



Estimativa do TVDI para avaliação das condições hídricas em áreas de produção de cana-de-açúcar no semiárido brasileiro.

Caick M. R. Martins¹, Pabrcio Marcos Oliveira Lopes², Antonio Cesar Germano Martins³.

¹Doutorando em Ciências Ambientais, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"(UNESP), departamento de Engenharia Ambiental. E-mail: caick.marcelo@gmail.com.

²Doutor em Sensoriamento Remoto, Professor pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). E-mail:pabrcio.lopes@ufpe.br

³Doutor em Engenharia Elétrica, Professor pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"(UNESP), departamento de Engenharia Ambiental. E-mail: antonio.martins@unesp.br.

Artigo recebido em 31/08/2021 e aceito em 22/06/2022

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma das culturas agrícolas mais importantes para o mercado brasileiro sendo que o monitoramento da sua demanda hídrica é fundamental para o manejo adequado, podendo-se, a partir dela, avaliar e mensurar o desenvolvimento morfofisiológico das plantas, acompanhando seu crescimento ao longo de todo o ciclo. Existem diversos parâmetros biofísicos que estimam as condições hídricas da cultura, dentre eles o *Temperature Vegetation Dryness Index*-TVDI. O objetivo deste trabalho é utilizar o TVDI para avaliar as condições hídricas em áreas de produção de cana-de-açúcar no semiárido brasileiro, por meio da relação de parâmetros biofísicos, utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. Como resultado, obteve-se o valor de 0,64 como a maior média de TVDI em 22/09/2014 e 10/08/2016, ambas com 64,0% de superfície ressecada. A menor média de TVDI foi 0,41 em 30/05/2013. O TVDI elevado está relacionado com as fases iniciais e após a colheita, períodos em que o solo está mais exposto à radiação global aumentando o ressecamento. Os menores valores de TVDI foram encontrados nas fases de desenvolvimento avançando quando a cultura apresentou grande densidade, cobrindo o solo e diminuindo o nível de ressecamento. O TVDI se mostrou um índice capaz de analisar a complexidade das condições de ressecamento da superfície condicionada às diferentes temperaturas e diferentes níveis de biomassa da cana-de-açúcar que recobrem o solo, auxiliando no manejo da irrigação, tornando-a mais efetiva e precisa.

Palavras-chave: método do triângulo, geotecnologia, irrigação, ressecamento

TVDI estimate to assess water conditions in sugarcane production areas in the Brazilian semiarid region.

ABSTRACT

Sugarcane is one of the most important agricultural crops for the Brazilian market. Monitoring its water demand is essential for proper management, and from this, it is possible to evaluate and measure the morphophysiological development of plants, following their growth throughout the cycle. There are several biophysical parameters that estimate the water conditions of the crop, including the *Temperature Vegetation Dryness Index* – TVDI. The objective of this work was used TVDI to evaluate water conditions in sugarcane production areas in Brazil semiarid through the relationship of biophysical parameters using geoprocessing and remote sensing techniques. The highest average of 0.64 TVDI was found on the dates 2014/09/22 and 2016/08/10 both with 64.0% of dry area. The lowest TVDI average, 0.41, occurred on 2013/30/05. Elevated TVDI is related to the initial stages and after harvest, periods when the soil is most exposed to high global radiation and dryness. The lowest values of TVDI were found in the advanced development stages when the crop showed high density, covering the soil and decreasing the level of dryness. TVDI proved to be able to characterize the complexity of the dryness of the surface conditioned to the different differences and levels of sugar cane biomass that covered the soil, helping in the irrigation management, leading to more effective and accurate actions.

Keyword: triangle method, geotechnology, irrigation, dryness

Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma das culturas mais importantes para o mercado brasileiro apresentando uma diversidade de produtos derivados (açúcar, álcool, rapadura, melado e alimentação animal), remontando destaque desde o período colonial. O país está entre os maiores produtores de açúcar e etanol utilizado como biocombustível, setor este que apresenta crescente demanda e conseqüente expansão da produção. A estimativa de produção do Brasil para a safra 2021/2022 é de 568,4 milhões de toneladas. Além disso, o setor sucroalcooleiro fomenta emprego e renda em várias regiões do país (Oliveira Filho et al., 2016; Miranda et al., 2019; Bezerra et al., 2020; Godoi Neto et al., 2020; Silva et al., 2021; CONAB, 2022; Gurgel et al., 2022; Kohler et al., 2022).

A alta produtividade da cultura está ligada aos fatores ambientais e ao uso de tecnologia, sobretudo a irrigação de precisão, visto que suprir a demanda hídrica é primordial para obter bons índices produtivos. Nas últimas décadas os sistemas de produção aprimoraram técnicas para produzir mais, reduzindo o volume de água aplicado, sobretudo em regiões como o semiárido brasileiro que enfrentam o problema de escassez de água (Santiago et al., 2017; Oliveira e Braga, 2019; Silva e Barbosa, 2021).

O monitoramento da demanda hídrica da cana-de-açúcar é fundamental no manejo adequado para utilizar a quantidade correta de água na irrigação e assim avaliar o desenvolvimento morfofisiológico das plantas. O monitoramento pode ser feito estimando o balanço de energia que permite a quantificação dos fluxos de radiação líquida, de calor latente, de calor sensível e de calor do solo para se determinar a evapotranspiração da cultura (ETc) (Lopes et al., 2013; Andrade Junior et al., 2017; Filgueiras et al., 2019; Avilez et al., 2020; Santos et al., 2021; Oliveira et al., 2021).

Além dos parâmetros biofísicos citados anteriormente, o Índice de Ressecamento da Vegetação por Temperatura - TVDI (*Temperature Vegetation Dryness Index*) proposto por Sandholt et al. (2002) permite o monitoramento das condições hídricas da cultura por meio da umidade do solo e da vegetação utilizando de dados de sensoriamento remoto (Yuan et al., 2020; Zhao et al., 2021).

O TVDI é calculado a partir dos coeficientes angulares e lineares gerados pela

dispersão dos valores da temperatura de superfície (Ts) e do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), variando de 0 a 1, sendo que os valores próximos de 0 indicam condições ótimas de umidade da superfície e vegetação sem estresse, além de ocorrer evapotranspiração máxima e acesso ilimitado à água. Por outro lado, os valores próximos de 1 indicam baixa disponibilidade hídrica, superfície seca e estresse hídrico severo na vegetação, afetando diretamente os processos fisiológicos, diminuindo a produtividade (Mengue et al., 2015; Souza, 2017).

Para a obtenção do TVDI é necessário somente o uso de informações provenientes de imagens digitais, por exemplo, dados de faixas de luz visível, infravermelho próximo e infravermelho térmico, que quando associadas são capazes de estimar a umidade da superfície, isso torna a utilização do índice mais atrativa e computacionalmente simples de ser calculado (Schirmbeck et al., 2019; Shashikant et al., 2021).

O comportamento da relação entre a temperatura da superfície e o NDVI está associada com a variação da transpiração e da evaporação em áreas de solo com diferentes níveis de cobertura vegetal (Sandholt et al., 2002).

A relação entre Ts e NDVI apresenta um padrão, exibindo uma dispersão característica de forma triangular ou trapezoidal, isso ocorre devido a biomassa existente e do teor de umidade do solo. Conforme a localização do alvo dentro do triângulo formado na área do gráfico é possível se mensurar a quantidade de água disponível para o desenvolvimento vegetal. (Schirmbeck, 2016).

Diversos autores como Kong e Wu (2021), Shidqi et al. (2021), Astuti et al. (2021) e Deng et al. (2021) utilizaram o TVDI em seus estudos e obtiveram resultados satisfatórios confirmando a eficácia do índice na caracterização das condições hídricas.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é utilizar o TVDI para avaliar as condições hídricas em áreas de produção de cana-de-açúcar no semiárido brasileiro por meio da relação de parâmetros biofísicos, utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado no município de Juazeiro, BA, nas áreas de cultivo de cana-de-

açúcar irrigada (Figura 1), prevalecendo a irrigação superficial (gotejamento), sendo a principal variedade cultivada a RB 92579. A região segundo classificação climática de Peel et al. (2007) apresenta clima BSh, predominando o semiárido, com precipitação média anual aproximada de 430

mm. A umidade relativa do ar média anual é de 66% e a temperatura média anual do ar é de 26,5°C (Pinheiro et al., 2015; Nemus, 2016; Sá, 2016; Lopes et al., 2017; Silva et al., 2021).

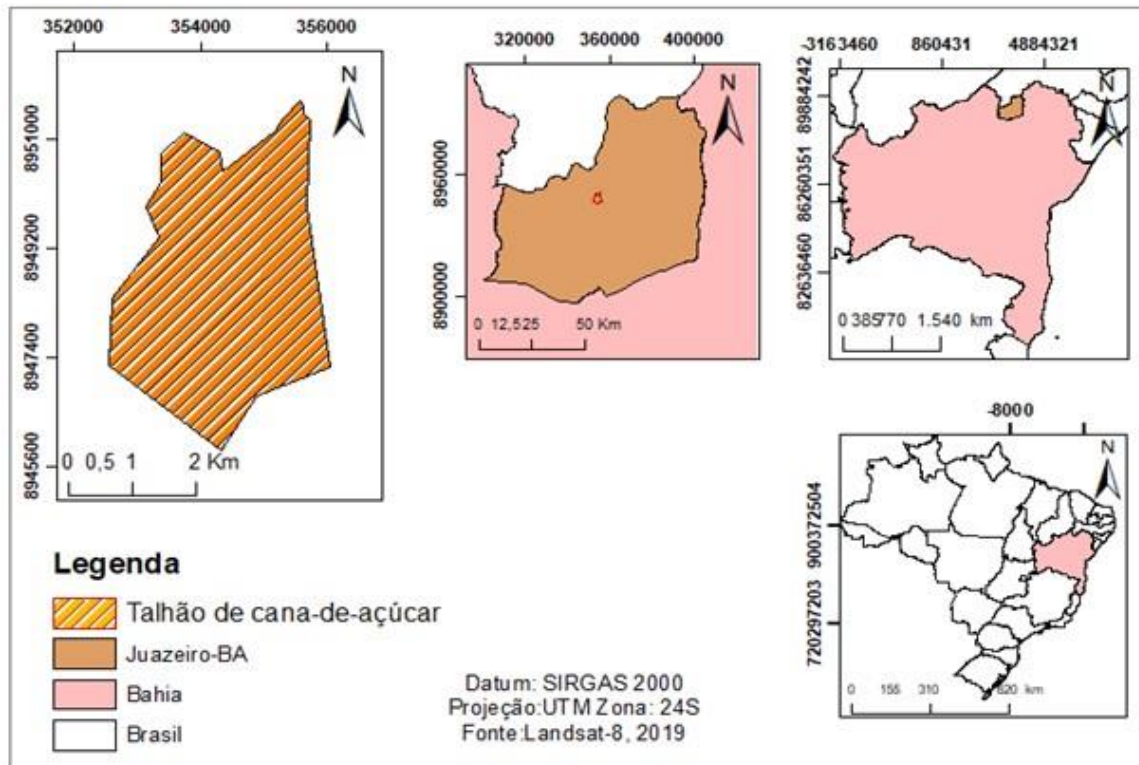


Figura 1. Localização da área de estudo

Os solos da região são classificados como planossolos solódico eutrófico, bruno não cálcico, cambissolo eutrófico, solos litólicos eutróficos e vertissolo. Quanto à topografia ocorre relevo plano e ondulado com vales abertos. A vegetação é típica da Caatinga, composta de árvores de cascas grossas, arbustos espinhentos com ramificações, plantas suculentas e herbáceas (Cruz et al., 2005; Nascimento et al., 2012).

Dados Orbitais

Aquisição de Imagens

Foram utilizadas 10 imagens do satélite Landsat-8 dos sensores *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared* (TIRS) obtidas gratuitamente na página virtual do *United States Geological Survey* (USGS), referentes aos anos de 2013 a 2016. As imagens apresentam um valor máximo de até 20% de cobertura de nuvens, em

formato Geotiff, com resolução espacial de 30 metros de órbita/ponto 217/067, projeção cartográfica UTM Zona 24N sistemas de coordenadas geodésicas e Datum WGS-84, coleção 2, nível 1.

Em seguida, as imagens Landsat-8 foram reprojatadas para a projeção cartográfica UTM Zona 24S, Datum SIRGAS-2000.

Processamento Digital de imagens

As imagens foram manipuladas no programa Qgis 2.18.11, utilizando as bandas multiespectrais: 2 a 7 e 10, com resolução espacial de 30m. Para a obtenção do produto final, o TVDI, foram executadas as etapas exibidas no fluxograma (Figura 2).

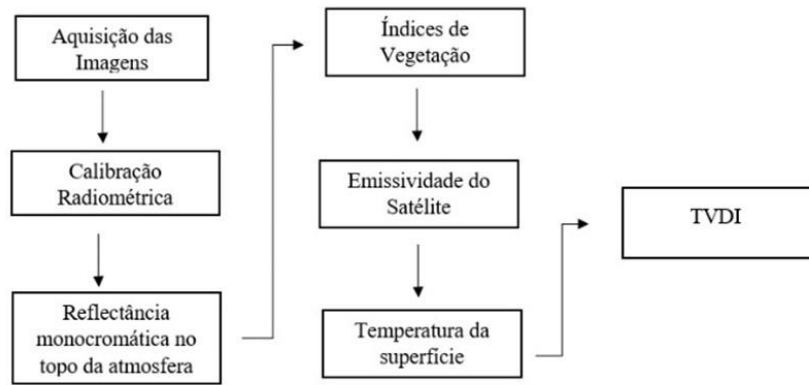


Figura 2. Fluxograma de cálculo do TVDI

Calibração Radiométrica

Nesta etapa ocorreu a transformação dos números digitais (ND) de cada pixel em radiâncias espectrais ($L_{\lambda i}$, $Wm^{-2} st^{-1}\mu m^{-1}$) que representam a energia solar refletida por cada pixel, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medida ao nível do satélite Landsat-8, dada por (https://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php). (Equação 1).

$$L_{\lambda i} = AL_i + ML_i * NDi \quad (1)$$

em que, AL_i é o fator aditivo específico de cada banda, ML_i é fator multiplicativo específico de cada banda obtido dos metadados da imagem e NDi é o número digital de cada pixel na imagem, sendo que i representa as bandas (1,2,3,4,5,6,7,10 e 11) do Landsat-8.

Reflectância monocromática no topo da atmosfera

As imagens de radiância foram transformadas em reflectância monocromática no topo da atmosfera de cada banda espectral do sensor OLI, estimada de acordo com a (Equação 2) proposta por Bastiaanssen (1995).

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi * L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} * \cos Z * dr} \quad (2)$$

em que, $k_{\lambda i}$ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($Wm^{-2} st^{-1}\mu m^{-1}$), Z é o ângulo zenital solar, dr é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e a distância Terra-Sol em dado dia do ano (Tasumi, 2003), conforme (Equação 3):

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(DJ \frac{2\pi}{365} \right) \quad (3)$$

em que, DJ é o dia Juliano das imagens de satélite.

A correção atmosférica foi aplicada nas imagens de reflectância do Landsat-8 utilizando o modelo *DARK OBJECT SUBTRACTION-DOS1*, com objetivo de atenuar o espalhamento provocado pelos aerossóis da atmosfera.

Índices de Vegetação (NDVI, SAVI e IAF)

O NDVI é um indicador sensível da quantidade e condição da vegetação que varia em função do tipo de cobertura vegetal e de acordo com a atividade fotossintética e densidade de plantas (Giongo, 2008) sendo definida conforme (Equação 4) (Allen et al., 2002;):

$$NDVI = \frac{\rho 5 - \rho 4}{\rho 5 + \rho 4} \quad (4)$$

em que, $\rho 5$ é reflectância da banda do infravermelho próximo e $\rho 4$ reflectância da banda do vermelho.

O Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI) proposto por Huete (1988) considera os efeitos do solo exposto nas imagens analisadas, tendo como objetivo amenizar os efeitos do impacto da umidade do solo. O SAVI é calculado pela (Equação 5).

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho 4 - \rho 5)}{(L + \rho 4 + \rho 5)} \quad (5)$$

em que, L é constante denominada de fator de ajuste do índice, podendo assumir valores de 0,25 a 1,0 dependendo da cobertura do solo, sendo 0,25 para vegetação densa e 1,0 para vegetação com baixa densidade. Para esta pesquisa utilizou-se 0,1 conforme Allen et al. (2007) e Silva et al. (2011).

O Índice de Área Foliar (IAF) ($m^2 \cdot m^{-2}$) (Equação 6) é utilizado como indicador da biomassa de cada pixel da imagem, utilizado como medida de crescimento de plantas em modelos agrônômicos, expresso por (Allen et al., 2007):

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (6)$$

Emissividade

A emissividade de cada pixel (ϵ_{NB}) (Equação 7) foi estimada, considerando valores de NDVI > 0 e de IAF < 3, por (Allen et al., 2002):

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 \cdot IAF \quad (7)$$

Além disso, para valores de pixel de $IAF \geq 3$, considera-se $\epsilon_{NB} = 0,98$ e para corpos hídricos ($NDVI < 0$) $\epsilon_{NB} = 0,99$.

Temperatura da superfície.

A temperatura da superfície terrestre (T_s) (Equação 8) foi estimada por:

$$T_s = \frac{K_2}{\left(\frac{\epsilon_{NB} \cdot K_1}{L_{\lambda_i}} + 1\right)} \quad (8)$$

em que, K_1 e K_2 são constantes obtidas nos metadados da banda 10 expressos em: $Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ e L_{λ_i} é a radiância da banda termal 10 do sensor TIRS.

Índice de Ressecamento da Vegetação por Temperatura -TVDI

O TVDI foi obtido conforme (Equação 9) Sandholt et al. (2002):

$$TVDI = \frac{T_s - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (9)$$

em que, T_{max} e T_{min} são as temperaturas máxima e mínima da superfície, estimadas conforme (Equações 10 e 11):

Limite seco
 $T_{max} = a + b(NDVI) \quad (10)$

Limite úmido
 $T_{max} = a + b(NDVI) \quad (11)$

em que, "a" e "b" são os coeficientes linear e angular da reta, que representam os limites do triângulo (borda seca e borda úmida) formado pela relação de dispersão: NDVI x Temperatura da Superfície conforme o modelo representado graficamente (Figura 3).

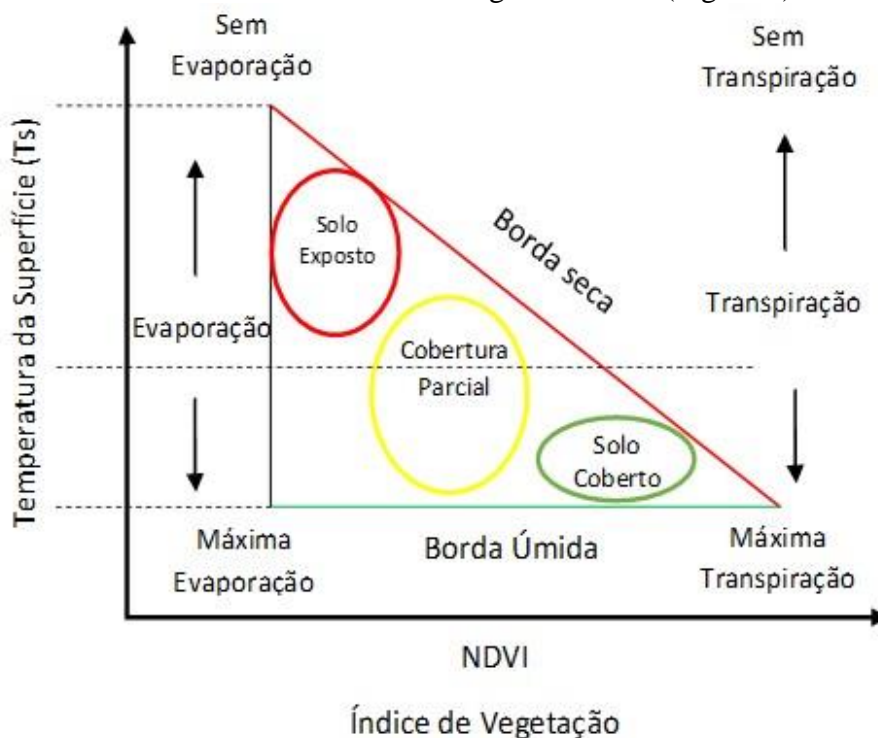


Figura 3. Modelo Triângulo Evaporativo do espaço NDVI-Temperatura da Superfície. Fonte: Adaptado de Sandholt et al. (2002).

Resultados e discussão

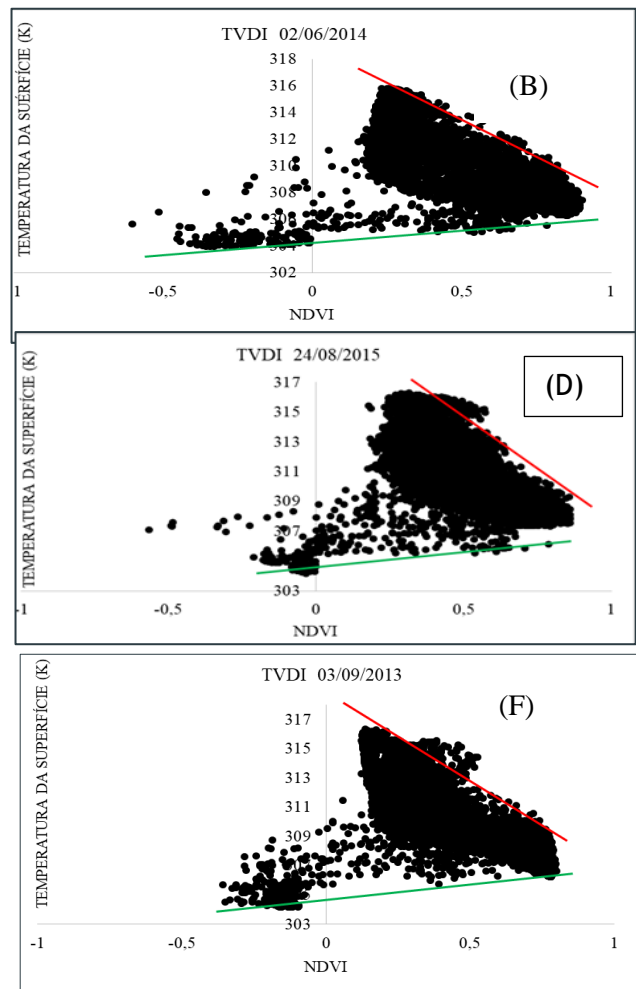
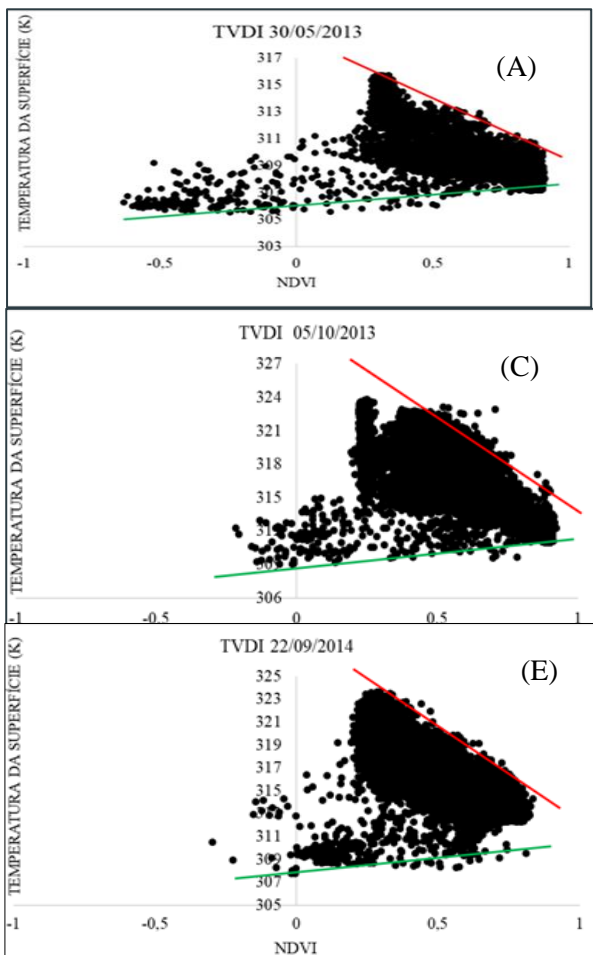
O TVDI é um parâmetro biofísico baseado na relação do NDVI e da temperatura da superfície que avalia o estresse da vegetação e as condições de umidade da superfície. Todas as datas analisadas obedeceram ao padrão de representação gráfica em forma de triângulo ou trapézio (Figuras de 4A - 4J).

Tomando como referência o resultado exibido nos gráficos (Figura 4) foi possível analisar a situação hídrica da área estudada, verificando um descolamento das distribuições de pontos para direita, onde apresentam maior concentração, indicando um NDVI alto em função do avançado estágio fenológico pert

o da maturação. A cana-de-açúcar está em seu nível de atividade fotossintética elevada, comportamento evidenciado em todos as Figuras de 4A- 4J, corroborando com Holidi et al.(2019) e Santos et al. (2021). Os gráficos com distribuições

menos concentradas (Figuras 4A – 4D) indicam uma maior variabilidade de condições hídricas na área, geralmente talhões em diferentes fases fenológicas. Dispostos à esquerda dos gráficos existem valores negativos de NDVI e menores valores de temperatura indicam a presença de água na região, algo que está de acordo com o local de estudo que conta com um reservatório usado na irrigação.

Os pontos mais próximos da borda seca do triângulo (parte superior – linha vermelha do gráfico) estão associados a um (D) vel de ressecamento da cobertura do solo, indicando, dentre outros processos, no desenvolvimento do sistema radicular da planta com um solo muito seco. No entanto, a irrigação eleva a umidade da superfície beneficiando a expansão das raízes, fato este mencionado. por Schirmbeck (2016).



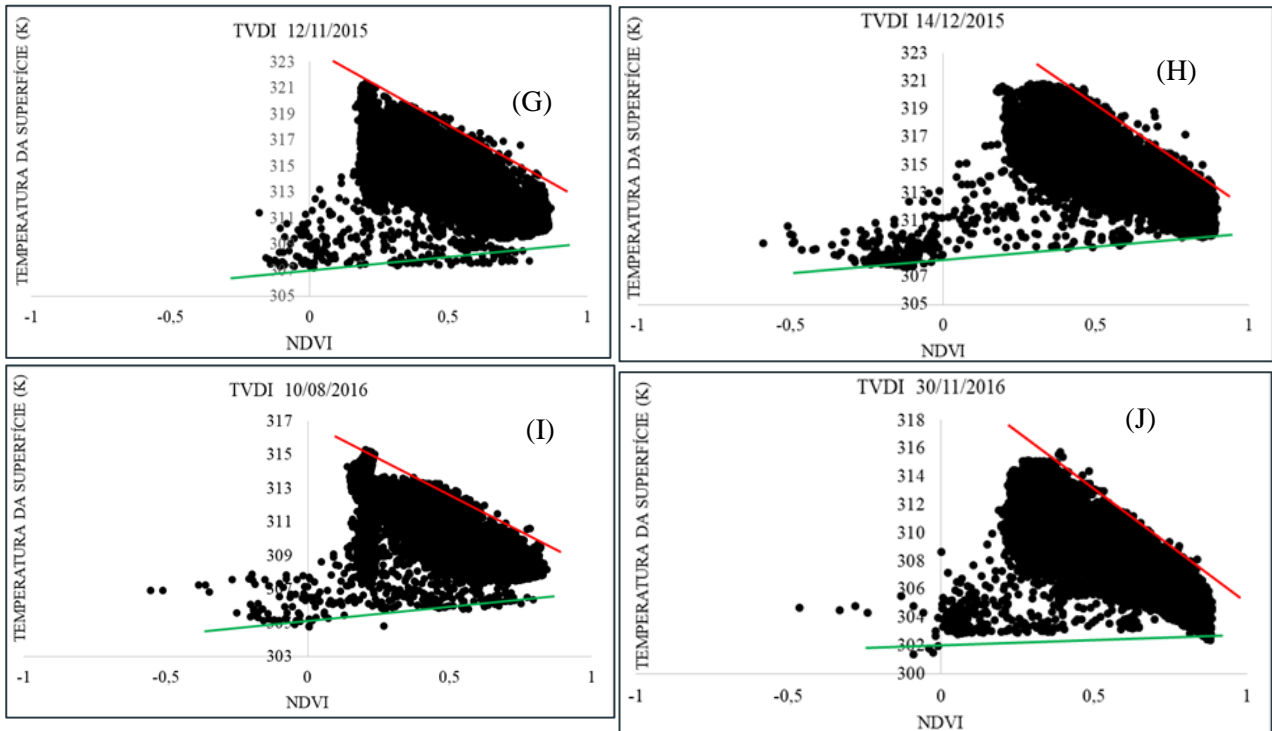


Figura 4. Triângulo Evaporativo TVDI x Ts (2013-2016)

Considerando os mapas (Figuras 5A - 5J) a coloração marrom-escuro indica TVDI elevado, com alta taxa de ressecamento, destacando-se a

Figura 5E na data 22/09/2014 nos talhões da região norte.

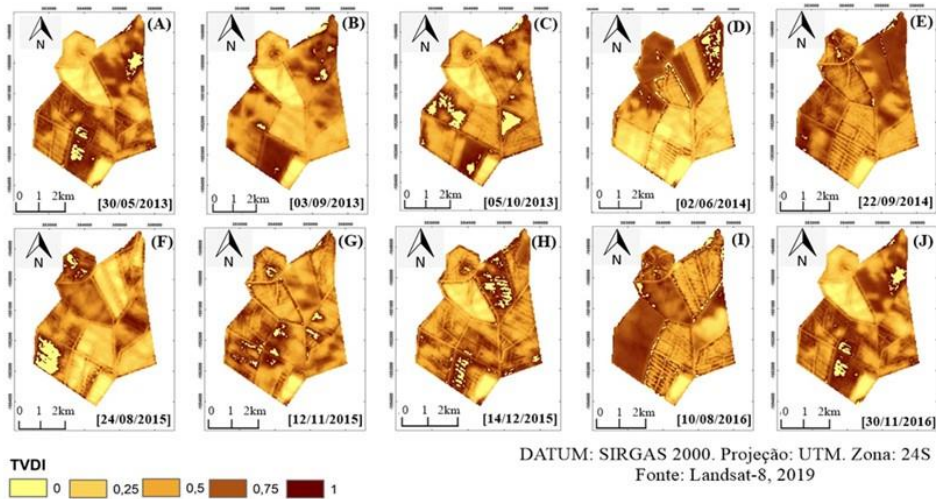


Figura 5. TVDI em área de produção de cana-de-açúcar. Juazeiro, BA. (2013-2016)

Conforme pode ser observado da Tabela 1, a maior média de TVDI foi 0,64 ocorrida em 22/09/2014 (Figura 5E) e 10/08/2016 (Figura 5I), ambas com 64,0% de ressecamento na média dos pixels. Nestas mesmas datas os gráficos da Figura 4E e 4I, respectivamente, apresentam maiores concentrações de pontos próximos à borda quente, confirmando assim a presença de uma elevada taxa de ressecamento mesmo apresentando temperaturas médias diferentes (Tabela 1).

A coloração marrom-claro indica áreas com menor taxa de ressecamento, sendo observadas nas Figuras 5D em talões da região sul

e nas Figuras 5A, 5B, 5C, 5H e 5J em talhões da região noroeste da área analisada.

A menor média de TVDI foi de 0,41 e ocorreu na data 30/05/2013 (Tabela 1) com 41,0% de ressecamento. No mapa correspondente a essa data (Figura 5A) foram exibidos valores baixos e uniformes de ressecamento, mostrando talhões menos ressecados. No gráfico da Figura 4A, também correspondente a essa data, foi observada uma maior presença de pontos próximos da borda úmida (parte inferior – linha verde do gráfico), sendo este um comportamento de áreas que não sofrem ressecamento severo.

Tabela 1. Parâmetros biofísicos em área de produção de cana de açúcar Juazeiro, BA (2013-2016).

DATA	NDVI (média)	Ts (°C) (média)	TVDI (média)
03/09/2013	0,39	37,43	0,54
05/10/2013	0,57	43,1	0,55
30/05/2013	0,67	36,07	0,41
02/06/2014	0,55	36,38	0,46
22/09/2014	0,48	43,41	0,64
12/11/2015	0,48	40,68	0,62
14/12/2015	0,56	41,54	0,59
24/08/2015	0,50	37,44	0,50
10/08/2016	0,46	37,20	0,64
30/11/2016	0,48	42,21	0,59

em que: Ts é a Temperatura da superfície.

Os maiores valores de TVDI foram encontrados em épocas com menor período de ocorrência de precipitação pluvial na região (maio a outubro), mostrando a grande relação do índice com o regime de chuvas, mesmo a área sendo irrigada. Isso corrobora com Souza (2017), Rahimzadeh-Bajgirani et al. (2012), Souza et al. (2019) e Shashikant et al. (2021) que identificaram a relação entre baixos valores totais de chuva e altos valores de TVDI, mostrando uma forte dependência do índice com o regime de chuvas.

Os maiores valores do índice de ressecamento foram encontrados em áreas com menores densidades de cobertura vegetal e com baixo valor de NDVI, corroborando com Ryu et al. (2021) e Schirmbeck (2016), mencionando que existe relação da redução da umidade com o aumento da temperatura superficial e a redução do índice de vegetação.

O TVDI elevado está relacionado com as fases iniciais do ciclo e após a colheita da cana-de-açúcar, períodos em que o solo está mais exposto à radiação global, causando o aumento no nível de

ressecamento. Os menores valores de TVDI foram encontrados nas fases de desenvolvimento avançando, quando cultura apresentou grande densidade, recobrando o solo corroborando assim com Schirmbeck et al. (2022) que identificaram comportamento semelhante em seu estudo.

Em função do solo apresentar menor cobertura vegetal, maior temperatura e NDVI próximos de zero, nos gráficos houve o aumento da concentração de pontos próximos a região superior dos triângulos. Dessa maneira, pode-se relatar a existência de relação de proporcionalidade do solo exposto, NDVI baixo e altas temperaturas em todas as datas analisadas.

O TVDI elevado é exibido em resposta ao aumento da temperatura da superfície e do estresse hídrico vegetal, em que as plantas diminuem a transpiração, ocasionando a queda no vigor, assim diminuindo o valor do NDVI, fatos estes que também foram observados nos estudos de Nagel e Terra (2019) e Freitas (2021).

Conclusão

O TVDI se mostrou um índice capaz de analisar a complexidade das condições de ressecamento da superfície condicionada às diferentes temperaturas e diferentes níveis de biomassa da cana-de-açúcar que recobrem o solo, auxiliando no manejo da irrigação, tornando-a mais efetiva e precisa.

Para fins de uma análise mais detalhada indica-se a aplicação do método do triângulo para cada talhão específico conforme a idade de plantio, dessa forma as necessidades hídricas de cada talhão se tornariam mais facilmente identificadas, otimizando a irrigação.

Agradecimentos

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE); Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEA). Aos autores. À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) agência financiadora da pesquisa.

Referências

- Allen, R. G.; Tasumi, M.; Morse, A.; Trezza, R.; Wright, J. L.; Bastiaanssen, W.; Robison, C. W.. 2007. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133, 395-406.
- Allen, R. G; Tasumi, M.; Trezza, R. 2002. Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL). *Advanced training and Users Manual. Idaho implementation*, 1, 97p.
- Andrade Junior, A. S.; Noletto, D. H.; Bastos, E. A.; Moura, M. S. B.; Anjos, J. C. R. 2017. Demanda hídrica da cana-de-açúcar, por balanço de energia, na microrregião de Teresina, Piauí. *Agrometeoros* 25, 217-226.
- Astuti, K.S.; Ridwan, I.; Sudarningsih, S. 2021. Analisis Tingkat Kekeringan Lahan Gambut di Kalimantan Selatan Berdasarkan Data Citra Landsat 8 OLI/TIRS. *Jurnal Fisika Flux*, 18, 119-132. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.20527/flux.v18i2.9480>. Acesso em: 05 abr. 2022.
- Avilez, A. M. A.; Hernandez, F. B. T.; Galvão, I. M.; Teixeira, A. H. C. 2020. Determinação dos coeficientes de cultivo e a evapotranspiração real da cana-de-açúcar com o uso do modelo SAFER.. *Agrometeoros*, 28, 1-8. Disponível: DOI:

DOI:<http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v28.e026831>. Acesso em: 13 mar. 2021.

- Bastiaanssen, W. G. M. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Tese (Doutorado). Wageningen, Waeningem Agricultural University.
- Bezerra, A.L; Silva, J.L.B.; Silva, D.A.O.; Batista, P.H.D.; Pinheiro, L.C.; Lopes, P.M.O; Moura, G. B.A. 2020. Monitoramento Espaço-Temporal da Detecção de Mudanças em Vegetação de Caatinga por Sensoriamento Remoto no Semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 286-301. Disponível: DOI: 10.26848/rbgf.v13.1.p286-301. Acesso em: 13 jan. 2021.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO -CONAB. Preços de etanol e açúcar apresentam alta no mercado em março. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4573-precos-de-etanol-e-acucar-apresentam-alta-no-mercado-em-marco>. Acesso em: 04 abr. 2022.
- Cruz, F. N.; Borba, G. L.; Abreu, L. R. D. 2005. Ciências da natureza e realidade: interdisciplinar – Natal, RN: EDUFRN Editora da UFRN. 348p.
- Deng, H.; Cheng, F.; Wang, J.; Wang, C. 2021. Monitoring of Drought in Central Yunnan, China Based on TVDI Model. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30, 3511-3523. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/130952>. Acesso em: 02 abr. 2022.
- Filgueiras, R., Mantovani, E. C., Althoff, D., Venancio, L. P., Cunha, F.F. 2019. Condição de áreas irrigadas baseadas no espaço TS-NDVI e TVDI. *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR*, Santos-SP.
- Freitas, V.V.. 2021. Avaliação do TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) como índice para estimar estresse hídrico na região Nordeste do Brasil (2014-2020). Monografia (Graduação). Fortaleza, Universidade Federal do Ceará.
- Giongo, P. R. 2008. Estimativa do balanço de radiação com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície. Dissertação (Mestrado). Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco.
- Godoi Neto, A.H.; Silva, E.F.F; Morais, J. E.F; Andrade, L.G.L.; Cutrim, W.O.; Lacerda, C.F.

2020. Water potential, biochemical indicators and yield of sugarcane irrigated with brackish water and leaching. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 24, 312-318. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v24n5p312-318>. Acesso em: 23 mai. 2021.
- Gurgel, A.M.; Souto, A De S.; Guedes, C. A.; Pereira, J. A. Dos S.; Bezerra, V. C. R. 2022. Espelho sem reflexos: conflitos e vulnerabilidades socioambientais em uma região produtora de cana-de-açúcar. *Ciencia e Saúde Coletiva* 27, 1049-1060. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-81232022273.27502020>. Acesso em: 06 abr. 2021.
- Holidi, H.; Armanto, M.E.; Damiri, N.; Putranto, D.D.A. Characteristics of Selected Peatland uses and Soil Moisture Based on TVDI. 2019. *Journal of Ecological Engineering* 20, 194–200. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/102987>. Acesso em: 06 abr. 2021.
- Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.
- Kohler, T.H.. Mascarenhas, L.S.; Lemões, L.S.; Härter, A.; Cerqueira, V.S.; Silva, S. D. A..2022. Substratos a base de compostos orgânicos destinados à produção de mudas de cana-de-açúcar via minoletes. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente-RAMA*, 15, 1-16. Disponível DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2022v15n2e9295>. Acesso em: 03 abr. 2021.
- Kong, H.; Wu, D.. Changes of soil moisture during apple growth based on TVDI index. 2021, *Bangladesh Journal of Botany*, 50, 955-961. Disponível DOI: <https://doi.org/10.3329/bjb.v50i0.56450>. Acesso em: 03 abr. 2021.
- Lopes, I.; Cerqueira Júnior, E. P.; Melo, J. M. M.; Leal, B. G. 2017. Potencial de geração de energia eólica no submédio São Francisco. *Journal of Environmenta Analysis and Progress* 2, 330-340. Disponível DOI: <https://doi.org/10.24221/jeap.2.3.2017.1407.330-340>. Acesso em: 05 set. 2020.
- Lopes, P.M.O.; Valeriano, D.M.; Silva, B.B.; Moura, G.B.A.; Silva, A.O. 2013. Simulação do saldo de radiação na Serra da Mantiqueira, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17, 780-789. Disponível:DOI:<https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000700013>. Acesso em: 21 jan. 2022.
- Mengue, V. P.; Fontana D.B.; Schirmbeck, J.; Schirmbeck, L.W.; Nobrega, M.R.; Costa, L.F.A.. 2015. Índice TVDI para mapeamento das culturas de arroz irrigado e soja em áreas agrícolas de Pelotas e Camaquã/RS. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB*.
- Miranda, C.G. Picoli, M. C. A., Rampazo, N. A. M., Duft, D. G., Machado, P. G., Evaristo de Jesus, K. R.,Perez Filho, A. 2019. Análise do uso e expansão da cana-de-açúcar na bacia hidrográfica do rio Santo Anastácio utilizando a abordagem de "Landscape Design" *Revista Brasileira de Geografia Física* 12, 252-267. Disponível DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.1.p252-267>. . Acesso em: 10 mai. 2020
- Nagel, G. W.; Terra, F.S. 2019. Avaliação do índice de seca TVDI utilizando diferentes índices de vegetação para a estimativa da umidade do solo. In: *Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu*.
- Nascimento, E. F. Do N.; Pereira, F. A. C.; Netto, A. De O. A.; Campeche, L. F. S. M; Santos, C. A. 2012. Comportamento físico-hídrico dos solos do perímetro irrigado Curaçá em Juazeiro/BA. *Irriga* 17, 435-47.
- NEMUS - Gestão e Requalificação Ambiental, Ltda. 2016. Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco. *Caderno de Investimentos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco* 2016-2025. 248p.
- Oliveira Filho, F. X.; Miranda, N.O.; Medeiros, J.F.; Silva, P.C.M; Mesquita, F.O.; Costa, T. K.G. 2016. Compactação de solo cultivado com cana-de-açúcar em Baía Formosa, Rio Grande do Norte. *Revista Ceres* 63, 715-723. Disponível DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201663050017>. Acesso em: 10 ago. 2020
- Oliveira, A.R. Braga, M.B. 2019. Variedades de cana-de-açúcar submetidas a diferentes lâminas de reposição hídrica por gotejamento subsuperficial. *Energia na Agricultura* 32, 350-366. Disponível DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2019v34n3p350-363>. Acesso em: 10 ago. 2020

- Oliveira, D. A. de .; Hernandez, F. B. T. .; Bispo, R. C. .; Gomes, R. N. .; Teixeira, A. H. de C..2021. Estimativa da demanda de água da cultura da cana-de-açúcar irrigada utilizando sensoriamento remoto. *Irriga*. [1.] 1, 678-686. Disponível: DOI:<http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2021v1n4p678-686>. Acesso em: 01 abr. 2022.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L. ; T.A. McMahon, T. A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 11, 1633–1644.
- Pinheiro, M. P. M.; A; Cruz, R. L.; Simões, W. L. 2015. Comportamento do Teor de Água num Solo Cultivado com Cana-de-Açúcar Irrigada com Diferentes Lâminas. *Revista Brasileira de Energias Renováveis* 4, 30-42. Disponível DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v4i3.40544>. Acesso em: 13 dez. 2019
- Rahimzadeh-Bajgiran, P.; Omasa, K.; Shimizu, Y. 2012. Comparative evaluation of the Vegetation Dryness Index (VDI), the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) and the improved TVDI (iTVDI) for water stress detection in semi-arid regions of Iran. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sensor* 68, 1-12.
- Ryu, S.; Kwon, Y.-J.; Kim, G.; Hong, S. Temperature Vegetation Dryness Index-Based Soil Moisture Retrieval Algorithm Developed for Geo-KOMPSAT-2A. 2021. *Remote sensing* 13, 1-22. Disponível DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13152990>. Acesso em: 04 abr. 2022.
- Sá, P. C.C. 2016. Estimativa do saldo de radiação em cultivo irrigado de cana-de-açúcar utilizando dados de sensoriamento remoto orbital. Dissertação (Mestrado). Mossoró, Universidade Federal Rural do Semi-árido.
- Sandholt, I., Rasmusen, K., Andersen, J. 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment* 79, 213-224.
- Santiago, A. D.; Chico, D.; Andrade Junior, A. S. ; Garrido, A.; Carnaúba, P. J. P. Pegada hídrica da cana-de-açúcar e etanol produzidos no estado de Alagoas, Brasil. 2017. *Agrometeoros* 25, 209-216.
- Santos, J. M. dos.; Lopes, P. M. O. .; Moura, G. B. de A. .; Silva, A. S. da; Silva, J. L. B. D. .; Oliveira Júnior, J. G. de. 2021. Análise de canais irrigados com parâmetros biofísicos por sensoriamento remoto no Nordeste brasileiro. *Irriga*, 26, 638–663. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n3p638-663>, Acesso em: 20 jan. 2022.
- Schirmbeck, L. W. 2016. Padrão espaço temporal do TVDI em área de cultivo de soja. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Schirmbeck, L. W., Fontana, D. C., Schirmbeck, J., Dalmago, G. A., Fernandes, J. M. C. 2022. Monitoramento hídrico de lavoura de soja com uso do TVDI obtido de sensores radiométricos de superfície. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 57, 1-11. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02581>. Acesso em: 05 abr. 2022.
- Schirmbeck, L.W.; Fontana, D.C.; Schirmbeck, J.; Bremm, C. 2019. TVDI Obtido de Imagens OLI/TIRS e MODIS. *Revista Brasileira de Meteorologia* 34, 573-583. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-7786344070>. Acesso em: 05 set. 2020.
- Shashikant, V.; Mohamed Shariff, A.R.; Wayayok, A.; Kamal, M.R.; Lee, Y.P.; Takeuchi, W. 2021. Utilizing TVDI and NDWI to Classify Severity of Agricultural Drought in Chuping, Malaysia. *Agronomy* 11, 1-18. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11061243> Acesso em: 06 abr. 2022
- Shidqi, F.; Hayati, N.; Bioresita, F.2021. Identifikasi Daerah Kekeringan dengan Menggunakan Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) dan Landsat 8. 2021, 10, 1-6. Disponível: DOI: 10.12962/j23373539.v10i1.61122. Acesso em: 07 abr. 2022
- Silva, A. S. D.; Costa, M. A. D.; Moura, G. B. D. A.; Lopes, P. M. O.; Guimarães, M. J. M.; Gomes, A. W. A. 2021. Agrometeorological-spectral model for estimating sugarcane productivity in brazilian semi-arid.. *Irriga*, 26, 490–506. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n3p490-506>. Acesso em: 27 jun. 2022.
- Silva, T. G. F. ; Moura, M. S. B. De, Zolnier; Soares, José M; Souza, L.S. B. De, e Brandão, E. O. 2011. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 15, 139-147. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000200005>. Acesso em: 13 dez. 2019.

- Silva; W. T.C. de.; Barbosa; H.A. 2021. Avaliação da precipitação na produtividade agrícola da cana-de-açúcar: estudo de caso usina Coruripe para as safras de 2000/2005. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 1352-1366. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1352-1366>. Acesso em: 20 31 jul. 2021.
- Souza, J. C. 2017. Metodologia para avaliação ambiental em bacias hidrográficas, utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. Tese (Doutorado). Sorocaba, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"- UNESP.
- Souza, J. C., Lopes, E. R., Sousa, J. A., Padovanni, N., Lourenço, R. 2019. Dinâmica espacial e sazonal da temperatura, umidade e estresse hídrico em diferentes tipos de cobertura vegetal. *Revista do Departamento de Geografia* 37, 80-94. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v37i0.144716>. Acesso em: 03 abr. 2021.
- Tasumi, M. 2003. Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. Dissertação (Mestrado). Moscou. University of Idaho.
- USGS. – United States Geological Survey. EarthExplorer – Disponível https://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php Acesso em: 20 jan. 2018.
- Yuan, L.; Li, L.; Zhang, T.; Chen, L.; Zhao, J.; Hu, S.; Cheng, L.; Liu, W. 2020. Soil Moisture Estimation for the Chinese Loess Plateau Using MODIS-derived ATI and TVDI. *Remote Sensing* 12, 1-35. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12183040>. Acesso em: 04 abr. 2022.
- Zhao, Huichao; Li, Yi; Chen, Xinguo; Wang, Haoran; Yao, Ning; Liu Fenggui. 2021 Monitoring monthly soil moisture conditions in China with temperature vegetation dryness indexes based on an enhanced vegetation index and normalized difference vegetation index. *Theoretical and Applied Climatology* 143, 159-176. Disponível: DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03422-x> Acesso em: 04 abr. 2022.