

B-06-2023

Comunicación científico-técnica

Monitorización del Estado Hídrico de Almendros mediante el Uso de Termografía Infrarroja

Infrared Thermography for Assessment of Plant Water Status in Almond Trees

Blaya-Ros, P.I.¹, Moreno Hernández G.¹, Torres-Sánchez, R.¹, Blanco, V.², Domingo, R.¹

1 Universidad Politécnica de Cartagena. pedro.blaya@upct.es; gmorenohdez6@gmail.com; roque.torres@upct.es; rafael.domingo@upct.es.

2 Department of Horticulture, Washington State University, Pullman, WA, United States. victor.blanco@wsu.edu.

Resumen: En este trabajo se estudió el empleo de imágenes térmicas obtenidas con una cámara de bajo coste para monitorizar el estado hídrico de almendros (*Prunus dulcis* (Mill.) D. A. Webb) sometidos a distinto nivel de estrés hídrico durante 2022. Se establecieron tres tratamientos: i) tratamiento control, CTL, regado para asegurar condiciones no limitantes de agua en el suelo, ii) riego deficitario sostenido, RDS, regado al 65 % de CTL, y iii) riego deficitario severo, RD_{ss}, regado al 50 % de CTL en las fases II+III – dos periodos de supresión del riego (25 – 45 días) separados por una semana de recuperación durante la fase IV – y riego completo (100 % de CTL) durante el resto de la campaña de riegos. Dos semanas antes de la cosecha (220 - 234 DDA), el riego fue restringido en todos los tratamientos con el objetivo de homogenizar la recolección mecanizada. Los tratamientos RDS y RD_{ss} supusieron reducciones del 34 y 59 % en el suministro de agua respecto a CTL, respectivamente. Los árboles CTL mostraron valores propios de árboles sin limitaciones hídricas, a excepción del periodo previo a la recolección; mientras que en los deficitarios cayeron los valores de Ψ_{tallo} , como consecuencia de la disminución de las reservas hídricas del suelo. El estrés hídrico promovió el cierre estomático hasta obtener valores de conductancia estomática foliar de 41 mmol m⁻² s⁻¹ y, por lo tanto, un aumento significativo de T_c y de los índices térmicos derivados, ΔT y CWSI, debido a una menor tasa transpirativa. De esta manera, el tratamiento más severo, RD_{ss}, mostró valores de T_c de 5,9 °C superiores a los árboles de CTL. Los índices térmicos minimizaron la influencia del clima y fueron más adecuados que T_c para monitorizar el estado hídrico de almendros bajo déficit hídrico, obteniendo coeficientes de determinación (R²) con Ψ_{tallo} de 0,73 y 0,83 para ΔT y CWSI, respectivamente. **Palabras clave:** indicadores de estrés hídrico; temperatura del dosel vegetal; potencial hídrico de tallo; crop water stress index; conductancia estomática

Abstract: This work investigates the use of low-cost thermographic imaging to monitor the water status of almond trees (*Prunus dulcis* (Mill.) D. A. Webb) subjected to different levels of water stress during 2022. Three irrigation treatments were established: (i) control treatment, CTL, irrigated to ensure non-limiting soil water conditions, (ii) sustained deficit irrigation, RDS, irrigated at 65% of CTL, and (iii) severe stress deficit irrigation, RD_{ss}, irrigated at 50% of CTL during Phase II+III – two cycles of water withholding (25 y 45 days) separated by recovery period (1 week) during Phase IV – and full irrigation (100 % CTL) during Phase V. Two weeks before harvest (DOY 220 - 234), irrigation was withdrawn in all treatments to homogenize the mechanical harvest. The RDS and RD_{ss} treatments resulted in water savings of 34 and 59%, respectively, compared to the CTL treatment. The CTL trees showed values characteristic of trees without water limitation, except for the pre-harvest drought period. However, in the deficit treatments, the decrease in soil water stock caused a decline in Ψ_{tallo} values. Water stress promoted stomatal closure to stomatal conductance values of 41 mmol m⁻² s⁻¹ and, therefore, a significant increase in T_c values and the derived thermal indices, ΔT and CWSI, due to a lower transpiration rate. Thus, the severe deficit treatment, RD_{ss}, showed T_c values of 5.9 °C higher than the CTL trees. The thermal indices reduced the influence of climatic conditions and were more useful than T_c for determining the almond water status under water deficit, obtaining coefficients of determination (R^2) with Ψ_{tallo} of 0.73 and 0.83 for ΔT and CWSI, respectively.

Keywords: water stress indicators; stomatal conductance; stem water potential; canopy temperature; crop water stress index

1. Introducción

El conocimiento del comportamiento hídrico del árbol es esencial para comprender la respuesta de los cultivos ante periodos de déficit hídrico, especialmente en zonas semiáridas y áridas donde el agua es el principal recurso limitante en la agricultura. De modo que para realizar un manejo óptimo de los insumos en la agricultura es necesario disponer de información complementaria procedente de indicadores del estado hídrico de la planta y/o suelo. Tradicionalmente el potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) se han establecido como indicadores referentes para evaluar el estado hídrico de los cultivos, proporcionando información crucial para realizar un manejo eficiente del agua aplicada [1]. Sin embargo, ambas medidas requieren tiempo y personal cualificado para su medición, además de presentar el inconveniente de su difícil automatización [2,3]. Por ello, el estudio de alternativas automatizables capaces de evaluar, de forma rápida y no destructiva, el estado hídrico de la planta es esencial en zonas con escasez hídrica. En este sentido, y propiciado por el abaratamiento de las cámaras térmicas y el aumento en la resolución, la termografía infrarroja han emergido como una herramienta eficaz para monitorizar el estado hídrico de cultivos a diferentes escalas y evaluar la idoneidad de las estrategias de riego seguidas [1,3,4].

La temperatura del dosel vegetal (T_c) como indicador del estado hídrico del cultivo puede ser capaz de evaluar el estrés hídrico de la planta. Esto es debido a que una regulación estomática motivada por un estrés hídrico puede reducir la tasa transpirativa del cultivo y, por lo tanto, aumentar T_c [5]. T_c es un indicador de estado hídrico útil en diversos cultivos, como la vid [6], el cerezo [4], el peral [3] y el almendro [1]. Sin embargo, T_c es dependiente de parámetros fisiológicos del cultivo [7] y sensible a los factores ambientales [8,9]. Por ello, se han desarrollado diversos índices de estrés térmicos que normalizan las medidas absolutas de T_c , minimizando, así, el impacto de las variables ambientales [8,9]. En este sentido, la diferencia de temperatura entre el dosel vegetal y el aire (ΔT) y el índice de estrés del cultivo (CWSI) fueron determinados para reducir esta influencia ambiental [10]. Por un lado, ΔT es un índice que se puede determinar de forma rápida, debido a que solamente utiliza T_c y la temperatura del aire para su cálculo [8]; sin embargo, su medida es dependiente del déficit de presión de vapor (DPV) [7]. Por otro lado, CWSI fue desarrollado como un índice relacionado con el grado de apertura estomática [9] y, aunque su obtención es algo más dificultosa que ΔT , CWSI es más adecuado para determinar el estado hídrico de distintos cultivos [1,3,4,11].

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el empleo de las imágenes térmicas capturadas con una cámara de bajo coste para determinar distintos índices térmicos y, evaluar el estado hídrico de almendros sujetos a distinto nivel de estrés, permitiendo establecer valores que permitan optimizar el uso del agua en climas mediterráneos.

2. Materiales y métodos

El trabajo fue realizado durante 2017 en una parcela de almendros (*Prunus dulcis* (Mill.) D. A. Webb) 'Marta' injertados sobre 'Mayor', perteneciente a la Estación Experimental

Agroalimentaria 'Tomás Ferro', Cartagena (37° 41' N, 0° 57' E). Los árboles de 17 años de edad, marco plantación de 7 m x 6 m, se riegan por goteo a partir de dos laterales por hilera de árboles y 12 emisores autocompensantes de 4 L h⁻¹ por árbol. El agua de riego de baja salinidad presentó una conductividad eléctrica de 1,24 dS m⁻¹.

Se aplicaron tres tratamientos de riego: i) un control, CTL, regado al 115 % de la evapotranspiración del cultivo (ET_c); ii) un riego deficitario sostenido, RDS, regados al 65 % de CTL; y iii) riego deficitario severo, RD_{ss}, regado al 50 % de CTL en las fases II+III (febrero-mayo) - dos periodos de supresión del riego (22 y 45 días) separados por una semana de recuperación durante la fase IV (acumulación de materia elaborada en el grano, junio - finales de agosto) - y riego completo (100 % de CTL) durante el resto de la campaña (fase V; postcosecha). Dos semanas antes de la cosecha (220 - 234 DDA), el riego fue suprimido en todos los tratamientos con el objetivo de homogenizar la recolección mecanizada. Cada tratamiento constó de 3 repeticiones, y cada repetición de 12 árboles, distribuidos en 3 filas conjuntas con 4 árboles fila⁻¹. Siendo monitorizados los 2 árboles centrales de la fila central. La programación del riego se realizó semanalmente a partir de ET_c [12]: $ET_c = ET_0 \times K_r \times K_c$, donde ET₀ es la evapotranspiración de referencia; K_r, el coeficiente corrector [13]; y K_c, el coeficiente de cultivo [14]. El diseño experimental costó de 3 bloques con 3 tratamientos distribuidos al azar. El análisis de datos se realizó a partir de un análisis de varianza (ANOVA) a un nivel de confianza del 95% (SPSS Statistics, SPSS Inc., 24.0 Statistical package; Chicago, IL, USA)

El estado hídrico del suelo en el perfil 0 - 0,5 m fue determinado a partir del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), obtenido con un sensor capacitivo (Diviner2000, Entelechy Pty. Ltd., Golden Grove, Australia). Para este fin, se colocaron, a 23 cm del emisor, tres tubos por tratamiento. θ_v se midió cada 7-15 días y previo al riego, entre las 8:00 - 10:00 h UT. Una vez obtenido θ_v se determinó el stock hídrico del suelo (SWS) en los primeros 0,5 m de profundidad.

El potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_{tallo}) y la conductancia estomática foliar (gs) fueron determinados al mediodía solar (12:00 UT). Ψ_{tallo} fue obtenido con una cámara de presión (SF-PRES-70, SolFranc Tecnologías, S.L., España) en 6 hojas no transpirantes por tratamiento, siguiendo las recomendaciones de Hsiao [15]. gs fue medida con un equipo portátil (CIRAS2, PPSsystem, USA) en 6 hojas por tratamiento, seleccionadas del tercio medio del árbol. Las hojas fueron medidas a saturación de luz (radiación fotosintéticamente activa \approx 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y a 400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂.

La temperatura del dosel vegetal (T_c) fue obtenida con una cámara térmica (Flir One, Flir Systems, Wilsonville, OR, USA) en 2 árboles por repetición (n = 6). Las fotografías fueron tomadas a una distancia de 1,5 m del dosel vegetal en la zona soleada del árbol y la emisividad fue establecida en 0,95 [4,16]. Para minimizar el efecto de las variables climáticas, se determinó la diferencia entre la temperatura del dosel vegetal y la del aire (ΔT) y el índice de estrés del cultivo (CWSI) a partir de las siguientes expresiones [8,9]:

$$\Delta T = T_c - T_a$$
$$CWSI = \frac{\Delta T - \Delta T_{\text{wet}}}{\Delta T_{\text{dry}} - \Delta T_{\text{wet}}}$$

donde T_c es la temperatura del dosel vegetal, T_a es la temperatura del aire, ΔT_{wet} y ΔT_{dry} son las diferencias entre la temperatura del dosel y la del aire cuando las hojas tienen los estomas completamente abiertos y cerrados, respectivamente, para las condiciones ambientales específicas de cada día. ΔT_{wet} se determinó a partir del límite de no-estrés (LNS; $\Delta T_{wet} = a + b \text{ DPV}$), obtenido a partir de una fina capa de agua sobre las hojas 30 s antes de tomar las imágenes. ΔT_{dry} se obtuvo a partir del límite de no-transpiración (LNT), determinado a partir de hojas no transpirativas, las cuales fueron cubiertas ambos lados con una fina capa de vaselina para impedir la transpiración [5].

3. Resultados y discusión

La estrategia de riego afectó al estado hídrico del suelo (Figura 1a) y del cultivo (Figura 1b). El stock hídrico (SWS) en los 0,5 m de suelo se mantuvo próximo a los 180 mm en el tratamiento CTL, y las plantas exhibieron valores de Ψ_{tallo} medios de -0,8 MPa durante el ensayo, a excepción del periodo de supresión del riego por motivos de recolección (220 - 234 DDA) donde alcanzó un valor mínimo de -1.7 MPa. Valores de Ψ_{tallo} superiores a -0,9 MPa son característicos de árboles sin limitaciones hídricas [17]. El tratamiento de riego deficitario sostenido, RDS, mostró valores ligeramente inferiores a los árboles de CTL y alcanzó un valor medio de Ψ_{tallo} de -1.01 MPa, excluyendo el periodo previo a la recolección.

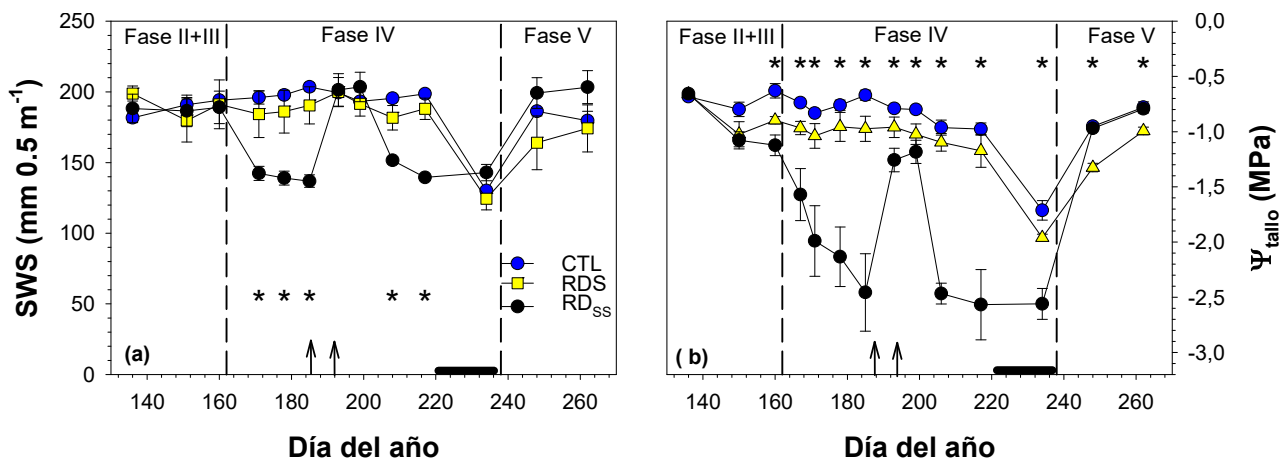


Figura 1. Evolución del (a) stock hídrico del suelo (SWS) y del (b) potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_{tallo}). Los asteriscos muestran diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos según ANOVA ($p < 0,05$). Las líneas verticales de puntos separan las fases fenológicas. La barra horizontal negra representa el periodo de supresión del riego por motivos de recolección y las fechas delimitan el periodo de recuperación en el tratamiento RD_{ss}.

Contrariamente, RD_{ss} fueron sujetos a dos periodos de supresión durante el periodo experimental (Figura 1), experimentando un descenso paulatino de Ψ_{tallo} al inicio de la fase IV (161 DDA) como consecuencia del agotamiento gradual de SWS y motivado por la supresión hídrica a la que fue expuesto el tratamiento. De esta manera, RD_{ss} obtuvo unos los valores de SWS y Ψ_{tallo} de 136 mm y -2.46 MPa (DDA 185) durante el primer periodo de supresión. Tras el periodo de recuperación de una semana, los árboles fueron sometidos nuevamente a un periodo de supresión, alcanzando valores de SWS y Ψ_{tallo} de 139 mm y -2.57 MPa (DDA 217). El déficit hídrico mostrado por los árboles RD_{ss} puede ser clasificado como severo [17,18], y, por tanto, capaz de afectar a la producción del almendro [1]. Girona et al. [19] sugiere que las

variaciones en el peso del grano sería el principal factor involucrado en la reducción de la producción cuando el árbol es sometido a déficit hídrico durante la fase IV (llenado del grano), donde el almendro es más resistente al déficit que otras fases. Además, un estrés hídrico severo puede afectar notablemente a la supervivencia del árbol, promoviendo una reducción del área foliar [20]. Tras la cosecha, el riego en los árboles SS fue reanudado (100% de CTL), aumentado SWS y Ψ_{tallo} hasta alcanzar valores similares a los árboles CTL.

Las líneas de no-estrés (LNS) y no-transpiración (LNT) fueron determinadas en almendro a partir de los datos obtenidos a lo largo del periodo experimental (Figura 2) y siguiendo las indicaciones propuestas por Jones [5]. La diferencia entre la temperatura de las hojas con los estomas completamente abiertos (T_{low}), obtenida a partir de la pulverización de agua, y la temperatura del aire (T_{air}) estuvo claramente influenciada por el déficit de presión de vapor (DPV). De esta manera, la diferencia entre la línea de no-estrés y el aire (ΔT_{low}) aumentó a medida que los valores de DPV ascendieron. Así, LNS, determinada en almendro, mostró una relación lineal: $\Delta T_{\text{low}} = 1,62 - 2,21 \cdot \text{DPV}$ ($R^2 = 0,94$). El coeficiente de determinación (R^2) obtenido fue ligeramente superior a la obtenida por Blanco et al. [3] en peral 'Bartlett'; y similar al registrado en cerezo 'Lapins' [4]. Por el contrario, LNT, obtenida a partir de la aplicación de una fina capa de vaselina, fue independiente a las condiciones ambientales, registrando un valor medio de 5°C en el presente trabajo. Este valor sería comparable al informado por Jones [5] para climas mediterráneos y ligeramente inferior a los obtenidos en cerezo [4].

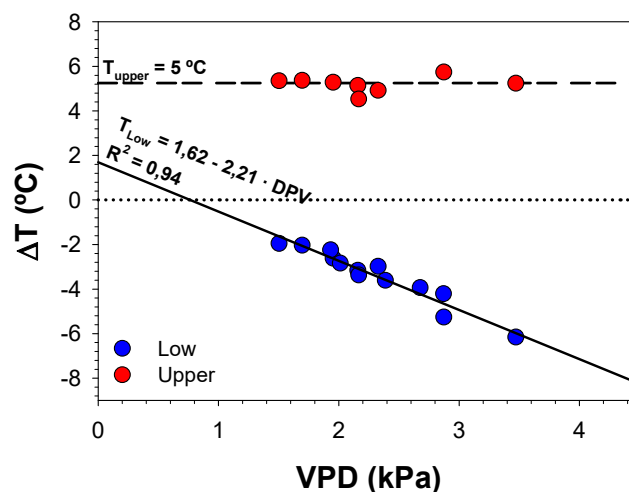


Figura 2. Determinación gráfica de la línea de no-estrés (LNS) y no-transpiración (LNT) comparada con el déficit de presión de vapor (DPV) y la diferencia entre la temperatura del dosel vegetal y el aire circundante (ΔT).

El estrés hídrico provocó una regulación estomática (Figura 3a) en los tratamientos deficitarios y, por consiguiente, un aumento de la temperatura del dosel vegetal (T_c ; Figura 3b). De esta manera, su diferencial con respecto a la temperatura del aire (ΔT ; Figura 3c) mostró un aumento significativo durante el periodo de medidas. Los árboles del tratamiento CTL obtuvieron valores medios de g_s , a excepción del periodo supresión previo a la recolección, de $262 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y T_c inferiores a T_a ($\Delta T = -1,76^\circ\text{C}$). Blaya-Ros et al. [4] observó valores de ΔT superiores ($-0,8^\circ\text{C}$) en cerezos sin limitación hídrica. Contrariamente, los árboles deficitarios mostraron una regulación estomática, disminuyendo g_s hasta alcanzar valores mínimos de 129 y $41 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en RDS y RD_{ss}, respectivamente. La regulación estomática observada implicó

una temperatura superior a la del aire, alcanzando ΔT valores de 2,6 y 3,5 °C en RD_{ss} durante el primer y segundo ciclo de sequía, respectivamente. Sin embargo, la regulación estomática mostrada por los árboles no fue total, debido a que los valores g_s fueron superiores a 0 mmol m⁻² s⁻¹ y los valores de ΔT se mantuvieron por debajo del valor límite ΔT_{dry} determinado a partir de LNT (Figura 2). En situaciones de estrés hídrico, el almendro es capaz mantener niveles aceptables de conductancia estomática foliar, mientras mantiene valores óptimos de asimilación de carbono, fotosíntesis, y aumentando la eficiencia intrínseca del uso del agua [21,22].

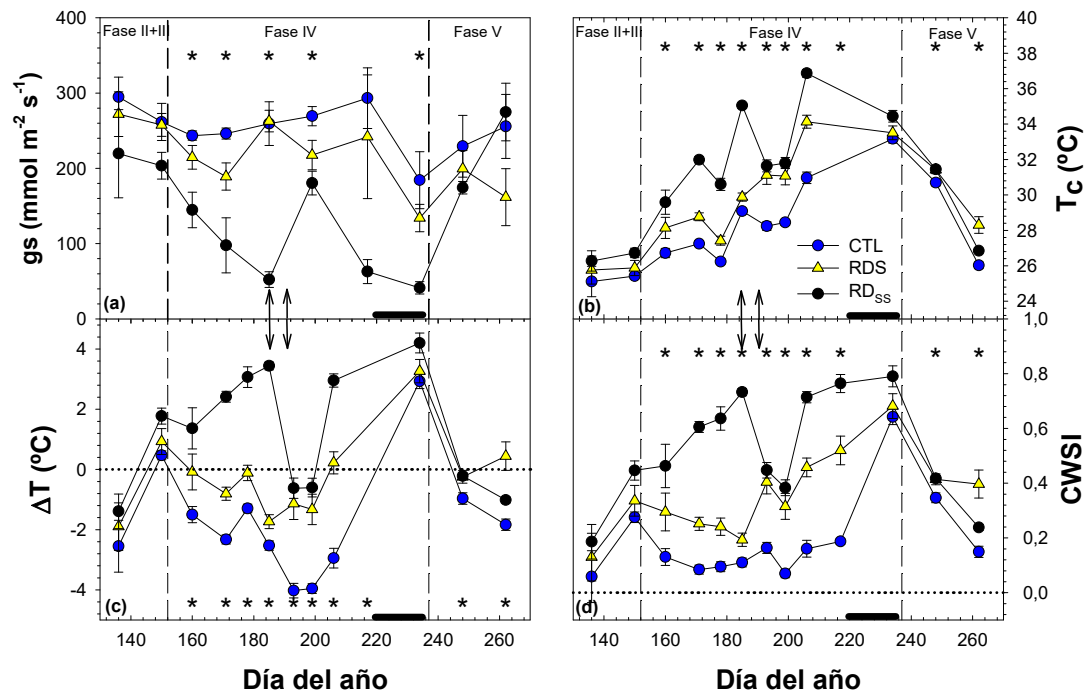


Figura 3. Evolución de la (a) conductancia estomática foliar (g_s), (b) temperatura del dosel vegetal (T_c), de su diferencial con respecto al aire circundante (ΔT) y (c) del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI). Los asteriscos muestran diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. Las líneas verticales de puntos separan las fases fenológicas del cultivo. La barra horizontal negra representa el periodo de supresión del riego por motivos de recolección y las fechas delimitan el periodo de recuperación en el tratamiento RD_{ss}.

De la misma manera, CWSI respondió al déficit hídrico impuesto en los tratamientos deficitarios, RDS y RD_{ss} (Figure 3d). Los árboles de CTL mostraron valores de CWSI entre 0,05 y 0,28 a lo largo del periodo de medidas, a excepción del periodo de supresión con motivos de la recolección, donde aumentó hasta 0,64. Los datos del presente ensayo son superiores a los observados por García-Tejero et al. (2017) en almendro ‘Guara’, donde obtuvieron valores de CWSI próximos a 0 en los árboles sin restricción hídrica, posiblemente a estos fueron utilizados para obtener LNS, lo que podría infraestimar la estimación de CWSI en comparación a cuando LNS es determinada a partir del método de pulverización de agua [5]. Por otro lado, Jackson et al. [23] informaron que valores cercanos a 0 son difícilmente obtenibles en condiciones de cultivo, debido a que la mayoría de los cultivos muestran cierta resistencia al flujo del agua, aunque el suelo no suponga una limitación hídrica.

RDS y RD_{SS} mostraron valores de CWSI superiores a CTL durante la mayor parte de la fase IV (llenado del grano) y fase V (acumulación de reservas) debido al déficit hídrico. RDS mostró valores medios de CWSI próximos a 0,35, indicativo de un estrés ligero y correspondiente a la dotación hídrica a la que fueron sometidos los árboles (65 % de CTL). En cambio, los árboles de RD_{SS}, como era de esperar, obtuvieron valores inferiores a CTL y RDS durante los dos periodos de supresión a los que estuvieron expuestos los árboles. Por ello, el déficit hídrico promovió un aumento significativo de CWSI hasta alcanzar valores cercanos a 0,8 (Figura 3a), indicativo de una alta regulación estomática (Figura 3a). Estos valores fueron similares a los observados por García-Tejero et al. [11], donde un riego deficitario al 45 % de ET_c provocó una regulación estomática severa, lo que aumentó los valores de CWSI durante la fase IV (llenado del grano) hasta alcanzar valores de 0,8.

En el presente ensayo se encontraron distintas relaciones lineales de Ψ_{tallo} con g_s y los diferentes parámetros térmicos obtenidos, T_c , ΔT y CWSI (Figura 4). T_c mostró el coeficiente de correlación más bajo con Ψ_{tallo} ($R^2 = 0,65$), posiblemente debido a la influencia de los parámetros climáticos sobre T_c [7]. En cambio, g_s y CWSI obtuvieron estrechas relaciones con Ψ_{tallo} , alcanzando un coeficiente de correlación (R^2) de 0,80 y 0,83, respectivamente.

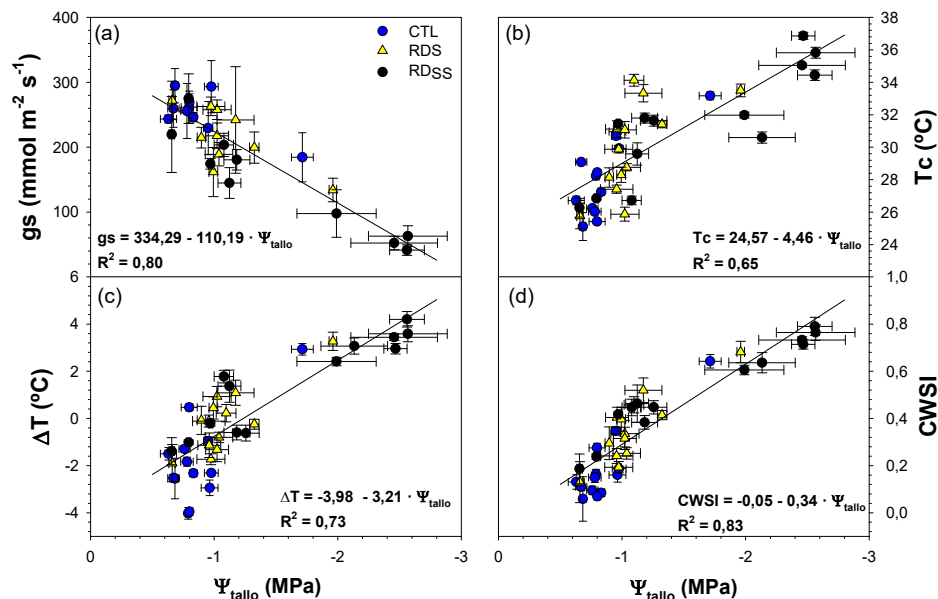


Figura 4. (a) Relación entre la conductancia estomática (g_s) y el potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallos}); (b) relación entre la temperatura de copa (T_c) y Ψ_{tallos} ; (c) relación entre la diferencia de temperatura dosel vegetal y el aire (ΔT) y Ψ_{tallos} ; y (d) relación entre índice de estrés del cultivo (CWSI) y Ψ_{tallos} .

Las relaciones obtenidas indican que los índices térmicos determinados, ΔT y CWSI, permitieron reducir la influencia de los parámetros meteorológicos sobre T_c en almendro [5]. Las relaciones obtenidas en el presente trabajo fueron similares a las encontradas por García-Tejero et al. [1] en almendro, donde desarrollaron un protocolo de medida de las imágenes térmicas y establecieron relaciones entre ΔT con Ψ_{tallos} y g_s . Tekelioğlu et al. [24] y Wang y Gartung [25] indicaron que ΔT y CWSI podrían ser utilizados para monitorizar el estado hídrico de los cultivos y, por tanto, como una herramienta para la toma de decisiones y en la confección de programas de riego en climas mediterráneos.

4. Conclusiones

El presente trabajo pone de manifiesto cierta limitación de T_c para evaluar el estado hídrico del almendro debido al efecto de las variables climáticas. En cambio, los índices térmicos obtenidos a partir de T_c (ΔT y CWSI) han sido capaces de minimizar esta influencia y mejorar su relación con el indicador de referencia utilizado en el presente trabajo, el potencial hídrico de tallo, y ser capaces de evaluar el estado hídrico del cultivo, lo que permitiría la optimización de las estrategias de riego en climas mediterráneos. Finalmente, con los datos obtenidos, se establece un valor umbral en almendro de $4\text{ }^\circ\text{C}$ y $0,8$ para ΔT y CWSI, respectivamente, donde valores superiores, correspondientes a valores de potencial hídrico de tallo inferiores a $-2,5\text{ MPa}$, podrían afectar de forma severa a la producción del cultivo o, incluso, a la supervivencia del árbol.

La información obtenida a partir de una cámara térmica de bajo coste sería una herramienta prometedora para la gestión del agua de riego en almendros sujetos a distintos niveles de estrés. Además, estudios recientes han propuesto un procesamiento y segmentación automático de imágenes que permiten la extracción de la región de interés [26], haciendo plausible la instalación de cámaras térmicas que recojan información continua a lo largo del periodo vegetativo del cultivo.

5. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) (Ref. AGL2016-77282-C33-R y PID2019-106226RB-C22; MCIN/AEI/10.13039/501100011033). Este trabajo es también resultado del programa AGROALNEXT, financiado por MCIN, con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1), y por la Fundación Séneca, con financiación de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM).

Referencias

1. García-Tejero, I.; Durán-Zuazo, V.H.; Arriaga, J.; Hernández, A.; Vélez, L.M.; Muriel-Fernández, J.L. Approach to Assess Infrared Thermal Imaging of Almond Trees under Water-Stress Conditions. *Fruits* 2012, 67, 463–474.
2. Blanco, V.; Domingo, R.; Pérez-Pastor, A.; Blaya-Ros, P.J.; Torres-Sánchez, R. Soil and Plant Water Indicators for Deficit Irrigation Management of Field-Grown Sweet Cherry Trees. *Agricultural Water Management* 2018, 208, 83–94.
3. Blanco, V.; Willsea, N.; Campbell, T.; Howe, O.; Kalcsits, L. Combining Thermal Imaging and Soil Water Content Sensors to Assess Tree Water Status in Pear Trees. *Frontiers in Plant Science* 2023, 14.
4. Blaya-Ros, P.J.; Blanco, V.; Domingo, R.; Soto-Valles, F.; Torres-Sánchez, R. Feasibility of Low-Cost Thermal Imaging for Monitoring Water Stress in Young and Mature Sweet Cherry Trees. *Applied Sciences (Switzerland)* 2020, 10.
5. Jones, H.G. Use of Infrared Thermometry for Estimation of Stomatal Conductance as a Possible Aid to Irrigation Scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology* 1999, 95, 139–149.
6. Carrasco-Benavides, M.; Antunez-Quilobrán, J.; Baffico-Hernández, A.; Ávila-Sánchez, C.; Ortega-Farías, S.; Espinoza, S.; Gajardo, J.; Mora, M.; Fuentes, S. Performance Assessment of Thermal Infrared Cameras of Different Resolutions to Estimate Tree Water Status from Two Cherry Cultivars: An Alternative to Midday Stem Water Potential and Stomatal Conductance. *Sensors* 2020, 20, 1–17.
7. García-Tejero, I.F.; Gutiérrez-Gordillo, S.; Souza, L.; Cuadros-Tavira, S.; Durán-Zuazo, V.H. Fostering Sustainable Water Use in Almond (*Prunus Dulcis* Mill.) Orchards in a Semiarid Mediterranean Environment. *Archives of Agronomy and Soil Science* 2018, 65, 164–181.
8. Idso, S.B.; Jackson, R.; Pinter, P.J.; Reginato, R.J.; Hatfield, J.L. Normalizing the Stress-Degree-Day Parameter for Environmental Variability. *Agricultural Meteorology* 1981, 24, 45–55.



XXXIX Congreso Nacional de Riegos ÚBEDA (JAÉN)

18, 19, 20 de octubre de 2023



9. Jackson, R.D.; Idso, S.B.; Reginato, R.J.; Pinter, P.J. Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator. *Water Resources Research* 1981, 17, 1133–1138.
10. Jackson, R.D.; Reginato, R.J.; Idso, S.B. Wheat Canopy Temperature: A Practical Tool for Evaluating Water Requirements. *Water Resources Research* 1977, 13, 651–656, doi:10.1029/WR013i003p00651.
11. García-Tejero, I.F.; Hernández, A.; Padilla-Díaz, C.M.; Diaz-Espejo, A.; Fernández, J.E. Assessing Plant Water Status in a Hedgerow Olive Orchard from Thermography at Plant Level. *Agricultural Water Management* 2017, 188, 50–60.
12. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. In *FAO Irrigation and drainage paper 56*. Food and Agriculture Organization, Rome.; Food and Agriculture Organization, Ed.; Rome, 1998.
13. Fereres, E.; Castel, J.R. Drip Irrigation Management. Division of Agricultural Sciences, University of California (Leaflet 21259); 1981.
14. Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Fereres, E.; Raes, D. Respuesta Del Rendimiento de Los Cultivos al Agua. En: *FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations*, (Ed). *FAO - Irrigation and Drainage Paper 66*. FAO, Rome.; 2012.
15. Hsiao, T.C. Measurements of Plant Water Status. *Agronomy* 1990, 30, 243–279.
16. Costa, J.M.; Grant, O.M.; Chaves, M.M. Thermography to Explore Plant-Environment Interactions. *Journal of Experimental Botany* 2013, 64, 3937–3949.
17. Puerto, P.; Domingo, R.; Torres, R.; Pérez-Pastor, A.; García-Riquelme, M. Remote Management of Deficit Irrigation in Almond Trees Based on Maximum Daily Trunk Shrinkage. *Water Relations and Yield. Agricultural Water Management* 2013, 126, 33–45.
18. Hutmacher, R.B.; Nightingale, H.I.; Rolston, D.E.; Biggar, J.W.; Dale, F.; Vail, S.S.; Peters, D. Growth and Yield Responses of Almond (*Prunus Amygdalus*) to Trickle Irrigation. *Irrigation Science* 1994, 14, 117–126.
19. Girona, J.; Mata, M.; Marsal, J. Regulated Deficit Irrigation during the Kernel-Filling Period and Optimal Irrigation Rates in Almond. *Agricultural Water Management* 2005, 75, 152–167.
20. Blaya-Ros, P.J.; Blanco, V.; Torres-Sánchez, R.; Domingo, R. Drought-Adaptive Mechanisms of Young Sweet Cherry Trees in Response to Withholding and Resuming Irrigation Cycles. *Agronomy* 2021, 11, 1812.
21. McCutchan, H.; Shackel, K.A. Stem-Water Potential as a Sensitive Indicator of Water Stress in Prune Trees (*Prunus Domestica* L. Cv. French). *Journal of the American Society for Horticultural Science* 1992, 117, 607–611.
22. Rouhi, V.; Samson, R.; Lemeur, R.; Damme, P.V. Photosynthetic Gas Exchange Characteristics in Three Different Almond Species during Drought Stress and Subsequent Recovery. *Environmental and Experimental Botany* 2007, 59, 117–129.
23. Jackson, R.D.; Kustas, W.P.; Choudhury, B.J. A Reexamination of the Crop Water Stress Index. *Irrigation Science* 1988, 9, 309–317.
24. Tekelioğlu, B.; Büyüktaş, D.; Baştuğ, R.; Karaca, C.; Aydınşakir, K.; Dinç, N. Use of Crop Water Stress Index for Irrigation Scheduling of Soybean in Mediterranean Conditions. *Journal of Experimental Agriculture International* 2017, 18, 1–8.
25. Wang, D.; Gartung, J. Infrared Canopy Temperature of Early-Ripening Peach Trees under Postharvest Deficit Irrigation. *Agricultural Water Management* 2010, 97, 1787–1794.
26. Giménez-Gallego, J.; González-Teruel, J.D.; Jiménez-Buendía, M.; Toledo-Moreo, A.B.; Soto-Valles, F.; Torres-Sánchez, R. Segmentation of Multiple Tree Leaves Pictures with Natural Backgrounds Using Deep Learning for Image-Based Agriculture Applications. *Applied Sciences* 2020, 10.