenta “Divide Spectra” que calcula a reflectância como a razão entre a radiação refletida pela amostra e a refletida pela placa de referência. Em seguida, foram calculados os índices de vegetação hiperespectrais: Transformed Chlorophyll Absorption Ratio Index (TCARI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green NDVI (GNDVI), Red Edge NDVI (RENDVI), Normalized Difference Red Edge (NDRE), Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (MCARI), Photochemical Reflectance Index (PRI) e Water Band Index (WBI). A correlação de Pearson e as análises de regressão linear foram obtidos pelo software Minitab Statistical Software (versão 21.1.0).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises de correlação (r) de Pearson entre os índices de vegetação hiperespectrais e o índice SPAD para a cultivar comercial Pira 72 (roxa) apresentaram resultados significativos ($p < 0,05$) para os índices TCARI e MCARI, com valor de r de 0,832 (Tabela 1), demonstrando haver uma relação linear forte positiva entre estas variáveis (Rumsey, 2023).

Tabela 1 – Correlações de Pearson (r) entre os índices de vegetação hiperespectrais e índice SPAD em alface roxa.

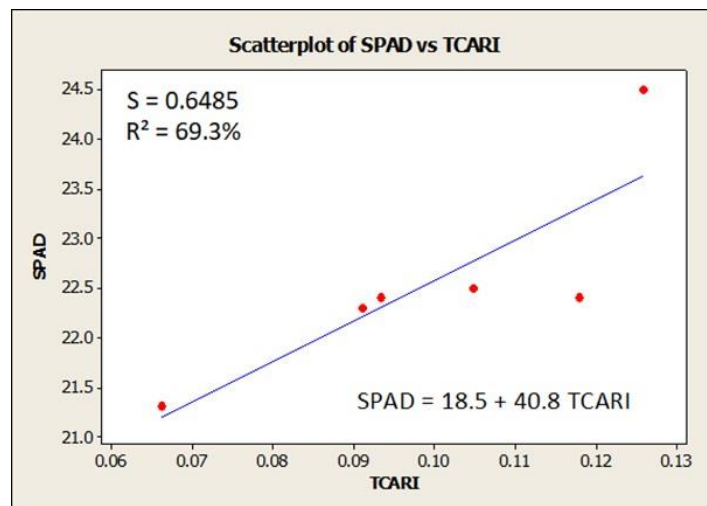
Índice de vegetação	r	p-value
TCARI	0.832	0.040
GNDVI	-0.639	0.172
RENDVI	-0.310	0.550
NDRE	-0.342	0.507
NDVI	-0.632	0.178

MCARI	0.832	0.040
PRI	-0.358	0.486
WBI	-0.339	0.511

Os índices TCARI e MCARI apresentaram os mesmos valores de correlação, indicando que estão fortemente relacionados com o teor de clorofila das folhas da planta e que possivelmente carregam informações redundantes. O índice TCARI estima o teor de clorofila com correção para fundo do solo e estrutura da planta (Haboudane *et al.*, 2002), sendo aplicados para culturas com solo exposto, enquanto o índice MCARI estima o teor de clorofila com menor influência da estrutura foliar (Nagler *et al.*, 2000), sendo utilizado em culturas densas. No entanto, ambos os índices são calculados em 550nm (banda verde), 670nm (banda vermelha) e 700nm (banda red edge), o que explica os valores apresentados.

A equação de regressão foi construída para o índice de vegetação TCARI por ser mais recomendado para culturas com solo exposto, como ocorre com a alface. A equação está apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Gráfico de dispersão (scatterplot) com regressão linear entre o índice SPAD e o índice de vegetação hiperespectral TCARI em alface roxa.

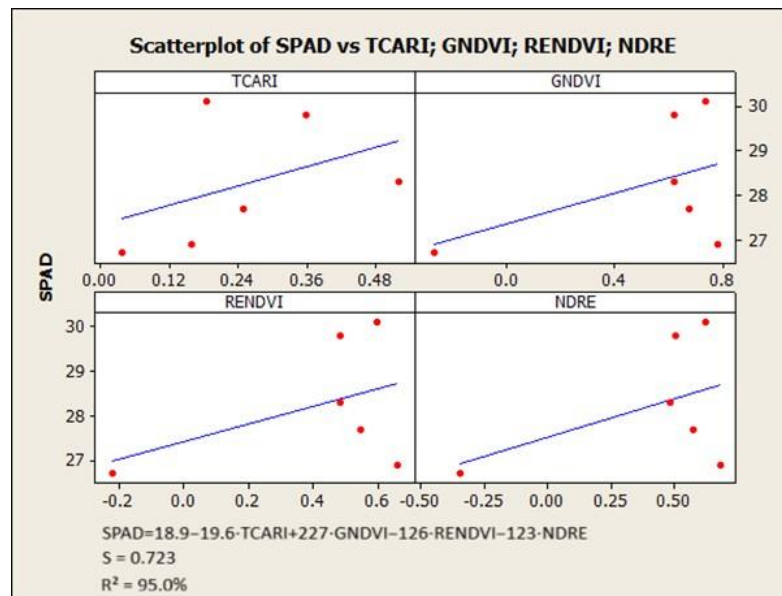


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O estudo de Haboudane *et al.* (2002), que aborda a influência de pigmentos como antocianinas e variações estruturais nas folhas sobre índices espectrais, propôs a utilização do índice TCARI como uma forma de corrigir a absorção de clorofila em reflectância, especialmente em culturas com interferência de outros pigmentos. No entanto, ainda há poucos estudos como aqui proposto, buscando validar este índice em hortaliças com antocianina.

Para a cultivar UFU-66#7 a análise da correlação de Pearson não apresentou significância nas correlações entre o índice SPAD e os índices de vegetação hiperespectrais isolados. Desta maneira, modelos de múltiplas interações foram testados e o melhor resultado está apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Gráfico de dispersão (scatterplot) com regressão múltipla entre os índices de vegetação hiperespectrais TCARI, GNDVI, RENDVI, NDRE e o índice SPAD em alface verde.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A equação de regressão para a cultivar de alface verde apresentou valor de coeficiente de determinação (R^2) de 95%, demonstrando haver uma relação linear forte positiva entre estas variáveis.

4 CONCLUSÕES

Os índices TCARI e MCARI apresentaram elevados valores de correlação, indicando estarem fortemente relacionados com o teor de clorofila das folhas, sendo o índice TCARI candidato a ser utilizado para fenotipagem em alfaces roxas.

Para a alface verde foi proposto um modelo de múltiplas interações entre os índices TCARI, GNDVI, RENDVI e NDRE e o índice SPAD.

Estudos com mais genótipos serão necessários para a validação dos índices de vegetação de destaque neste trabalho como estimadores do teor de clorofila em alface, sendo uma

importante ferramenta para a seleção de genótipos do Programa de Melhoramento Genético de Alfaca da UFU.

REFERÊNCIAS

CLEMENTE, A. A. *et al.* High-throughput phenotyping to detect anthocyanins, chlorophylls, and carotenoids in red lettuce germplasm. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 103, 2021. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102533.

CROCE, R. *et al.* Perspectives on improving photosynthesis to increase crop yield. **The Plant Cell**, v. 36, n. 10, p. 3944–3973, 2024. DOI: 10.1093/plcell/koae132.

DONNELLY, A. *et al.* Leaf chlorophyll estimates of temperate deciduous shrubs during autumn senescence using a SPAD-502 meter and calibration with extracted chlorophyll. **Annals of Forest Science**, v. 77, n. 2, p. 1–12, 2020. DOI: 10.1007/s13595-020-00940-6.

HABOUDANE, D. *et al.* Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 416-426, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE – **Produção agropecuária: alface**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/alfaca/br>. Acesso em: 31 jul. 2025.

LU, B. *et al.* Recent Advances of Hyperspectral Imaging Technology and Applications in Agriculture. **Remote Sensing**, v. 12, 2659, 2020. DOI: 10.3390/rs12162659.

MACIEL, G. M. *et al.* Image phenotyping of lettuce germplasm with genetically diverse carotenoid levels. **Bragantia**, v. 79, n. 2, p. 224–235, 2020. DOI: 10.1590/1678-4499.20190519.

NAGLER, P. L.; DAUGHTRY, C. S. T.; GOWARD, S. N. Plant litter and soil reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, n. 2, p. 229, 2000. DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00082-6.

PADILLA, F. M. *et al.* Influence of time of day on measurement with chlorophyll meters and canopy reflectance sensors of different crop N status. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 6, p. 1087–1106, 2019. DOI: 10.1007/s11119-019-09641-1.

RUMSEY, D. J. What is r value correlation? **Dummies**, 6 fev. 2023. Disponível em: <https://www.dummies.com/article/academics-the-arts/math/statistics/how-to-interpret-a-correlation-coefficient-r-169792/>. Acesso em: 31 jul. 2025.

TAMIAKI, H.; KICHISHIMA, S. Pigmentos de clorofila e seus análogos sintéticos. **Plant and Cell Physiology**, v. 66, n. 2, p. 153–167, fev. 2025. DOI: 10.1093/pcp/pcae094.

ZHEN, H. *et al.* Dissecting the genetic architecture of key agronomic traits in lettuce using a MAGIC population. **Genome Biology**, v. 26, 67, 2025. DOI: 10.1186/s13059-025-03541-6