

Desarrollo de un nuevo indicador del estado hídrico de las plantas basado en el espectro foliar

Development of a novel plant water status indicator based on leaf spectrum

P. Berríos*, A. Pérez-Pastor

Departamento de Ingeniería Agronómica. Universidad Politécnica de Cartagena. P^o Alfonso XIII, 48, 30203, Cartagena, Murcia, España.

*pablo.berrios@edu.upct.es

Resumen

El potencial hídrico de tallo es el indicador más comúnmente utilizado para evaluar el estado hídrico de las plantas debido a su elevada sensibilidad a la demanda climática y al régimen de riego, a pesar de su baja escala espacial y temporal. El objetivo de nuestro trabajo fue evaluar otros indicadores, como la firma espectral a nivel foliar emitida por mandarinos adultos sometidos a distintas intensidades de estrés hídrico, que nos permitan estimar el estado hídrico del cultivo a una mayor escala. La emisión de radiaciones de longitud de onda de 1000 nm, y el rango entre 1540-1740 nm (SWIR) permitieron diferenciar los niveles de estrés de manera significativa. A través de la combinación de distintas longitudes de onda y estructuras de índice identificamos un nuevo indicador altamente sensible al estado hídrico, denominado Índice de Relación Infrarrojo Visible (VIRI), muy bien correlacionado con el potencial hídrico de tallo. Este índice podría ser un complemento válido para la programación del riego a una escala mayor de parcela

Palabras clave: teledetección; estrés hídrico; firma espectral.

Abstract

Stem water potential is the most used indicator to assess plant water status due to its high sensitivity to climatic demand and irrigation regime, despite its low spatial and temporal scale. The aim of our work was to evaluate other indicators, such as the leaf-scale spectrum emitted by adult mandarin trees subjected to different water stress intensities, which allow us to estimate the plant water status at a larger scale. The emission of radiation at a wavelength of 1000 nm, and the range between 1540-1740 nm (SWIR) allowed us to differentiate the levels of stress in a significant way. Through the combination of different wavelengths and index structures we identified a new indicator highly sensitive to water status, called Visible Infrared Ratio Index (VIRI), which correlates very well with stem water potential. This index could be a valid complement for irrigation scheduling at a larger plot scale.

Keywords: remote sensing; water stress; spectrum.

1. INTRODUCTION

Existen diversos indicadores del estado hídrico de las plantas útiles para la programación del riego, entre ellos, el más ampliamente estudiado y validado en cultivos leñosos es el potencial hídrico del tallo, puesto que al ser una medida a nivel de planta, presenta alta sensibilidad al régimen de riego y a las condiciones ambientales (1,2). Sin embargo, es una medida de baja escala espacial y temporal, dado que existe un acotado período para las evaluaciones y no permite

alcanzar la representatividad necesaria para determinar el estado hídrico de grandes superficies. Asimismo, requiere personal técnico cualificado lo que limita su practicidad.

El avance tecnológico de las últimas décadas ha permitido el desarrollo de sensores capaces de medir la firma espectral de los objetos, abriendo una ventana de posibilidades para poder caracterizar de forma remota y a una mayor escala temporal y espacial los cultivos agrícolas. Existen diversas utilidades de la teledetección en la agricultura y en nuestro caso, el objetivo de esta investigación fue evaluar la sensibilidad de la firma espectral a nivel foliar de mandarinos sometidos a distintas intensidades de estrés hídrico y explorar nuevos indicadores que permitan estimar el estado hídrico del cultivo a mayor escala.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en una finca comercial de mandarinos adultos (*Citrus reticulata* Blanco) cv. Clemenvilla durante dos ciclos consecutivos. La plantación se estableció en 2000, a un marco de plantación de 6 x 4 m y es regado mediante un sistema de riego localizado, a través de una línea de goteros por hilera de árboles y 4 goteros por árbol de 4 L h⁻¹ de caudal. Los árboles fueron sometidos a tres intensidades de estrés hídrico a partir del potencial hídrico de tallo a mediodía solar (Ψ_s): i) sin estrés, $\Psi_s > -0,9$ MPa; ii) estrés moderado, $-0,9 \geq \Psi_s \geq -1,3$ MPa y iii) estrés severo, $-1,3 > \Psi_s \geq -1,8$ MPa (3-6). El estrés hídrico se realizó mediante la supresión total del riego durante el crecimiento del fruto. El diseño experimental consistió en 3 repeticiones por tratamiento (nivel de estrés hídrico), formado por 3 filas de 5 árboles cada una por repetición, sirviendo la fila central de árboles testigo, y actuando de bordes las dos externas.

Para determinar la firma espectral a nivel foliar, se utilizó un espectroradiómetro portátil modelo FieldSpec® 3 con una sonda de contacto y su propia fuente de luz (ASD Inc., USA) que permitió analizar un rango espectral entre 350 y 2500 nm. Las mediciones se realizaron a mediodía solar en 20 hojas maduras expuestas al sol del tercio superior medio de cada árbol de cada repetición, y cada medición correspondió a la media de diez lecturas del sensor. El espectroradiómetro genera automáticamente la curva de reflectancia cada 1 nm, pero debido a que generalmente las longitudes de onda cercanas están altamente correlacionadas se filtraron los datos cada 10 nm para evitar información redundante (7).

Se realizó un ANDEVA al 5% de significancia para cada longitud de onda de las firmas espectrales de cada intensidad de estrés. Para explorar nuevos índices a partir de bandas hiperespectrales estrechas, y para optimizar el ajuste en la estimación del Ψ_s mediante regresión lineal, se utilizó el método λ -por- λ para determinar la combinación de bandas que permite el mejor ajuste como R^2 con la variable respuesta (7,8). El método λ -por- λ y la exploración de los modelos de regresión lineal se realizaron con el módulo "Statistical functions (scipy.stats)" de Python 3.9.7 (9).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La firma espectral a nivel foliar fue sensible al estrés hídrico severo en una gran parte de las longitudes de onda estudiadas. Las hojas sometidas a estrés hídrico presentaron una mayor reflectancia que las de árboles sin limitaciones hídricas y esta diferencia se incrementó a medida que el déficit hídrico fue mayor. En el caso de los árboles con estrés hídrico moderado, la reflectancia fue significativamente mayor en la región del infrarrojo cercano (NIR) (excepto 930-990 nm), y en el rango de 1530 a 1780 nm de la región SWIR. La longitud de onda de 1000 nm, y el rango entre 1540 y 1740 nm (SWIR) presentaron diferencias significativas simultáneamente para las tres intensidades de estrés hídrico (Fig. 1).

La metodología λ -por- λ permitió combinaciones de longitudes de ondas y la inclusión de bandas estrechas como constantes para optimizar diferentes estructuras de índices y determinar su ajuste en la predicción del Ψ_s . Aunque las combinaciones lineales mostraron un ajuste significativo, R^2 fue relativamente bajo para la predicción. Cuando se incorporaron a la estructura

del índice las longitudes de onda sensibles al déficit hídrico del apartado anterior fue posible incrementar el ajuste del modelo (Tabla 1). En este sentido, el nuevo Índice de Relación Infrarrojo Visible (VIRI) propuesto por la combinación de las bandas estrechas descritas en la Ec. 1, nos permitió estimar significativamente el Ψ_s según la Ec. 2:

$$\text{VIRI} = (R_{370}/R_{680})/(R_{1000} \cdot R_{1640}) \quad (1)$$

$$\hat{\Psi}_s \text{ (MPa)} = -2,97 + 0,5183 \cdot \text{VIRI} \quad (R^2 = 0,37^{***}) \quad (2)$$

Además, el índice propuesto presentó una elevada sensibilidad al déficit hídrico, siendo muy similar a la del potencial hídrico de tallo y el contenido volumétrico de agua en el suelo (datos no mostrados).

4. CONCLUSIONES

Las longitudes de onda en la región del infrarrojo de onda corta (SWIR) entre 1540 y 1740 nm permitieron diferenciar los diferentes grados de estrés hídrico a los que fueron sometidos los árboles. Por lo tanto, estos resultados pueden considerarse como una base inicial para determinar el estado hídrico de mandarinos adultos sometidos a varias intensidades de estrés mediante teledetección.

El nuevo indicador del estado hídrico, denominado Índice de Relación Infrarroja Visible (VIRI), mostró una elevada sensibilidad al estrés hídrico y permitió estimar significativamente el potencial hídrico de tallo, por lo que este índice podría ser un complemento válido para la programación del riego a una escala mayor de parcela.

5. AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por la Comisión Europea (Proyecto DIVERFARMING, H2020-RUR-06-2016) y la Agencia Nacional de Investigación de España (PID2019-106226RB-C22).

6. REFERENCIAS

1. Shackel KA, Ahmadi H, Biasi W, Buchner R, Goldhamer D, Gurusinghe S, et al. Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTechnology*. 1997;7(1):23-9.
2. Naor A. Midday stem water potential as a plant water stress indicator for irrigation scheduling in fruit trees. *Acta Hort*. 2000;537:447-54.
3. González-Altozano P, Castel JR. Effects of Regulated Deficit Irrigation on "Clementina de Nules" citrus trees growth, yield and fruit quality. *Acta Hort*. 2000;537:749-58.
4. Conesa MR, García-Salinas MD, de la Rosa JM, Fernández-Trujillo JP, Domingo R, Pérez-Pastor A. Effects of deficit irrigation applied during fruit growth period of late mandarin trees on harvest quality, cold storage and subsequent shelf-life. *Sci Hort* (Amsterdam) [Internet]. 2014 Jan 22 [cited 2019 Apr 18];165:344-51. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423813006031>
5. Ballester C, Castel J, El-Mageed TAA, Castel JR, Intrigliolo DS. Long-term response of 'Clementina de Nules' citrus trees to summer regulated deficit irrigation. *Agric Water Manag*. 2014 May;138:78-84.
6. Pagán E, Robles JM, Temnani A, Berríos P, Botía P, Pérez-Pastor A. Effects of water deficit and salinity stress on late mandarin trees. *Sci Total Environ*. 2022 Jan;803:150109.
7. Thenkabail PS, Lyon J, Huete A. Advances in Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation and Agricultural Croplands. In: Prasad S, Thenkabail, John G, Lyon, Alfredo Huete, editors. *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation* [Internet]. Second. CRC Press; 2016 [cited 2021 Sep 23]. p. 39-74. Available from: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781439845387/chapters/10.1201/b11222-8>
8. Yu K, Gnyp ML, Gao L, Miao Y, Chen X, Bareth G. Estimate leaf chlorophyll of rice using reflectance indices and partial least squares. *Photogramm Fernerkundung, Geoinf*. 2015 Feb;45-54.
9. Python Core Team. Python: A dynamic, open source programming language [Internet]. Python Software Foundation; 2015. Available from: <https://www.python.org/>

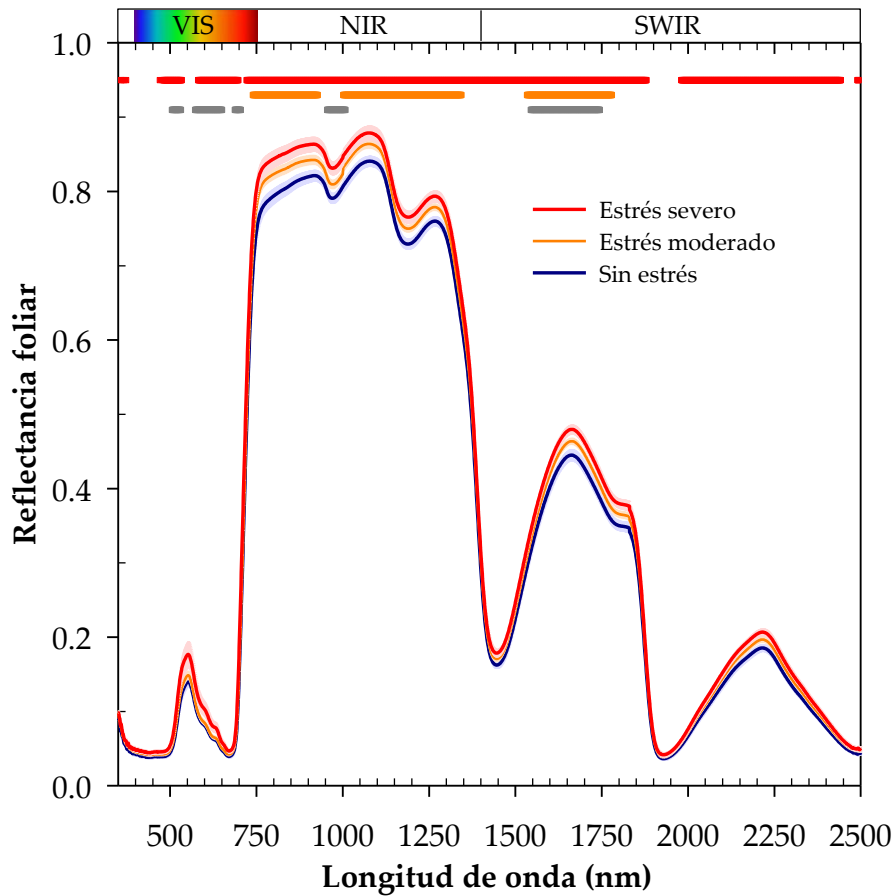


Figura 1. Firma espectral de hojas de mandarinos adultos sometidos a estrés hídrico severo, moderado y sin estrés hídrico. Medias±error estándar, $n=3$. Las líneas horizontales superiores roja, anaranjada y gris indican diferencias significativas entre la intensidad del estrés hídrico para cada longitud de onda: severo y sin estrés, moderado y sin estrés y moderado y severo, respectivamente; según ANDEVA ($p<0,05$). VIS: espectro visible; NIR: infrarrojo cercano y SWIR: infrarrojo de onda corta.

Tabla 1. Mejores combinaciones de longitudes de onda obtenidas mediante el método λ -por- λ entre 350-2500 nm para estimar el potencial hídrico de tallo mediante modelo de regresión lineal ($Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon$).

Estructura de índice X	Longitud de onda (nm)		β_0	β_1	R^2	Significancia
	i	j				
$R_i - R_j$	1510	2460	2,54	18,22	0,3079	$p<0,001$
R_i/R_j	1020	1030	-311,1	307,82	0,2783	$p<0,001$
$(R_i - R_j)/(R_i + R_j)$	1020	1030	3,35	620,20	0,2783	$p<0,001$
$(R_i - R_j)^2/R_{1640}$	1520	2460	-2,03	3123,2	0,3133	$p<0,001$
$(R_i - R_j)^2/R_{1000}$	2390	2450	-2,29	26113,3	0,2585	$p<0,001$
$(R_i/R_j)/(R_{1000} \cdot R_{1640})$	370	680	-2,97	0,5183	0,3706	$p<0,001$

El índice destacado en negrita corresponde al de mayor ajuste.