

Estimativa do índice de área foliar da videira utilizando imagens obtidas em aeronave remotamente pilotada no Submédio do Vale São Francisco

Karine Alves dos Santos*, Ícaro Cardoso Maia**, Daniel dos Santos Costa**, Cloves Vilas Boas dos Santos***, Valéria Sandra de Oliveira Costa****, Magna Soelma Beserra de Moura***

*Engenheira Agrônoma; Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF). E-mail:

karine.alves@discente.univasf.edu.br (Autor correspondente).

**Ph.D.; Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF). E-mail: icaro.maia@univasf.edu.br;

daniel.costa@univasf.edu.br.

***Ph.D.; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Embrapa Semiárido. E-mail: cloves.vilasboas@ufpe.br;

magna.moura@embrapa.br.

****Ph.D.; Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: costavso@yahoo.com.br.

Received 10 November; accepted 19 December

Resumo

O índice de área foliar (IAF) demonstra variações concomitantes ao estágio fenológico das plantas, estabelecendo uma estreita correlação com a biomassa e a produtividade vegetal. Além disso, sua dinâmica é profundamente influenciada pelos padrões climáticos, destacando sua relevância primordial no contexto do manejo de irrigação e na promoção da eficaz utilização da água na agricultura. O objetivo do presente estudo foi estimar o IAF da videira cultivada em diferentes sistemas de condução, por meio de índice de vegetação obtido a partir de imagens capturadas por câmeras acoplada veículo aéreo não tripulado (VANT). O estudo foi conduzido em um vinhedo sob três sistemas de condução (latada, lira e espaldeira), com as cultivares BRS Magna e BRS Cora, localizado no Campo Experimental de Bebedouro, Petrolina, PE. Para isso, foram utilizadas imagens aéreas nas bandas visíveis do vermelho, verde e azul (RGB) nas quais foram aplicados modelos de estimativa do IAF com base no índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). O IAF também foi determinado em campo utilizando um ceptômetro. De acordo com os resultados obtidos, foi possível analisar o IAF na videira obtido a partir do NDVI estimado, em especial, para os modelos cujo desenvolvimento considerou cultivos de videira. O IAF determinado ao longo do período de estudo mostrou-se semelhante em relação as diferentes metodologias propostas, no entanto, foram observadas também que as estimativas do IAF em videira utilizando imagens em RGB deve ser realizada com cautela, pois podem apresentar valores superestimados que podem ter influencias no processo de tomadas de decisão em uma propriedade.

Palavras-chave: NDVI, IAF, VANT, câmera RGB.

Estimation of the Grapevine Leaf Area Index using drone images in the São Francisco Sub-Medium Valley

Abstract

The leaf area index (LAI) demonstrates variations concomitant with the phenological stage of plants, establishing a close correlation with biomass and plant productivity. Furthermore, its dynamics are profoundly influenced by climate patterns, highlighting its primary relevance in the context of irrigation management and in promoting the effective use of water in agriculture. The objective of the present study was to estimate the LAI of vines grown in different driving systems, using the vegetation index obtained from images captured by cameras attached to an unmanned aerial vehicle (UAV). The study was conducted in a vineyard under three training systems (latada, lira and espaldeira), with the cultivars BRS Magna and BRS Cora, located in the Bebedouro Experimental Field, Petrolina, PE. For this, aerial images were used in the visible bands of red, green and blue (RGB) to which LAI estimation models were applied based on the normalized difference vegetation index (NDVI). The LAI was also determined in the field using a ceptometer. According to the results obtained, it was possible to analyze the LAI in the grapevine obtained from the estimated NDVI, especially for the models whose development considered grapevine crops. The LAI determined throughout the study period was similar in relation to the different methodologies proposed, however, it was also observed that estimates of the LAI in grapevines

using RGB images must be carried out with caution, as they may present overestimated values that could have influence on the decision-making process in a property.

Keywords: NDVI, LAI, UAV, camera RGB.

1. Introdução

O Vale do São Francisco possui clima tropical e se destaca por oferecer condições peculiares para o desenvolvimento da viticultura, possibilitando safras em qualquer época do ano. A produção de uvas de mesa e para elaboração de vinhos se concentra na espécie *Vitis vinifera* L., mas também tem ocorrido avanços na produção e pesquisa para o cultivo de uvas da espécie *Vitis labrusca*, como a 'Isabel Precoce' e híbridos obtidos pelo programa de melhoramento da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), como a 'BRS Cora' e a 'BRS Magna', destinadas à elaboração de sucos (Leão, 2004).

As videiras são cultivadas em sistemas de condução que têm como principal objetivo proporcionar melhorias nas condições ambientais, aumento da produção, e melhores condições ergonômicas para os trabalhadores em campo. Para a videira, dentre os sistemas de condução utilizados, destaca-se os sistemas de latada, lira e espaldeira (Leão, 2004; Miele e Mandelli, 2014).

Os sistemas de condução utilizados na produção de uvas resultam em diferentes capacidades de aproveitamento da energia solar pelas plantas, visto que a exposição dos galhos e folhas é variada. O número, o tamanho das folhas e a arquitetura do dossel determinam a área foliar de uma planta (m^2), cuja razão com a unidade de área de solo (m^2) explorada pela cultura resulta no índice de área foliar (IAF, $m^2 m^{-2}$). O IAF varia de acordo com o estágio fenológico da planta, o qual atingindo um limite máximo, permanece em equilíbrio por determinado tempo e decresce em seguida devido à senescência das folhas velhas. Além disso, o IAF é também um parâmetro fortemente influenciado pelo clima, refletindo a sazonalidade da vegetação (Galvêncio et al., 2020), e assim muito relacionado à transpiração do dossel (Munitz et al., 2019) e às decisões que afetam o manejo de irrigação e o uso eficiente da água.

Diante da sua importância, o IAF tem sido determinado por diversos métodos diretos e indiretos. O primeiro método é o destrutivo, e na sua medição é necessário realizar a desfolha das plantas, e por isso tem sido o método referência para calibração ou avaliação de métodos indiretos. Dentre suas limitações se destaca a aplicabilidade para plantas de grande porte, visto que estas necessitam da execução de atividades em vários

dias, aumentando tempo e custos (Santos et al., 2022). Dentre os métodos indiretos destacam-se aqueles que se baseiam na interceptação da luz pelo dossel, e para isso podem ser utilizados vários equipamentos que em campo medem a transmitância da radiação no dossel vegetal (Matese e Di Gennaro, 2021).

Estudos que relacionam o IAF e a produtividade de culturas foram desenvolvidos e são aplicados em diferentes culturas agrícolas (Córcoles et al., 2013; Carvalho et al., 2018; Matese e Di Gennaro, 2021). Em viticultura, o IAF é um importante parâmetro que afeta a qualidade e o rendimento, caracterizando a troca de fluxos de energia e água entre o dossel e a atmosfera (Döring et al., 2014; Comba et al., 2018; Kang et al., 2022). Mesmo com diferentes sistemas de condução, o sensoriamento remoto tem sido uma alternativa para o mapeamento da área foliar das videiras, e com os avanços tecnológicos em veículos aéreos não tripulados (VANT's), tem sido possível mapear essas áreas com maior grau de precisão (Costa et al., 2020).

Os métodos que utilizam sensoriamento remoto para estimativa do IAF são baseados em diferenças na reflectância espectral entre a vegetação e outras superfícies e podem refletir diferentes finalidades para as quais o IAF é utilizado (Santos et al., 2022). Dentre as aplicações de sensoriamento remoto na avaliação do IAF, estão os índices espectrais de vegetação, que são variáveis radiométricas úteis para avaliar a resposta da atividade fotossintética da vegetação.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Rouse et al., 1973) é um dos parâmetros espectrais mais importante que reflete o crescimento das culturas e fornece informações sobre vários outros aspectos, como teor de clorofila, nutrientes e biomassa, e tem sido amplamente utilizado na estimativa do IAF. Segundo Gomes et al. (2021), o NDVI é utilizado na análise de características relacionadas a vitalidade das culturas agrícolas, pois o índice é um indicador sensível da quantidade e condição da vegetação. Com isso, a relação entre o IAF e o NDVI é essencial para descrever padrões de variabilidade temporal e espacial, facilitando a obtenção e a modelagem de parâmetros biofísicos das plantas (Steltzer e Welker, 2006).

A estimativa do IAF por sensoriamento remoto tem sido realizada por dados obtidos em sensores a bordo de satélites, a exemplo do estudo de Kang et al.

(2022) modelando o IAF na cultura da videira a partir de imagens de satélites. Porém, com a maior acessibilidade às aeronaves remotamente pilotadas (ARP) ou drones, a determinação do IAF também tem sido realizada utilizando imagens de câmeras acopladas nessas plataformas. Entretanto, a maioria dos drones são equipados com câmera que fotografam na região do visível, nas bandas RGB (Red-Green-Blue), e para a obtenção do NDVI se faz necessária uma camada de imagens no infravermelho próximo (NIR) além da camada vermelho (R) do espectro visível.

Existem muitos índices de vegetação desenvolvidos utilizando a faixa visível do espectro da luz com a finalidade de também representar as plantas com resultados semelhantes ao NDVI. O estudo de Costa et al. (2020) apresentou um novo índice para a faixa do visível, utilizando um algoritmo capaz de estimar valores de NDVI em câmeras RGB, o vNDVI. Este índice se mostrou preciso na estimativa dos valores de NDVI a partir de drones equipados com câmera RGB não calibradas. Ainda, Arai et al. (2016) verificaram alta correlação entre as bandas NIR e verde, apresentando uma proposta de cálculo de NDVI a partir das bandas do RGB.

Portanto, o objetivo do presente estudo foi estimar o IAF da videira destinada à elaboração de sucos, cultivada em diferentes sistemas de condução, por meio de índices de vegetação obtidos a partir de imagens aéreas no espectro visível capturadas por câmeras acopladas em aeronave remotamente pilotada (ARP) no Submédio do Vale do São Francisco.

2. Material e métodos

Área de estudo

Um experimento de campo foi realizado em uma área de videira (Figura 1) pertencente à Embrapa Semiárido, localizada no Campo Experimental de Bebedouro (9°09'S, 40°22'O, e altitude de 365,5 m), área rural do município de Petrolina-PE, durante os anos de 2017 e 2018. O clima da região, segundo a classificação climática de Koppen-Geiger, é tropical semiárido, com temperatura média de 26 °C e precipitação anual de aproximadamente 500 mm (Álvares et al., 2013).

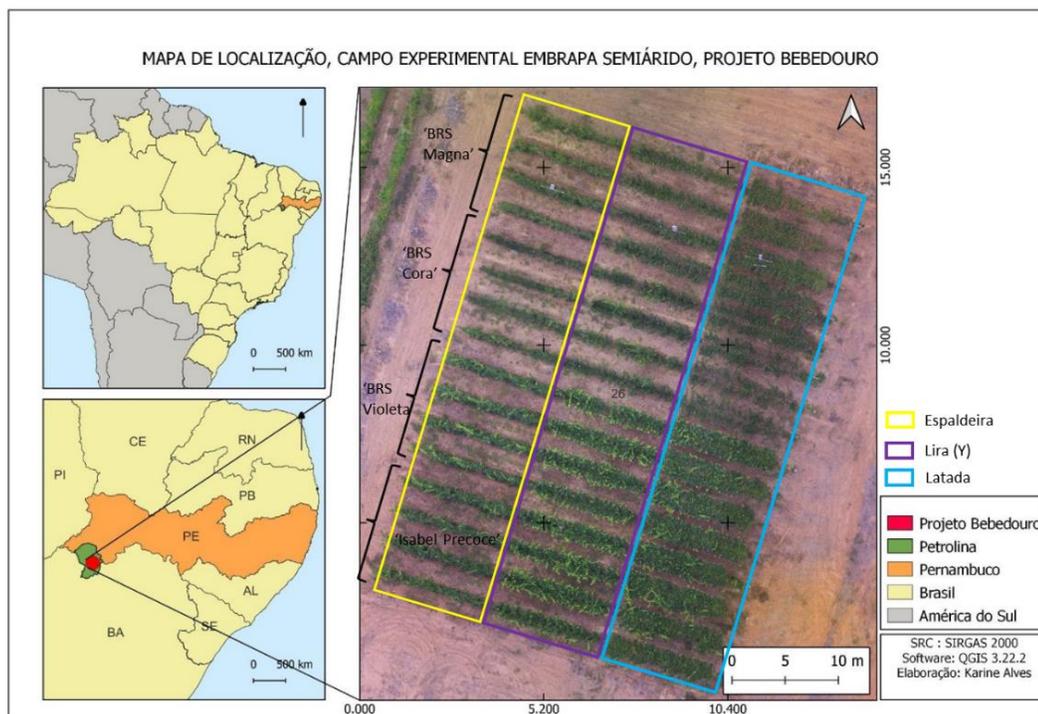


Figura 1 - Localização da área de cultivo de videira para elaboração de sucos em diferentes sistemas de condução (latada, espaladeira e lira) com diversas variedades de uvas para elaboração de sucos ('BRS Magna', 'BRS Cora', 'BRS Violeta' e 'BRS Isabel Precoce'), no Campo Experimental de Bebedouro, Petrolina, PE.

O parreiral foi implantado em 2015, assim, o presente estudo avaliou as videiras com 1,5 anos (primeiro ciclo de 2017) e 2,5 anos (primeiro ciclo de 2018). Foram plantadas as variedades copa 'BRS Magna', 'BRS Cora', 'BRS Violeta' e 'BRS Isabel', nos sistemas de condução em latada, lira (Y) e espaldeira (Figura 1), no espaçamento de 1,0 m entre plantas por 3,0 m entre linhas.

Os dados meteorológicos correspondentes aos ciclos produtivos da videira avaliados no presente estudo foram obtidos em uma estação agrometeorológica automática localizada a menos de 200 m do parreiral e, encontram-se na Figura 2, respectivamente para o ciclo produtivo do primeiro semestre de 2017 e de 2018.

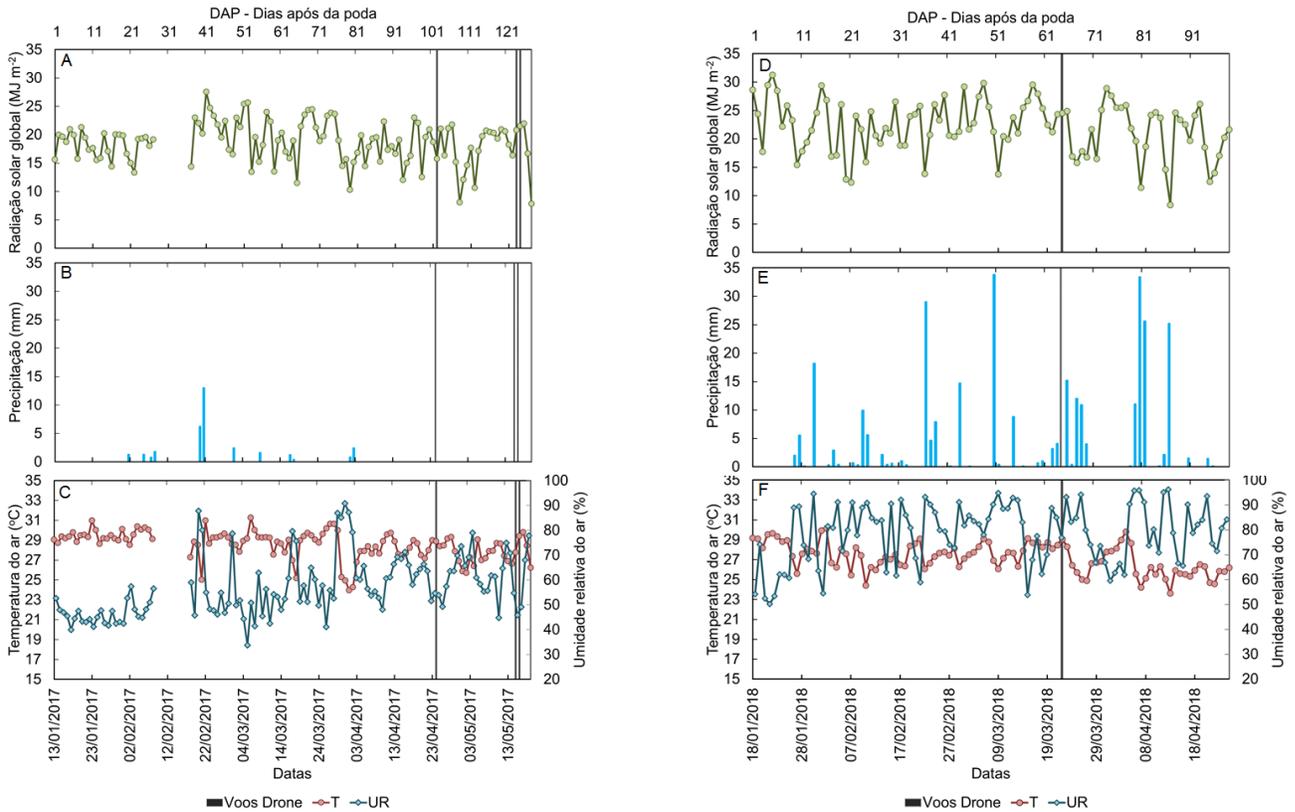


Figura 2 - Dados meteorológicos da Estação Agrometeorológica de Bebedouro, Embrapa Semiárido, para o período de produção da videira de suco no ciclo produtivo do primeiro semestre de 2017 e 2018. As linhas pretas verticais indicam as datas de voo com a aeronave remotamente pilotada (ARP) ou drone. Fonte: (Embrapa Semiárido, 2023).

Pode-se verificar que no ciclo de 2017 o desenvolvimento das videiras ocorreu sob temperatura média de 28,54 °C, oscilando entre a máxima de 37,73 °C e mínima de 17,57 °C; umidade relativa do ar média diária de 56,90%, oscilando entre a máxima de 93% e mínima de 18,92%. Neste ciclo, o total de água precipitada foi de apenas 33,08 mm, bem abaixo da média histórica da região; enquanto o total diário de radiação solar incidente correspondeu a 18,86 MJ m⁻², o que contribuiu para uma evapotranspiração de referência média diária igual a 5,54 mm. O ciclo produtivo do primeiro semestre de 2018 ocorreu sob elevada precipitação (301,80 mm), propiciando

umidade relativa do ar mais elevada em relação ao ciclo de 2017, com média de 78,50%, máxima de 97,30% e mínima de 25,94%. Apesar dos valores mais elevados de precipitação, a radiação solar média foi de 22,04 MJ m⁻², que associada as demais características meteorológicas, resultou em 4,87 mm de evapotranspiração de referência média diária.

Determinação do Índice de Área Foliar (IAF) em campo

Para a estimativa do IAF em campo foi utilizado um ceptômetro (Accupar LP-80 Decagon Devices,

Pullman, WA, USA) nos três sistemas de condução, com o seguinte protocolo: quatro medidas realizadas acima do dossel e três abaixo do dossel de cada planta. As medições com o ceptômetro ocorreram nos dias 26/04/2017 em 48 plantas, correspondendo apenas a cultivar ‘BRS Magna’, nos três sistemas de condução, latada, lira e espaldeira; em 16/05/2017 as determinações ocorreram em 96 plantas, incluindo as duas cultivares, ‘BRS Magna’ e ‘BRS Cora’, nos três sistemas de condução; e para o dia 22/03/2018 o IAF foi determinado em 16 plantas correspondente a cultivar ‘BRS Magna’ no sistema de condução em latada. As plantas monitoradas em cada data são apresentadas na Figura 3.

Aquisição e processamento das imagens aéreas com drone

O parreiral foi sobrevoado com um drone comercial DJI Phantom 3 Standard, embarcado com câmera RGB modelo, sensor 1/2.3” CMOS Effective pixels: 12 M; FOV: 94°; Abertura de 20 mm

(equivalente a 35 mm) f/2.8; captura de imagens nas bandas do vermelho, verde e azul (RGB). Os voos foram realizados a 80 m de altura, com sobreposição de 80% (lateral e frontal) e câmera posicionada com ângulo de 90°, configurada em modo manual. O imageamento aéreo ocorreu nas mesmas datas de determinação do IAF em campo: 26/04/2017; 16/05/2017 (mais um voo em 15/05/2017); e em 22/03/2018 (Figura 3).

Para produção dos ortomosaicos, necessários a modelagem do IAF com base em índices de vegetação, foi utilizado o software Agisoft Metashape® (AGISOFT, 2019), gratuito durante o período de 30 dias para novos usuários. O processamento das imagens foi realizado em qualidade elevada com as seguintes etapas: alinhamento das fotos; otimização do alinhamento; geração da nuvem de pontos; construção do modelo digital de elevação, e por fim, criação do ortomosaico (Figura 4). Posteriormente, este foi exportado para a realização das etapas de pós-processamento no QGIS versão 3.22.2 (QGIS Geographic Information System, QGIS Association).



Figura 3 - Representação da localização das plantas (1 m x 3 m) selecionadas em cada data de voo com drone sobre o parreiral em Petrolina, PE.

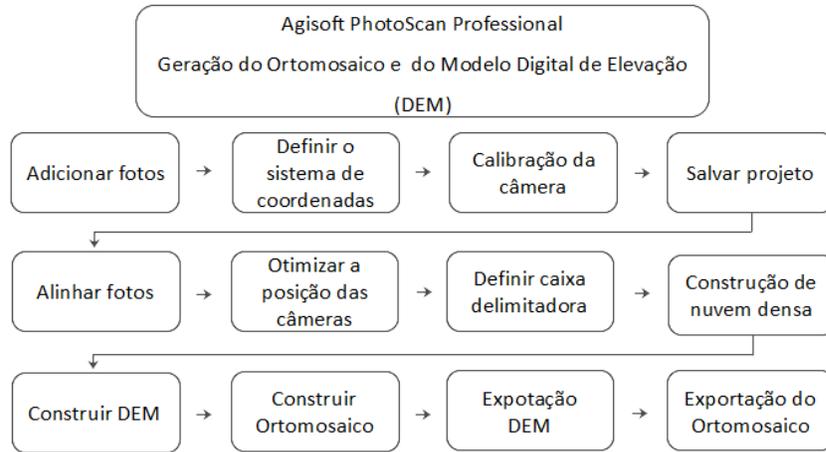


Figura 4 - Esquema de processamento de imagens RGB obtidas em drone até a geração do ortomosaico.

No QGIS, foram elaborados arquivos em formato *shape* para cada data de voo, e para cada planta cujo IAF foi determinado em campo, conforme apresentado na Figura 3. As *shapes* foram recortadas em retângulos de acordo com o espaçamento entre plantas e linhas, no tamanho de 1 m x 3 m, gerando ortomosaicos no formato de GeoTiff.

Cômputo dos índices de vegetação e modelagem do IAF

Foi utilizado um *script* desenvolvido em Python por Soares et al. (2022) para processamento dos ortomosaicos da videira. O *script* analisa cada banda espectral RGB e aplica o modelo proposto por Arai et al. (2016) para conversão da banda verde em banda na faixa do infravermelho próximo (NIR) (Equação 1):

$$NIR_{Arai} = \frac{360,6 - green}{1,1941} \quad (1)$$

Dessa forma, foi possível estimar o NDVI a partir da banda *NIR_Arai* e do Vermelho (*red*), conforme a seguir:

$$NDVI_{Arai} = \frac{NIR_{Arai} - red}{NIR_{Arai} + red} \quad (2)$$

Além disso, também foi computado o NDVI com as bandas do visível, conforme proposto por Costa et al. (2020), que foi nomeado de *vNDVI*, de acordo com a equação 3:

$$vNDVI = 0,5268 \times (red^{-0,1294} \times green^{0,3389} \times blue^{-0,3118}) \quad (3)$$

Para computo do IAF foram testados os modelos existentes na literatura propostos por Johnson (2003), Johnson et al. (2003), Miranda et al. (2020) e Machado (2014), conforme as equações de 4 a 7 (Tabela 1). A partir do cômputo dos índices, foram geradas imagens GeoTiff representativas de cada planta, cujos parâmetros estatísticos foram exportados em formato “.csv”, para a correlação com os dados de IAF obtidos em campo.

Tabela 1 - Modelos da literatura utilizados para calcular o índice de área foliar na videira.

Modelos	Autor
IAF = 4,9 * NDVI - 0,46	Jonhson (2003) (4)
IAF = 5,7 * NDVI - 0,25	Jonhson et al. (2003) (5)
IAF = 4,9 * (NDVI ²) + 0,1	Miranda et al. (2020) (6)
IAF = 0,102 * e ^{5,341*NDVI}	Machado (2014) (7)

*NDVI utilizado foi calculado com base na metodologia de Arai et al. (2016). Fonte: autora

3. Resultados e discussão

Análise das ortofotos

O parreiral de uvas destinadas a elaboração de sucos pelas variedades copa ‘BRS Magna’ e ‘BRS Cora’ (Figura 5) encontrava em diferentes estádios vegetativos durante as datas de voos. A resolução espacial das imagens mostrou um grande detalhamento nos dados que evidenciou bem uma distinção de desenvolvimento entre as oito fileiras superiores e as oito fileiras inferiores em todas as datas conforme ortomosaicos apresentados. Essas diferenças observadas podem ser características das cultivares, que podem ser mais ou menos vigorosas. Foi observado também uma diferença visual nas datas de poda entre as variedades, para ambos os ciclos produtivos avaliados. Pode-se perceber que na fileira 3 (de cima para baixo) que há pequenos pontos de coloração branca, nos três sistemas de produção, que

correspondem aos equipamentos de monitoramento microclimático instalados na área de estudo.

O solo exposto aparece em todos os ortomosaicos, tanto nas entrelinhas quanto na área que circunda o parreiral. Nesta parte externa há de se destacar na imagem de 22/03/2018, que devido a quantidade de chuva em 2018 (Figura 2E), tem várias áreas em verde nas quais se reconhecem serem plantas espontâneas. Entre as fileiras, também se verifica a existência de plantas espontâneas verdes e de material seco em decomposição, neste caso, com destaque para a imagem de 26/04/2017 na porção inferior.

A qualidade da imagem no que refere ao nível de detalhamento dos alvos foi também apontado no estudo de Gomes et al. (2021), que avaliaram uma área de videira e compararam as resoluções espaciais entre as imagens de câmeras acopladas em drone e dados obtidos por satélite.



Figura 5 - Ortofotos do parreiral de uva de sucos, em três sistemas de condução, no Campo Experimental de Bebedouro, Petrolina, PE.

Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

A Figura 6 contém os mapas de NDVI e vNDVI calculados conforme a metodologia proposta por Arai et al. (2016) e Costa et al. (2020), respectivamente, para as diferentes datas de voo realizados na videira. É possível observar que há diferenças nos valores com base nas metodologias utilizadas, pois a proposta de Arai et al. (2016) resulta em valores de NDVI mais próximo de 1

em todas as datas de voo, enquanto o vNDVI apresentou valores na faixa de 0,4 a 0,7, principalmente entre as datas 15/05 e 16/05 do ano 2017, quando a temperatura do ar (Tar) média estava em 22,93 °C com máxima de 29 °C, ao contrário das demais datas, como no dia 26/04/2017 quando a média da temperatura alcançou 28,48 °C, com máxima de 35,02 °C.

O estudo de Khaliq et al. (2019) também mostrou dados elevados de NDVI (próximo a 1) em uma área de videira, tanto em imagem de drone quanto na de satélite,

porém, o índice foi calculado a partir de dados de refletância das bandas do Red e NIR.

O estudo de Leivas et al. (2022), analisando dentre vários índices o NDVI em uma área de agricultura, verificou mapas de NDVI mais homogêneos e com valores mais elevados, indicando ser uma característica do próprio índice quando aplicado em uma área densamente vegetada. Já quando avaliado em outros contextos de uso do solo, a exemplo do estudo de Santos et al. (2022) em uma área de floresta tropical sazonalmente seca utilizando o NDVI conforme a metodologia proposta por Arai et al. (2016), observaram valores de NDVI médios que variaram entre 0,65 e 0,38 para as imagens de drone e satélite, respectivamente.

Isso demonstra que não houve saturação (altos valores) nos dados, e a aplicabilidade do método para superfícies vegetadas como a Caatinga, que apresenta copas irregulares, áreas de solo exposto ou até mesmo galhos expostos, alteram os padrões de refletância da vegetação.

Com relação aos dados de vNDVI encontrados no presente estudo, eles se assemelharam ao NDVI encontrado por Gomes et al. (2021), avaliando áreas de videira irrigada em uma região de clima mediterrâneo. Neste estudo, o NDVI variou de 0,88 na fase de crescimento da baga para 0,58 na fase de maturação dos frutos.

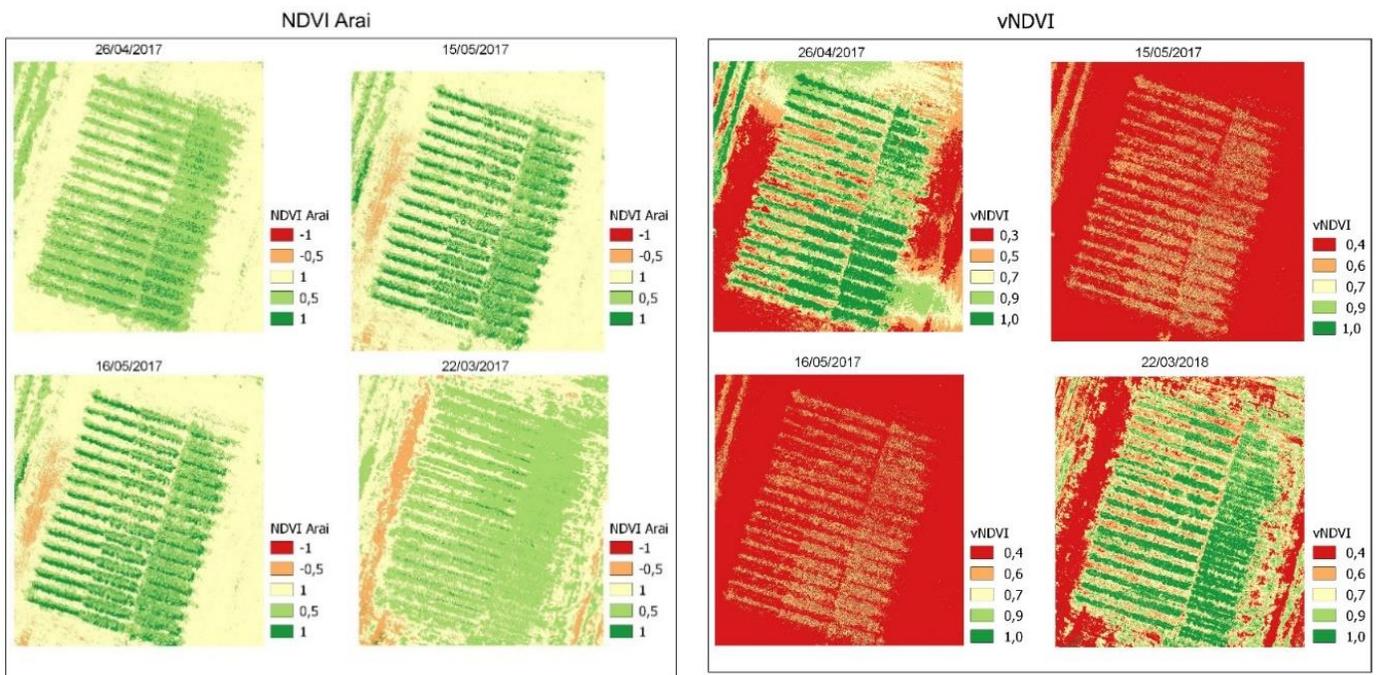


Figura 6 - Mapas de NDVI e vNDVI em cultivo de videira, calculados conforme a metodologia proposta na literatura.

Índice de Área Foliar (IAF)

A comparação das estimativas do IAF com as diferentes metodologias foi realizada utilizando-se o NDVI determinado por Arai et al. (2016), e os mapas encontram-se na Figura 7.

O IAF determinado ao longo do período de estudo mostrou-se semelhante em relação as metodologias propostas e que foram utilizadas, e visualmente destaca-

se o dia 26/04/2017, momento em que as plantas mostraram um maior vigor. Isso pode estar relacionado a outros fatores, por exemplo, manejo de irrigação e da cultura, visto que nesta data a videira se encontrava após o desponte ramos para iniciar a floração. Nas demais datas, há um destaque de coloração verde para os modelos propostos por Jonhson (2003 a, b).

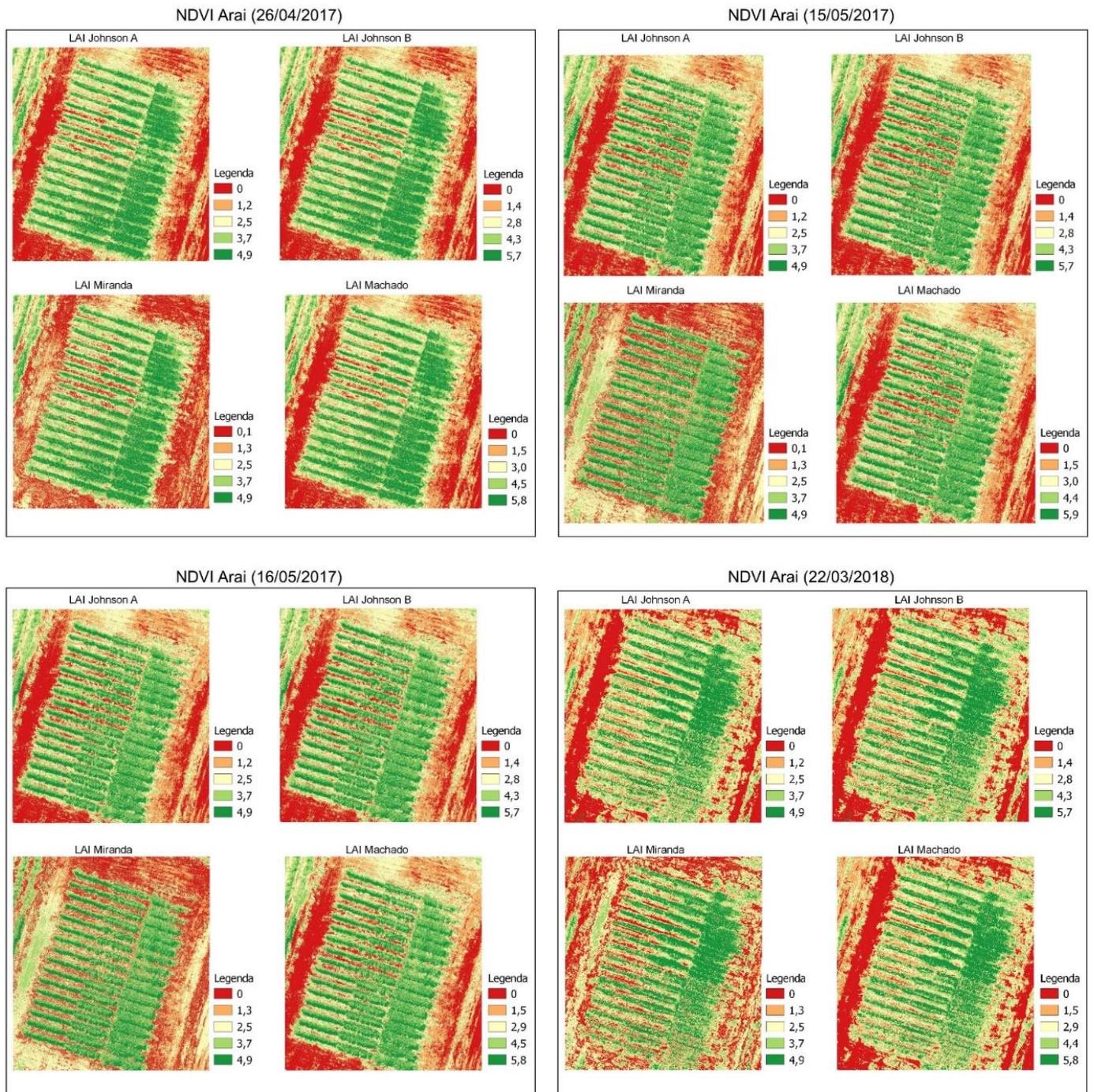


Figura 7 - Valores médios de índice de área foliar (IAF) em cultivo de videira em diferentes datas do ciclo fenológico, utilizando metodologias com base no NDVI, Petrolina, PE.

Na tabela 2 estão apresentados os valores médios e desvio padrão do IAF para cada data de voo. Percebe-se que as médias variaram entre $0,50 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $3,88 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, respectivamente quando obtidos pelo método de Machado (2014) e pelo ceptômetro em campo. Com

exceção do modelo de Machado (2014), os demais valores apresentaram pouca variação nas médias, e o baixo desvio padrão foi semelhante para todos os modelos.

Tabela 2 - Valores médios e desvio padrão do IAF da videira obtidos conforme metodologias utilizadas na literatura.

Datas	Septômetro em campo	Jonhson (2003)	Jonhson et al. (2003)	Machado (2014)	Miranda et al. (2020)
26/04/2017	3,88 ± 0,83	2,99 ± 0,20	3,63 ± 0,23	0,53 ± 0,18	2,79 ± 0,14
16/05/2017	3,17 ± 0,78	2,94 ± 0,22	3,56 ± 0,26	0,80 ± 0,20	2,88 ± 0,12
22/03/2018	2,92 ± 0,90	3,09 ± 0,13	3,75 ± 0,15	0,50 ± 0,11	2,81 ± 0,10

Quanto às correlações entre os valores médios estimados observados em campo e os obtidos por meio do IAF de Johnson et al. (2003), houve maior semelhança entre as datas 26/04/2017 e 16/05/2017, apresentando até uma redução do valor médio de IAF de maio para abril. Este fato pode ter ocorrido devido ao início da fase de florescimento da videira, onde se realizam manejos para que a planta direcione suas reservas para o florescimento e frutificação, incorrendo assim na redução do vigor vegetativo e consequentemente na redução no valor do IAF.

Além disso, o ano de 2018 teve maior precipitação em relação ao ano anterior, o que contribuiu para emergência de plantas daninhas. Como o IAF de Johnson et al. (2003) resulta da correlação entre as respostas espectrais do dossel e da área de solo explorada pela cultura, foi levantada a hipótese de que o surgimento de plantas daninhas pode ter influenciado a diferença entre os valores ao confundir o

reconhecimento remoto do que é resposta espectral das folhas da videira e das folhas das ervas daninhas, superestimando o valor de IAF. Ao mesmo tempo percebe-se que o IAF medido em campo foi menor em 2018 em relação ao ano anterior, levantando uma hipótese complementar de que a presença de plantas daninhas no mesmo espaço que a videira influenciou na redução do IAF mensurado em campo.

O IAF mensurado a partir do modelo proposto por Miranda et al. (2020) apresentou baixo desvio padrão nos dados, o que diferenciou de estudos em outras áreas, a exemplo em um contexto de floresta tropical sazonalmente seca, assim como abordado no estudo de Santos et al. (2022).

Com relação a uma avaliação a nível de planta conforme as *shapes* selecionadas na Figura 3, os resultados individuais do IAF foram agrupados para todas as datas de voo e estão apresentados conforme a Figura 8.

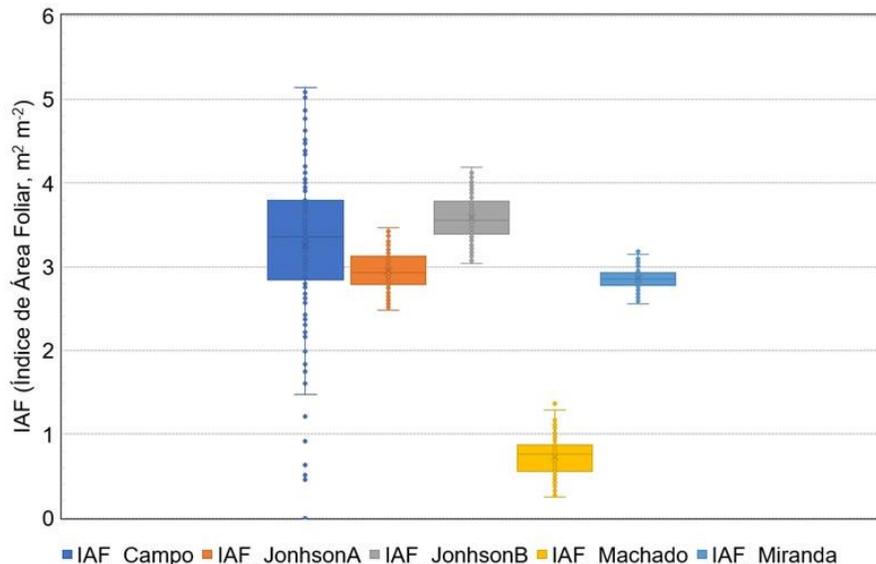


Figura 8 - Boxplot com valores de índice de área foliar (IAF) da videira considerando diferentes sistemas de condução e datas após a poda, em Petrolina, PE.

Na Figura 8, ao observar os dados IAF medidos em campo, percebe-se uma maior variação nos dados devido ao fato dos sistemas de condução da videira apresentarem diferentes formas de exposição de ramos e folhas. O sistema de condução em espaldeira, em que

as plantas são conduzidas na vertical apresenta menor IAF, principalmente quando se utiliza do método de interceptação de luz. Em segundo plano, destaca-se o sistema de condução em Y, onde as plantas têm seus ramos conduzidos de forma oblíqua. Por fim, com maior

exposição de folhas, o sistema de condução em latada, quando a planta é conduzida na horizontal, ela ocupa a maior área. Dessa forma, os valores de IAF medidos em campo apresentam maior variabilidade em torno da mediana.

A variabilidade dos dados de IAF verificada em campo com o ceptômetro também ocorreu com os dados modelados, sendo que em menor percentual. Em termos relativos, percebe-se que os valores de IAF se concentraram mais próximos a mediana nos métodos de Jonhson (2003a e b), porém mais distantes nos métodos de Miranda et al. (2020) e Machado (2014).

Os valores de IAF estimados pelos métodos de Jonhson se aproximaram mais dos valores medidos em campo, os quais variaram entre $0,56 \text{ m m}^{-2}$ e $5,14 \text{ m m}^{-2}$. Isso pode ser justificado pelo fato destes métodos terem sido propostos para a videira, mesmo em uma região fora do Brasil, com condições climáticas, variedade e manejo diferentes aos determinados na presente pesquisa. Enquanto os demais modelos foram determinados para outro tipo de vegetação em ambiente semiárido, como a Caatinga, assim como proposto no estudo de Miranda et al. (2020), no qual ao calcular em uma área de videira, os dados variaram entre $2,59 \text{ m m}^{-2}$ e $3,51 \text{ m m}^{-2}$, obtendo uma grande diferença em comparação com os dados de campo.

Estes resultados demonstram a grande capacidade no uso de drone equipado com câmera RGB em estimar parâmetros importantes para a agricultura na região do Vale do São Francisco, porém, pesquisas futuras necessitam apresentar maior detalhamento de processamento para cada sistema de condução e variedade utilizada neste estudo, inclusive, utilizando-se algoritmos de exclusão do solo e outros alvos da superfície, o que poderá promover melhores resultados.

4. Conclusões

Foi possível estimar o IAF utilizando cálculos de bandas no espectro do visível, obtendo uma precisão satisfatória.

Apesar dos dados apresentarem boa representatividade com relação a variabilidade do IAF, de acordo com os sistemas de condução da videira, é importante que sejam realizados mais estudos visando a obtenção de equações com correlações mais significativas, pois a análise de *box plot* evidenciou alta discrepância e variação entre os valores de IAF determinados em campo com aqueles estimados por meio de imagens capturadas por drone.

Há um grande desafio em estimar o IAF em videiras por meio câmera RGB acopladas em drone, indicando que a utilização dessas estimativas deve ser usada com cautela, pois podem apresentar valores sub ou superestimados.

O estudo também mostrou uma importante ferramenta de monitoramento de áreas de videira, pois os ortomosaicos gerados a partir das imagens com câmera em alta resolução acoplada no drone, apresentaram um grande detalhamento da área em função da sua resolução espacial, o que repercute em melhores resultados no que se refere a aplicação de índices espectrais para a avaliação do ciclo da videira, por exemplo para a observação das suas fenofases e para suporte ao manejo de irrigação por fornecer a fração de cobertura do solo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF) e à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) pela infraestrutura para realização da presente pesquisa. Também agradecem ao apoio concedido junto ao Projeto financiado pela Embrapa intitulado "Evapotranspiração e status hídricos de cultivos no Submédio São Francisco por imageamento aéreo com drones - ET-VANT (20.18.04.003.00.00) e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo financiamento do projeto intitulado "Vitis Habitat – Ambiente para Inovação do Arranjo Produtivo de Vinhos e Sucos" (APQ-0165-5.03/22).

Referências

- Agisoft. Agisoft metashape user manual. Professional edition, version.1.5. 2019. Disponível em: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf. Acesso em: 15 jun. 2022.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift 22, 711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Arai K., Gondoh, K., Shigetomi, O., Miura, Y., 2016. Method for NIR reflectance estimation with visible camera data based on regression for NDVI estimation and its application for insect damage detection of rice paddy fields. (IJARAI) International

- Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence 5, 17-22.
<https://doi.org/10.14569/IJARAI.2016.051103>
- Carvalho, H.F.S., Moura, M.S.B., Silva, T.G.F., 2018. Fluxos de radiação e energia em caatinga preservada e cana-de-açúcar no Semiárido. *Revista Brasileira de Meteorologia* 33, 452-458.
<https://doi.org/10.1590/0102-7786333005>
- Comba, L., Biglia, A., Aimonino, D.R., Gay, P., 2018. Unsupervised detection of vineyards by 3D point-cloud UAV photogrammetry for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 155, 84-95.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.005>
- Córcoles, J.I., Ortega, J.F., Hernández, D., Moreno, M.A., 2013. Estimation of leaf area index in onion (*Allium cepa* L.) using an unmanned aerial vehicle. *Biosystems Engineering* 115, 31-42.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.005>
- Costa, L., Nunes, L., Ampatzidis, Y., 2020. A new visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture* 172, 105334.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105334>
- Döring, J., Stoll, M., Kauer, R., Frisch, M., Tittmann, S., 2014. Indirect Estimation of Leaf Area Index in VSP-Trained Grapevines Using Plant Area Index. *American Journal of Enology and Viticulture* 65, 153-158. DOI: 10.5344/ajev.2013.13073
- Galvêncio, J.D., Mendes, S.M., Morais, Y.C.B., Miranda, R.Q., Souza, W.M., Moura, M.S.B., Santos, W., 2020. Correlação linear entre a precipitação e o Índice de Área Foliar do bioma Caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 3304-3313.
<https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3304-3314>
- Gomes, M. D. A., Román, R. M. S., Torres-Rua, A., Alves, É. S., Mckee, M., 2021. Comparação do ndvi obtido por meio de drone e satélite nas fases fenológicas da videira. *Irriga*, 26, 3, 605-619.
<https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n3p605-619>
- Johnson, L.F., 2003. Temporal stability of an NDVI-LAI relationship in a Napa Valley vineyard. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 9, 96-101.
<https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2003.tb00258.x>
- Johnson, L.F., Roczen, D.E., Youkhana, S.K., Nemani, R.R., Bosch, D.F., 2003. Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Computers and Electronics in Agriculture* 38, 33-44.
[https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00106-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00106-0)
- Kang, Y., Gao, F., Anderson, M., Kustas, W., Nieto, H., Knipper, K., Yang, U., White, W., Alfieri, J., Torres-Rua, A., Alsina, M. M., Karnieli, A., 2022. Evaluation of satellite Leaf Area Index in California vineyards for improving water use estimation. *Irrigation Science*, 40, 4-5, 531-551.
<https://doi.org/10.1007/s00271-022-00798-8>
- Leão, P.C.S., 2004. Cultivo da videira. EMBRAPA-CPATSA, Brasília. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/156149>. Acesso em: 15 jun. 2022.
- Leivas, A.F., Teixeira, A.H.C., Takemura, C.M., Garçon, E.A.M., 2022. Análise da dinâmica temporal de índices de vegetação NDVI, EVI, SAVI e IRECI através de imagens Sentinel-2a e MODIS, in: MELO, J. O. F. (Org.). *Ciências agrárias: o avanço da ciência no Brasil*. São Paulo, SP: Editora Científica Digital, pp. 332-343.
- Machado, C.C.C., 2014. Alterações na superfície do Parque Nacional do Catimbau (PE-Brasil): consolidação dos aspectos biofísicos na definição dos indicadores ambientais do bioma Caatinga. 2014. Tese (Doutorado em Geografia). UFPE, Recife.
- Matese, A.; Di Gennaro, S.F., 2021. Beyond the traditional NDVI index as a key factor to mainstream the use of UAV in precision viticulture. *Scientific Reports*, 11, 1, 2721.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-81652-3>
- Miele, A., Mandelli, F., 2014. Sistemas de condução da videira. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1060143/1/Manual3Capitulo3.pdf>. Acesso em 21 set. 2023.
- Miranda, R.Q., Nóbrega, R.L.B., Moura, M.S.B., Raghavan, S., Galvêncio, J.D., 2020. Realistic and simplified models of plant and leaf area indices for a seasonally dry tropical forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 85, 101992
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101992>
- Munitz, S., Schwartz, A., Netzer, Y., 2019. Water consumption, crop coefficient and leaf area relations of a *Vitis vinifera* cv. 'Cabernet Sauvignon' vineyard. *Agricultural Water Management* 219, 86-94.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.051>
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Earth Resources Technology Satellite - 1 Symposium*. NASA, Washington.

Santos, C.V.B., Moura, M.S.B., Carvalho, H.D.S., Galvêncio, J.D., Miranda, R.D.Q., Nishiwaki, A.A.M., Montenegro, S.M.G.L., 2022. Avaliação do índice de área foliar e índice de área da planta em floresta seca utilizando modelos simplificados em imagens de alta resolução com o uso de VANT. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* 12, 109-

123. <https://doi.org/10.29150/2237-2202.2022.254276>

Steltzer, H., Welker, J.M., 2006. Modeling the effect of photosynthetic vegetation properties on the NDVI–LAI relationship. *Ecology* 87, 2765-2772. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[2765:MTEOPV\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[2765:MTEOPV]2.0.CO;2)