



A-14

USO DE IMÁGENES TÉRMICAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DE CEREZOS JÓVENES

Blaya-Ros, P.J.¹, Blanco Montoya, V.¹, Torres Sánchez, R.², González-Teruel, J.D.², Soto Valles, F.², Toledo Moreo, A.B.², Jiménez Buendía, M.², Domingo Miguel, R.¹

¹ Dpto. de Ingeniería Agronómica, Universidad Politécnica de Cartagena, Pase Alfonso XIII, 48. 30203, Cartagena. pedro.blaya@upct.es; victor.blanco@upct.es; rafael.domingo@upct.es

² Dpto. de Automática, Ingeniería Eléctrica y Tecnología Electrónica, Universidad Politécnica de Cartagena (ETSII-UPCT). roque.torres@upct.es; juando.gonzalez@upct.es; pencho.soto@upct.es; ana.toledo@upct.es; manuel.jimenez@upct.es.

Resumen

En regiones áridas y semiáridas, donde el principal factor limitante de la producción es el agua, es clave la aplicación exacta y cuidadosa de los volúmenes de riego de acuerdo con un criterio de programación técnico-económico. En este sentido, el uso de las nuevas tecnologías puede contribuir a la mejora de la eficiencia de uso del agua y sostenibilidad de la agricultura. Con el objetivo de evaluar el uso de imágenes térmicas para determinar el estado hídrico del cultivo y su idoneidad para el manejo del riego se realizó un ensayo en cerezos jóvenes (*Prunus avium* L.) 'Lapins' en 2018. Se establecieron dos tratamientos de riego: i) control, CTL, regado al 115% de la evapotranspiración del cultivo (ETc) durante todo el periodo experimental y ii) déficit severo, SS, regado como CTL hasta finales de junio, momento a partir del cual se alternaron 2 ciclos consecutivos de supresión-reanudación del riego, tras la recuperación del árbol se inició el segundo ciclo. La respuesta de la planta fue proporcional a la intensidad del estrés alcanzado durante los periodos de supresión del riego. Así, la disminución del stock hídrico del suelo provocó la caída del potencial hídrico de tallo y el aumento en la temperatura de la copa. Tras la reanudación del riego, todos los indicadores estudiados alcanzaron valores similares a CTL. El índice térmico obtenido a partir de la diferencia entre las temperaturas del dosel vegetal y la del aire circundante fue un buen indicador del estado hídrico de cerezos jóvenes bajo déficit hídrico severo.

1) Introducción

La agricultura de regadío es el principal destinatario de los recursos hídricos disponibles, alcanzando una proporción que puede exceder el 70% de las extracciones de agua procedentes de ríos, lagos y acuíferos en zonas áridas y semiáridas (Fereres y Soriano, 2007). De ahí que, en situaciones de emergencia por sequía, estos recursos destinados a la agricultura sean percibidos por el resto de los sectores de nuestra sociedad como la principal fuente de agua (Ruiz-Sánchez et al., 2010). Esta realidad ha dado lugar a diversas actuaciones tendentes a racionalizar el uso del agua; entre ellas, la programación científica y técnica del riego.

La programación del riego por goteo se viene realizando a partir de la estima de la evapotranspiración del cultivo (ETc) y la elección del intervalo entre riegos, el que suele ser diario (Allen et al., 1998). Sin embargo, el cálculo de ETc suele llevar asociadas ciertas incertidumbres debidas a la propia arquitectura de la copa del árbol, cobertura del suelo por el cultivo y a otros factores (Fereres y Soriano, 2007). De modo que para realizar un manejo eficiente del agua de riego sea conveniente contar con información adicional, como puede

ser la proveniente de indicadores del estado hídrico del suelo y/o de la planta. El método de referencia para la determinación del estado hídrico de la planta es la medida del potencial hídrico foliar con cámara de presión, aunque presenta el inconveniente de su difícil automatización. De ahí, el interés creciente por el uso de sensores capaces de detectar el estado hídrico del cultivo de forma autónoma. Dentro de esta línea, la termografía infrarroja emergió como herramienta rápida y no destructiva para conocer del estado hídrico de un cultivo de cara a la programación de los riegos. La adquisición de esta información con técnicas de control remoto ha demostrado ser útil y económica comparada con técnicas más laboriosas y que consumen más tiempo basadas en el muestreo foliar.

La temperatura de la copa (T_c) es usada como un indicador de la transpiración y apertura estomática y por ende, como una medida de la respuesta de la planta a ambientes adversos (Jones, 2018). Sin embargo, muchas veces las relaciones entre T_c y los parámetros fisiológicos del cultivo (transpiración, conductancia estomática, potencial hídrico de tallo, etc.) no siempre tienen una estrecha relación en condiciones de campo (García-Tejero et al., 2018a). Esto es debido, principalmente, por la influencia de las variables meteorológicas (Grant et al., 2006) o factores morfológicos (Maes y Steppe, 2012). Con el objetivo de determinar el estado hídrico del cultivo y minimizar la influencia de los factores ambientales se han obtenido diversos índices de estrés térmicos (Idso et al., 1981; Jackson et al., 1981; Jones, 1999). La diferencia de temperatura entre la copa y el aire circundante (ΔT) es un índice que normaliza los valores absolutos de temperatura de la hoja, reduciendo la influencia ambiental sobre las medidas obtenidas (Jackson et al., 1977). Este índice ha sido utilizado ampliamente en las relaciones hídricas del cultivo y en la programación del riego, debido a su versatilidad y fácil obtención (Bockhold et al., 2011; Pramanik et al., 2016; Wang y Gartung, 2010).

2) Objetivo

El objetivo de este trabajo fue evaluar la utilidad de las imágenes térmicas en la determinación del estado hídrico cambiante de cerezos jóvenes sometidos a dos ciclos de estrés, sequía - riego.

3) Materiales y Métodos

El ensayo se llevó a cabo de junio a octubre de 2018 (día del año, DDA, 175 - 280) en cerezo (*Prunus avium* L.) 'Lapins' injertado sobre 'Mirabolano'. El experimento se llevó a cabo en la Estación Experimental Agroalimentaria 'Tomás Ferro' (ETSIA-UPCT), ubicada en La Palma, Cartagena (37° 41' N, 0° 57' E). Los árboles, de 3 años de edad y diámetro de tronco de 4,8 cm, se dispusieron para este estudio a un marco de 3,5 m x 2,25 m. Cada árbol se regó a partir de tres emisores autocompensantes de 2,2 L h⁻¹, colocados en un único lateral de riego y a 75 cm de separación. El agua de riego, proveniente del transvase Tajo-Segura, presentó una conductividad eléctrica ($CE_{25^\circ C}$) de 1,1 dS m⁻¹.

Se ensayaron 2 tratamientos de riego según un diseño de bloques al azar con 3 repeticiones y 4 árboles por repetición. Los tratamientos de riego fueron: i) Control, CTL, regado al 115 % ET_c al objeto de asegurar condiciones no limitantes de agua en el suelo y ii) déficit severo, SS, regado como el control hasta finales de junio, momento a partir del cual se alternaron 2 ciclos consecutivos de supresión-reanudación del riego, con la recuperación del árbol se inició la supresión del segundo ciclo. La reanudación del riego se inició cuando se alcanzaron valores de potencial de tallo de -1,6 MPa y -2,2 MPa para el primer y segundo periodo de supresión del riego. Las dosis de riego se calcularon semanalmente a partir de la estimación de ET_c según la metodología FAO:

$$ET_c = ET_0 \times K_c \times K_L.$$

donde, ET_0 es la evapotranspiración de referencia (Allen et al., 1998); K_c , coeficiente de cultivo (Marsal, 2012); K_L , coeficiente corrector por localización dependiente de la superficie del suelo cubierta por las copas de los árboles (Ferreles y Castel, 1981).

Los datos meteorológicos fueron proporcionados por la estación CA12 (Servicio de Información Agraria de la Región de Murcia, SIAM), ubicada a 200 m de la parcela experimental. Las condiciones meteorológicas fueron típicas del clima mediterráneo con veranos secos y calurosos e inviernos suaves y húmedos. La evapotranspiración de referencia (ET_0) acumulada en el periodo experimental (DDA 175 – 280) fue de 533 mm, la ET_0 media durante el periodo de estudio fue de 5,02 mm día⁻¹ y la precipitación total de 71,20 mm, concentrándose el 72,4 % de esta en el DDA 258. La temperatura media diaria tuvo un valor promedio de 25,3 °C, con un valor máximo de 36,2 °C (DDA 217). El valor máximo de déficit de presión de vapor (DPV) medio diario fue de 2,67 kPa (DDA 217).

El contenido volumétrico de humedad del suelo (θ_v) se midió con una sonda capacitiva portátil (Diviner 2000, Sentek Pty. Ltd., South Australia), a las 9.00 (hora solar), cada 2-7 días y a intervalos de 0,1 m hasta los 0,5 m primeros de profundidad. Se instalaron 6 tubos de acceso para la sonda FDR por tratamiento (2 tubos por repetición) bajo la proyección de la copa y a 23 cm del emisor central. En los mismos días de medida de θ_v , se controló el potencial hídrico de tallo (Ψ_{stem}) a mediodía (11:00 – 13:00 hora solar) con una cámara de presión tipo Scholander (mod. SF-PRES-70, SolFranc Tecnologías, S.L., Spain) siguiendo las indicaciones propuestas por Hsiao (1990). Ψ_{stem} fue medido en 2 hojas adultas, sanas y cercanas al tronco por repetición ($n = 6$). La temperatura de la copa (T_c) se midió con una cámara térmica (Flir One, Flir Systems, Wilsonville, OR, USA), conectada a un teléfono inteligente, smartphone, y coincidiendo con las medidas de Ψ_{stem} . Las imágenes se tomaron en la parte soleada del árbol y a una distancia de 1,5 m de la copa, en 2 árboles por repetición ($n = 6$). La emisividad fue configurada en "matt" ($\epsilon = 0,95$). Una vez obtenida T_c , se calculó la diferencia entre la temperatura de la copa y la del aire circundante (ΔT). Los datos de temperatura del aire circundante (T_{air}), humedad relativa (HR) y el déficit de presión de vapor (DPV) fueron obtenidos mediante un sensor ATMOS 14 (METER Group Inc., Pullman, USA) y se almacenaron en un datalogger (CR1000, Campbell Scientific Ltd., Logan, USA).

Los datos fueron sometido a análisis de varianza (ANOVA) usando el programa informático SPSS Statistics (SPSS Inc., 24.0 Statistical package; Chicago, IL, USA) con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$. Las regresiones lineales y no lineales entre los indicadores se realizaron con Sigmaplot Plus v.12.5 (Systat Software, San Jose, CA, USA).

4) Resultados y Discusión

La supresión del riego afectó al estado hídrico del suelo (Figura 1a) y de la planta (Figura 1b). Así, mientras que el stock hídrico (L_0) en CTL se mantuvo cercano a los 180 mm en los 0,5 m de suelo y sus árboles presentaron valores Ψ_{stem} superiores a -0,80 MPa durante todo el periodo experimental, los árboles SS experimentaron un descenso paulatino de Ψ_{stem} a partir de DDA 187 como consecuencia del agotamiento gradual de θ_v . Valores Ψ_{stem} superiores a -0,80 MPa son indicativos de árboles bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo (Marsal et al., 2010, 2009). En el tratamiento SS, los valores L_0 y Ψ_{stem} alcanzados fueron de 126 mm y -1,68 MPa (DDA 204) y de 119 mm y -2,11 MPa (DDA 239) al final del primer y segundo ciclo de supresión del riego, respectivamente. El estrés hídrico alcanzado en ambos ciclos puede ser considerado como severo (Marsal et al., 2010), y por tanto, capaz de afectar al crecimiento y a la futura cosecha (Abdelfatah et al., 2013; Livellara et al., 2011). Tras la supresión y reanudación del riego los árboles SS alcanzaron valores similares a los árboles CTL, indicando una recuperación de Ψ_{stem} a los 11 y 18 días de riego para la primera y segunda, respectivamente.

El estrés hídrico aumentó la temperatura foliar del árbol (Figura 1c y 1d). Así, mientras que los árboles CTL presentaron valores T_c inferiores a la temperatura del aire ($\Delta T = -0,78\text{ }^\circ\text{C}$); los árboles SS, alcanzaron temperaturas superiores a la del aire, siendo ΔT del orden de 2,6 y $3,5\text{ }^\circ\text{C}$ al final del primer y segundo periodo de supresión del riego, respectivamente. Este aumento de temperatura suele estar motivado por la regulación estomática ante la disminución de θ_v y como consecuencia por la reducción de la transpiración y disipación de calor a través de la evaporación del agua (Jones et al., 2002; Jones y Vaughan, 2010). Probablemente, esta regulación estomática no llegase a alcanzar el cierre total, ya que los valores ΔT medidos siempre estuvieron por debajo del valor límite ΔT propuesto por Jackson et al. (1981) y Jones (2018) para climas mediterráneos ($\Delta T = 5\text{ }^\circ\text{C}$). Las máximas diferencias ΔT se dieron cuando los niveles del déficit hídrico del suelo y la demanda atmosférica fueron los más altos (DDA 239). En esta fecha, L_0 y DPV tuvieron valores de 119 mm y 1,83 kPa, respectivamente.

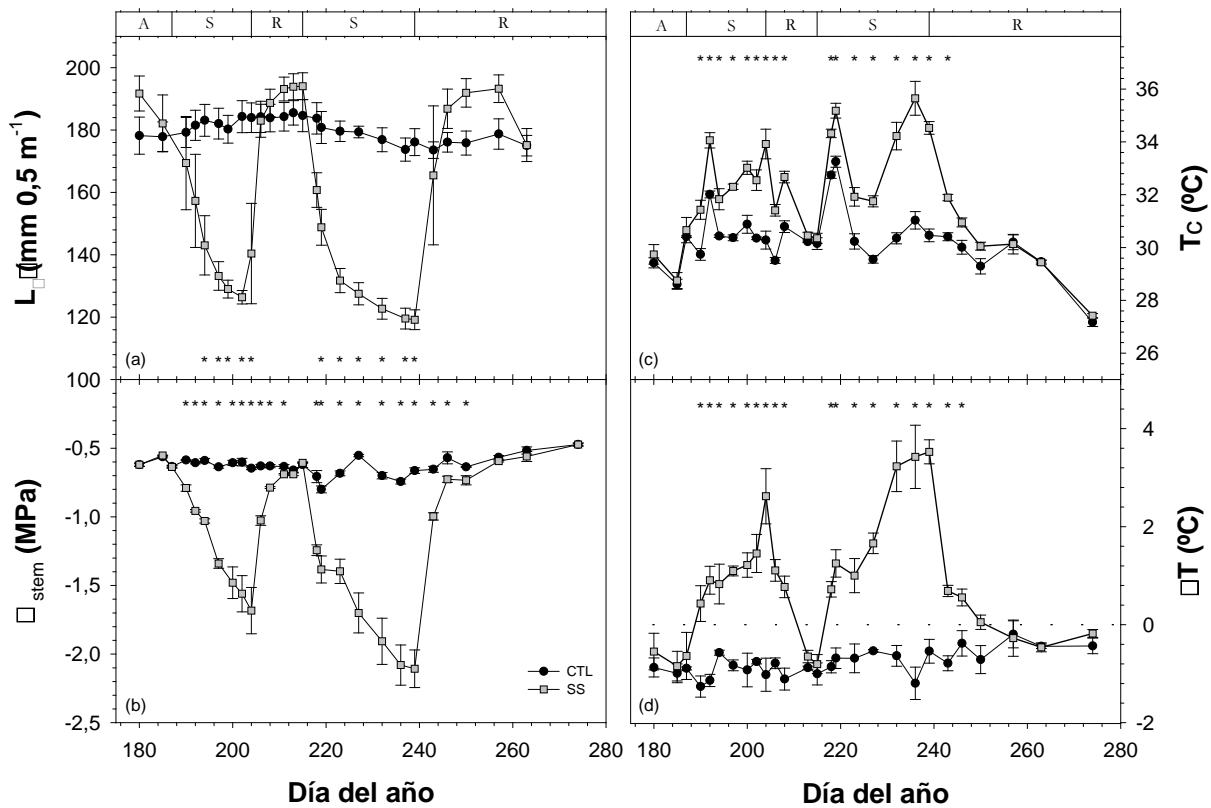


Figura 1. Evolución (a) del stock hídrico del suelo (L_0), correspondiente a la profundidad de 0,5 m, (b) potencial hídrico de tallo (Ψ_{stem}), (c) temperatura de la copa (T_c), y (d) de la diferencia de temperatura del dosel vegetal y del aire circundante (ΔT) durante el periodo experimental. Cada punto es la media de 6 medidas por tratamiento. Los asteriscos indican diferencias significativas según ANOVA ($p < 0,05$). La barra superior corresponde a los ciclos supresión-recuperación realizados al tratamiento de déficit severo (SS), donde: 'A' es el periodo antes del inicio de los ciclos de supresión-recuperación, SS se regó como el control, CTL; 'S', el periodo de supresión de riego; 'R', el periodo de recuperación del árbol.

Se observó una relación entre T_c y Ψ_{stem} (Figura 2a) con dos partes claramente diferenciadas: i) fase lineal para valores de Ψ_{stem} entre -0,5 MPa y -1,3 MPa, en la que un descenso de Ψ_{stem} conlleva un aumento proporcional de T_c y ii) fase suavemente curvilínea para valores Ψ_{stem} entre -1,3 y -2,2 MPa, en la que se da una cierta estabilización de los valores T_c . Esta pérdida de linealidad podría estar causada por la influencia de las variables meteorológicas sobre Ψ_{stem} . Contrariamente a lo observado por García-Tejero et al. (2018b) en almendros, T_c muestra ciertas limitaciones para monitorizar el estado hídrico de cerezos

jóvenes en aquellos periodos donde el déficit hídrico es moderado-severo (Figura 2a). Sin embargo, ΔT y Ψ_{stem} mostraron, para idéntico periodo, una alta relación lineal ($R^2 = 0,83$) donde una disminución de Ψ_{stem} conlleva un aumento proporcional de ΔT (Figura 2b). Esta relación indica que el índice calculado, de acuerdo con Jackson et al. (1977), puede mitigar en gran medida la influencia meteorológica sobre T_c en cerezos jóvenes. Una relación similar fue encontrada por Sepulcre-Cantó et al. (2007) en olivo, donde Ψ_{stem} alcanzó valores cercanos a -3,5 MPa sin que la relación lineal se viera afectada. Contrariamente, García-Tejero et al. (2011) observaron una inflexión de esta relación en naranjo para un valor Ψ_{stem} cercano a -2,0 MPa. Por otra parte, Wang y Gartung (2010) señalaron a ΔT como un indicador lo suficientemente robusto para ser usado en la determinación del estado hídrico de perales en climas áridos y semiáridos y, por tanto, como una herramienta útil para el manejo del riego.

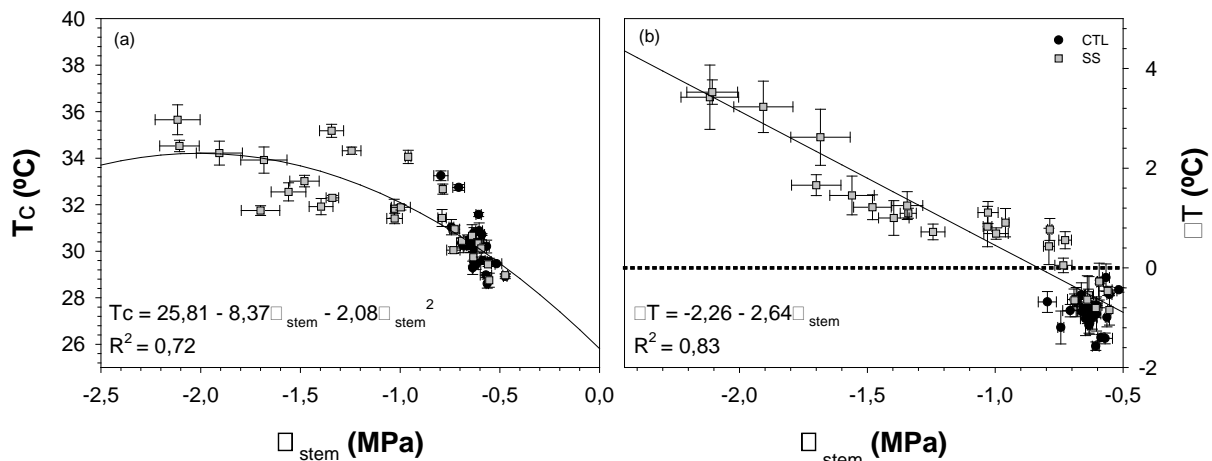


Figura 2. (a) Relación entre la temperatura de la copa y el potencial hídrico de tallo (Ψ_{stem}); (b) relación entre la diferencia entre la temperatura de la copa y la del aire circundante (ΔT) y Ψ_{stem} .

5) Conclusiones

El uso de imágenes térmicas a nivel de árbol puede ser una herramienta muy útil para la determinación del estado hídrico de cerezos jóvenes. La temperatura de la copa del árbol y más concretamente la diferencia de temperaturas copa-aire (ΔT) puede ser un indicador apropiado para el seguimiento del estado hídrico del cerezo y detección de diferentes grados de estrés; resultando de gran ayuda para la toma de decisiones en el manejo del riego del cerezo.

6) Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad del Gobierno de España, MINECO (Ref. AGL2016-77282-C3-3-R) y la Fundación Séneca de la Región de Murcia (Grupo de excelencia 2016-2019, Ref. 19895/GERM/15).

7) Referencias

- Abdelfatah, A., Aranda, X., Savé, R., de Herralde, F., Biel, C. (2013). Evaluation of the response of maximum daily shrinkage in young cherry trees submitted to water stress cycles in a greenhouse. *Agricultural Water Management* 118, 150-158.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage paper No. 56. Rome, Italy, pp 15–27.

- Blanco, V., Domingo, R., Pérez-Pastor, A., Blaya-Ros, P.J., Torres-Sánchez, R. (2018). Soil and plant water indicators for deficit irrigation management of field-grown sweet cherry trees. *Agricultural Water Management* 208, 83-94.
- Bockhold, D.L., Thompson, A.L., Sudduth, K.A., Henggeler, J.C. (2011). Irrigation scheduling based on crop canopy temperature for humid environments. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 54, 2021-2028.
- Fereres, E., Castel, J.R. (1981). Drip Irrigation Management. Division of Agricultural Sciences, University of California (Leaflet 21259).
- Fereres, E., Soriano, M.A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany* 58, 147-159.
- García-Tejero, I.F., Durán-Zuazo, V.H., Muriel-Fernández, J.L., Jiménez-Bocanegra, A. (2011). Linking canopy temperature and trunk diameter fluctuations with other physiological water status tools for water stress management in citrus orchards. *Functional Plant Biology* 38, 106-117.
- García-Tejero, I.F., Gutiérrez-Gordillo, S., Ortega-Arévalo, C., Iglesias-Contreras, M., Moreno, J.M., Souza-Ferreira, L., Durán-Zuazo, V.H. (2018a). Thermal imaging to monitor the crop-water status in almonds by using the non-water stress baselines. *Scientia Horticulturae* 238, 91-97.
- García-Tejero, I.F., Gutiérrez-Gordillo, S., Souza, L., Cuadros-Tavira, S., Durán-Zuazo, V.H., (2018b). Fostering sustainable water use in almond (*Prunus dulcis* Mill.) orchards in a semiarid Mediterranean environment. *Archives of Agronomy and Soil Science* 65, 164-181.
- Grant, O.M., Chaves, M.M., Jones, H.G. (2006). Optimizing thermal imaging as a technique for detecting stomatal closure induced by drought stress under greenhouse conditions. *Physiologia Plantarum* 127, 507-518.
- Hsiao, T.C. (1990). Measurements of plant water status. *Agronomy* 30, 243-279.
- Idso, S.B., Jackson, R., Pinter, P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology* 24, 45-55.
- Jackson, R., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter, P.J. (1981). Canopy temperature as a Crop Water Stress Indicator. *Water Resources Research* 17, 1133-1138.
- Jackson, R.D., Reginato, R.J., Idso, S.B. (1977). Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research* 13, 651-656.
- Jones, H.G., 2018. Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Ecophysiology. In A. M. Sánchez-Moreiras, A. M., Reigosa, M. J. (Eds.), *Advances in Plant Ecophysiology Techniques*. pp. 135-151.
- Jones, H.G. (1999). Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology* 95, 139-149.
- Jones, H.G., Stoll, M., Santos, T., de Sousa, C., Chaves, M.M., Grant, O.M. (2002). Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany* 53, 2249-2260.
- Jones, H.G., Vaughan, R.A. (2010). *Remote sensing of vegetation: principles, techniques and applications*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Livellara, N., Saavedra, F., Salgado, E. (2011). Plant based indicators for irrigation scheduling in young cherry trees. *Agricultural Water Management* 98, 684-690.
- Maes, W.H., Steppe, K. (2012). Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany* 63, 4671-4712.
- Marsal, J. (2012). FAO irrigation and drainage paper 66. *Crop Yield Response Water. Sweet Cherry*. FAO, Rome, pp. 449-457.
- Marsal, J., Lopez, G., Arbones, A., Mata, M., Vallverdu, X., Girona, J. (2009). Influence of post-harvest deficit irrigation and pre-harvest fruit thinning on sweet cherry (cv. New Star) fruit firmness and quality. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 84, 273-278.
- Marsal, J., Lopez, G., del Campo, J., Mata, M., Arbones, A., Girona, J. (2010). Postharvest

- regulated deficit irrigation in «Summit» sweet cherry: Fruit yield and quality in the following season. *Irrigation Science* 28, 181-189.
- Pramanik, M., Ranjan, R., Singh, R., Garg, N.K., Tripathi, S.K. (2016). A New Approach of Canopy Temperature based Irrigation Scheduling of Wheat in Humid Subtropical Climate of India. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences* 87, 1261-1269.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Domingo, R., Castel, J. (2010). Review. Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research* 8, 5-20.
- Sepulcre-Cantó, P.J., Zarco-Tejada, P.J., Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., Soriano, M.A., Fereres, E., Vega, V., Pastor, M. (2007). Monitoring yield and fruit quality parameters in open-canopy tree crops under water stress . Implications for ASTER. *Remote Sensing of Environment* 107, 455-470.
- Wang, D., Gartung, J. (2010). Infrared canopy temperature of early-ripening peach trees under postharvest deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 97, 1787-1794.