

INVESTIGACIONES SOBRE PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN LIMONERO Y OLIVO MEDIANTE MEDIDAS DIRECTAS Y CONTINUAS DEL ESTADO HÍDRICO

F. MORENO¹, M.F. ORTUÑO², Y. GARCÍA-ORELLANA³, W. CONEJERO², M.C. RUIZ-SÁNCHEZ^{2,4}, J.J. ALARCÓN^{2,4}, J.E. FERNÁNDEZ¹, M.J. MARTÍN-PALOMO⁵, A. TORRECILLAS^{2,4}

Resumen

En el presente trabajo se realiza una revisión del estado actual de conocimientos sobre aspectos relativos a la utilización de medidas continuas del estado hídrico del limonero y olivo para su utilización en la programación del riego, abarcando, esencialmente, aspectos tales como la sensibilidad de distintos indicadores del estado hídrico medidos de forma continua o discontinua en las plantas, su significado fisiológico, la obtención de niveles de referencia de los indicadores y primeros resultados sobre programación del riego.

Summary

The feasibility of irrigation scheduling in olive and lemon trees using continuously recorded plant-based water stress indicators was studied. For this, the characteristics of different plant-based water stress indicators (stem water potential, sap flow and trunk diameter fluctuations), their sensibility and limitations for water stress diagnosis purposes was discussed. The ways in which data can be interpreted, and protocols for irrigation scheduling was also described.

Introducción

Los procedimientos tradicionales de programación del riego se basan en estimas de la evapotranspiración de los cultivos (Allen *et al.*, 1998) o bien en medidas de la humedad del suelo (Hanson *et al.*, 2000). La determinación de la evapotranspiración de los cultivos suele llevar asociadas ciertas incertidumbres debido a los efectos de la arquitectura del dosel vegetal, fracción de suelo sombreado y manejo del suelo. La estima de la evapotranspiración de plantaciones jóvenes o en situaciones de activa proliferación de malas hierbas crea adicionales posibilidades de error. Además, la ubicación de los sensores de humedad del suelo debe realizarse teniendo en cuenta la distribución y densidad de raíces, lo que incrementa la incertidumbre cuando la humedad del suelo varía en tres dimensiones como es el caso del riego localizado.

Por consiguiente, están adquiriendo una importancia creciente los sensores encaminados a programar el riego en base a medidas del estado hídrico de las plantas (Goldhamer y Fereres, 2001). Estas ideas derivan del hecho de que ni las medidas de humedad del suelo, ni las estimas

¹ Dpto. Sostenibilidad del Sistema Suelo-Planta-Atmósfera. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología (IRNAS-CSIC). Apartado 1052, E-41080 Sevilla, España. (e-mail: fmoreno@irnase.csic.es)

² Dpto. Riego. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CSIC). Apartado 164, E-30100 Espinardo (Murcia), España. (email: atorreci@cebas.csic.es)

³ Dpto. Ingeniería Agrícola. Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Venezuela

⁴ Unidad Asociada al CSIC de Horticultura Sostenible en Zonas Áridas (UPCT-CEBAS). E-30203 Cartagena (Murcia), España

⁵ Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola. Universidad de Sevilla, Sevilla, España

de la evapotranspiración de un cultivo reflejan de forma directa el estado hídrico de las plantas. Las propias plantas son el mejor indicador de su estado hídrico, ya que integran los efectos tanto del suministro de agua desde el suelo como de las condiciones climáticas (Jones, 2004). Además, los indicadores del estado hídrico basados en medidas en las plantas poseen la ventaja adicional de estar directamente relacionados con la productividad de los cultivos (Goldhamer *et al.*, 2003).

En la presente comunicación se pretende realizar una revisión de las investigaciones que venimos realizando sobre la utilización de medidas continuas del estado hídrico del limonero y olivo para su utilización en la programación del riego, abarcando, esencialmente, aspectos tales como la sensibilidad de distintos indicadores del estado hídrico medidos de forma continua o discontinua en las plantas, su significado fisiológico, la obtención de niveles de referencia de los indicadores y primeros resultados sobre programación del riego.

Indicadores del estado hídrico de las plantas

El potencial hídrico foliar es el indicador más utilizado para evaluar el estado hídrico de las plantas (Améglío *et al.*, 1999; Hsiao, 1990). Sin embargo, su interacción con los niveles de conductancia foliar dificulta el establecimiento de valores umbrales para la programación del riego. Situación por la que en la actualidad se ha difundido como alternativa el uso del potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}), medido en hojas cubiertas con aluminio y plástico, antes de ser cortadas, con lo que las pérdidas de agua vía transpiración quedan interrumpidas (Choné *et al.*, 2001; Naor, 2000; Shackel *et al.*, 1997).

No obstante, el uso de Ψ_{tallo} implica frecuentes desplazamientos a las parcelas de cultivo, el concurso de personal especializado para las medidas y otros gastos adicionales. Por ello, y en adición a la deseable sensibilidad del indicador para detectar cualquier cambio en el estado hídrico del cultivo, resultan deseables aquellos capaces de suministrar información en tiempo real y capaz de ser incorporada a autómatas de riego.

Por estas razones, en los últimos años se ha reactivado el interés de los investigadores por el uso de sensores capaces de medir de forma precisa, continua y automática el estado hídrico de los cultivos, destacando tanto las medidas de flujo de savia (FS) como las medidas de las variaciones micrométricas del diámetro del tronco (VDT).

Para las medidas de FS existen numerosos métodos de variada adecuación a cada tipo de cultivo y precisión. Para el caso concreto de los cultivos leñosos destacan los métodos basados en la técnica de compensación de pulso de calor (Green y Clothier, 1988). Este método calcula la velocidad del pulso de calor, medida con sensores de temperatura ubicados aguas arriba y aguas abajo de un calentador lineal, el cual se relaciona con las tasas de flujo de savia mediante factores de calibración.

Esta técnica es capaz de evaluar las tasas diarias de transpiración en limoneros jóvenes con una alta precisión en un amplio rango de tasas de flujo de savia (Alarcón *et al.*, 2005; Ortuño *et al.*, 2005). Sin embargo, en condiciones de déficit hídrico la influencia de los procesos de agotamiento y recarga de las capacitancias de los tejidos inducen sobreestimación de las tasas instantáneas de transpiración a primeras horas de la mañana y por la tarde, mientras que a mediodía se producen subestimaciones de la transpiración (Alarcón *et al.*, 2005). En el caso de árboles adultos de albaricoquero, las tasas de FS resultaron estrechamente relacionadas con la transpiración estimada mediante balance hídrico, aunque con una clara tendencia a subestimar la transpiración debido, posiblemente, a errores asociados a las metodologías de medida utilizadas (Nicolás *et al.*, 2005).

Desde 1994 el grupo del IRNAS de Sevilla lleva realizando estudios sobre la medida de flujo de savia en olivo, mediante la mencionada técnica de compensación de pulso de calor. El trabajo de Moreno *et al.* (1996) muestra los resultados de la medida del flujo de savia en olivo, por primera vez en el mundo, para la evaluación de la tasa de transpiración diaria. En la Figura 1, se muestra un ejemplo de la evolución diaria de la tasa de transpiración de un olivo regado. En la Figura 1 también se muestra la predicción realizada con la ecuación de Penman-Monteith, la cual concuerda bastante bien con la estimación a partir de la medida de flujo de savia. En esta misma figura también se muestran las componentes de los tres términos de la ecuación de Penman-Monteith, transpiración debida a la radiación directa de hojas soleadas, evaporación asociada al déficit de presión de vapor (D_a) en hojas soleadas y la asociada con D_a alrededor de hojas sombreadas (Moreno *et al.*, 1996).

A partir de este primer trabajo, Fernández *et al.* (2001) han continuado con estudios detallados para conocer la robustez y potencialidad de la técnica para el control automático del riego en el olivo y por supuesto en otros frutales. En el trabajo de Fernández *et al.* (2001) se realizaron experimentos de calibración de la técnica de medida de flujo de savia y del funcionamiento hidráulico del xilema del tronco y raíces, así como del uso de esta técnica para el diagnóstico del estrés hídrico. En la Figura 2 se muestran los resultados de flujo de savia en dos raíces principales de un olivo regado alternativamente en los dos sectores correspondientes a cada raíz. Estos resultados muestran la respuesta de las raíces a la disponibilidad de agua en el suelo.

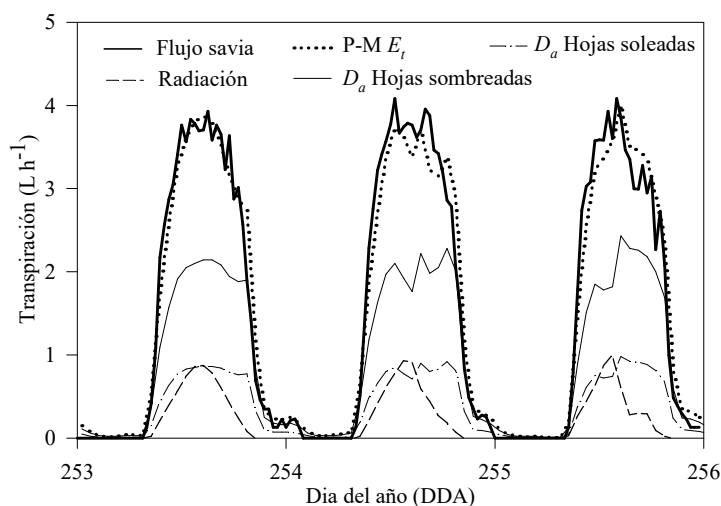


Fig. 1. Transpiración medida () y estimada por la ecuación de Penman-Monteith () en un olivo regado, durante los tres días siguientes al riego aplicado el DDA 252. Se muestran también los las componentes de los tres términos de la ecuación de Penman-Monteith: radiación (), déficit de presión de vapor (D_a) asociado a hojas soleadas () y este término asociado a hojas sombreadas (). (Adaptada de Moreno *et al.*, 1996).

Todos estos resultados han conducido al desarrollo de un controlador automático del riego basado en la medida de flujo de savia, cuyo primer prototipo se encuentra actualmente en fase de prueba.

Las medidas micrométricas de las VDT se realizan usando sensores de desplazamiento variable y respuesta lineal (LVDT) de alta precisión, dendrómetros, unidos al tronco mediante unas abrazaderas especiales hechas de invar, una aleación de níquel y hierro con un coeficiente de dilatación prácticamente nulo.

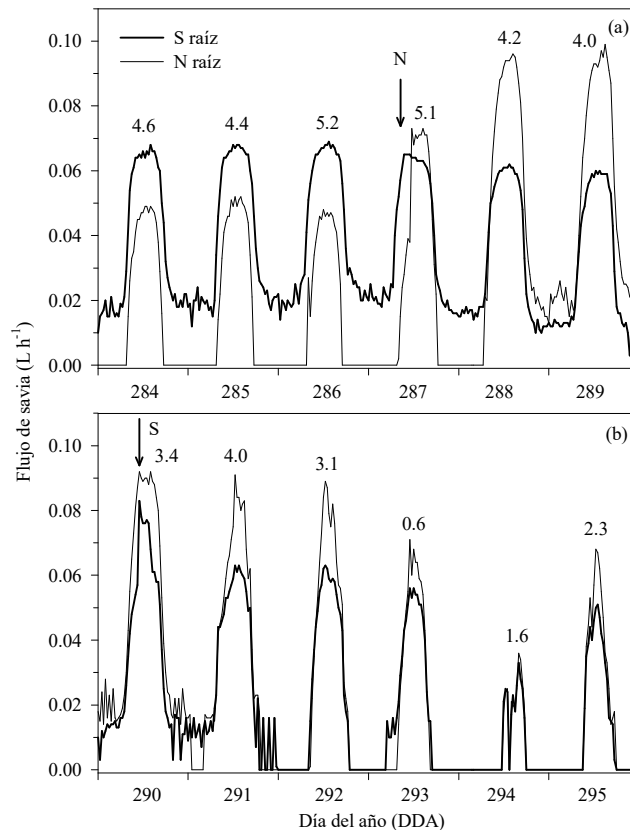


Fig. 2. Flujo de savia medido en una raíz de la parte norte (N raíz) y en la parte sur (S raíz) de un olivo. En (a) la flecha representa un riego de 70 mm aplicado en la parte norte del árbol el DDA 287; (b) la flecha representa un riego de 155 mm aplicado en la parte sur del árbol el DDA 290. El número encima de cada curva diaria es la ET_0 de ese día. (Adaptada de Fernández *et al.*, 2001).

El diámetro del tronco oscila en ciclos de 24 h, alcanzando valores máximos (MXDT) antes del alba y mínimos (MNDT) durante la tarde. La diferencia entre estos valores extremos se conoce como máxima contracción diaria (MXC). La evolución de los valores del MXDT y MNDT también suministra información de utilidad. Concretamente, la diferencia entre dos valores consecutivos del MXDT informa de la tasa diaria de crecimiento del tronco (CMXDT), y la consideración de los valores del MXDT en un determinado período informa del crecimiento acumulado.

El MNDT refleja el efecto combinado del suministro de agua desde el suelo y la demanda evaporativa sobre la máxima contracción, mientras que el MXDT resulta afectado por los procesos de rehidratación, los cuales dependen esencialmente del suministro de agua desde el suelo y sólo de manera indirecta de la demanda evaporativa del día precedente (Goldhamer y Fereres, 2001; Ortuño *et al.*, 2004a).

Tal y como puede verse en la Figura 3, el agua suministrada a los árboles desde el suelo tiene una influencia directa sobre los valores del máximo y mínimo diámetro del tronco. Además, cabe destacar que el déficit hídrico induce aumentos en los valores de la MXC, con la peculiaridad de que esta conducta se mantiene hasta que se sobrepasa un determinado nivel umbral de déficit hídrico (Potencial hídrico foliar antes del alba (Ψ_a) = - 1.0 MPa, en limoneros jóvenes), ya que a partir de ese nivel los valores de la MXC disminuyen (Figura 4).

Este último comportamiento fue confirmado en limoneros adultos encontrándose un umbral de Ψ_{tallo} de -1.8 MPa (Ortuño *et al.*, 2006b). Si bien hubiera sido de desear que la relación entre ambos parámetros correspondiese a un comportamiento lineal en un más amplio rango de déficit hídrico, no es menos cierto que los valores umbrales corresponden a niveles de estrés lo suficientemente importantes como para tener que tomar decisiones de riego con anterioridad.

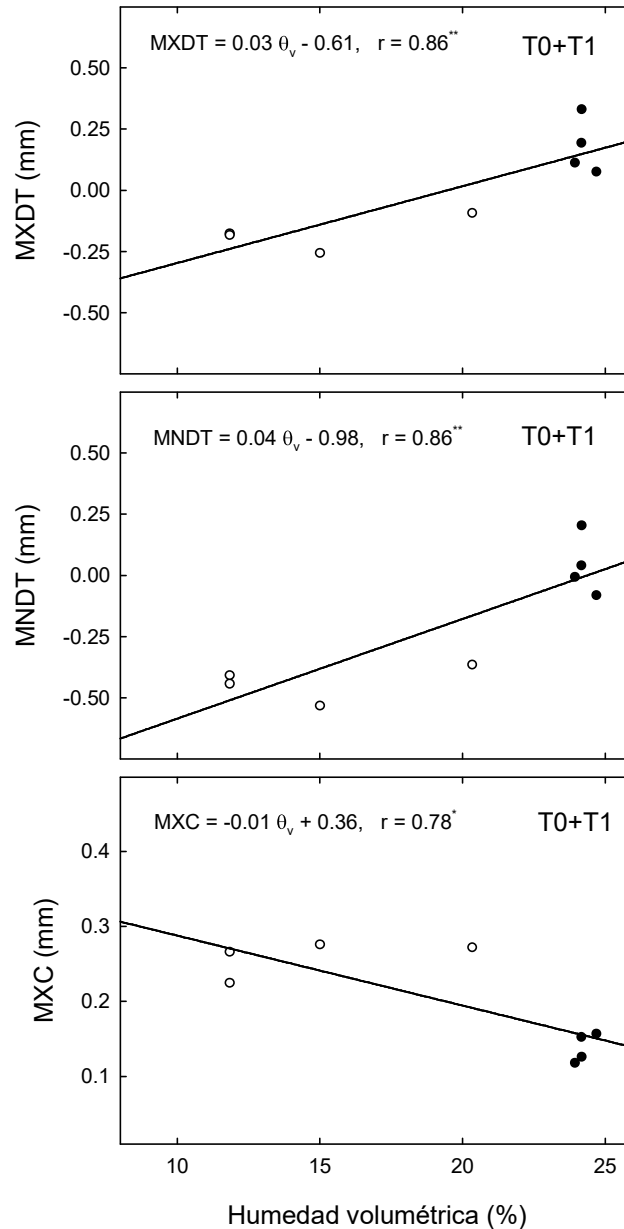


Fig. 3. Relación entre los niveles de humedad volumétrica del suelo (θ_v) y los valores del máximo (MXDT), mínimo diámetro del tronco (MNDT) y máxima contracción diaria (MXC) en limoneros jóvenes adecuadamente regados (\bullet , T0) y bajo déficit hídrico (\circ , T1).

Por otra parte, es importante resaltar que las plantas se encuentran de forma casi continua bajo déficit hídrico, incluso en casos en los que el suministro de agua desde el suelo es óptimo, ya que cambios en la demanda evaporativa de la atmósfera pueden inducir cambios en el estado hídrico de las plantas. De ahí que deba prestarse una especial atención a la interpretación de los niveles de cualquiera de los posibles indicadores del estado hídrico basados en medidas en las

plantas. Un determinado valor, en sí mismo, carece de significado si no es normalizado respecto a su correspondiente en plantas bajo condiciones no limitantes de suministro hídrico, que es lo que ha venido en denominarse *intensidad de señal* de un indicador (Goldhamer y Fereres, 2001).

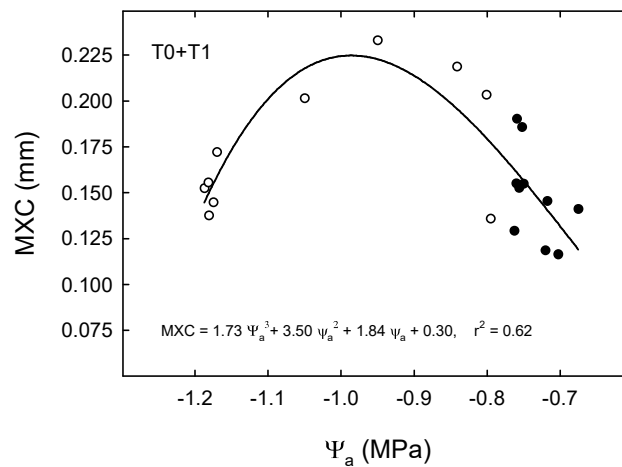


Fig. 4. Relaciones entre los niveles de potencial hídrico foliar antes del alba (Ψ_a) y los valores de la máxima contracción diaria (MXC) del tronco en limoneros jóvenes adecuadamente regados (●) y bajo déficit hídrico (o) (Adaptada de Ortuño *et al.*, 2004b).

Idoneidad de un indicador del estado hídrico para la programación del riego

Para que un indicador del estado hídrico de los cultivos pueda constituir una adecuada herramienta para la programación del riego debe de presentar una alta sensibilidad para diagnosticar cambios en el estado hídrico de las plantas, debiendo existir una determinada proporcionalidad entre la intensidad de señal del indicador y el nivel de estrés hídrico desarrollado.

Uno de los principales inconvenientes de la utilización de indicadores del estado hídrico basados en medidas en la planta es la considerable variabilidad entre árboles de las medidas realizadas (Ginestar y Castel, 1996; Naor, 2000). Por ello, es conveniente utilizar la metodología propuesta por Goldhamer *et al.* (2000) para caracterizar la relación *señal/ruido* de dichos indicadores, y poder comparar su utilidad para el manejo del riego.

Además del ya mencionado concepto de *intensidad de señal* se entiende por *ruido* la dispersión (coeficiente de variación, CV) del valor de ese indicador (Goldhamer y Fereres, 2001). La importancia de la relación *señal/ruido* deriva de que cuando la intensidad de la *señal* es suficientemente elevada, la variabilidad entre árboles (*ruido*) puede no ser tan crítica (Goldhamer y Fereres, 2001) y podría evitarse la instalación de un elevado número de sensores en cada parcela a estudiar, con el consiguiente encarecimiento del control automático del riego

A modo de ejemplo, en la Tabla 1 se recogen los datos correspondientes a la intensidad de señal de tres indicadores del estado hídrico (MXC, FS y Ψ_{tallo}), el ruido (coeficiente de variación) y la relación entre ambos durante 15 días de supresión del riego en limoneros adultos. Los tres indicadores presentaron niveles similares de ruido, y la MXC presentó una superior intensidad de señal que la observada para el FS y similar a la del Ψ_{tallo} . Esto indujo a que la mayor relación señal:ruido fuese la observada para la MXC, indicando su mayor adecuación para detectar una situación de déficit hídrico.

Tabla 1. Niveles medios de intensidad de señal, ruido y relación señal/ruido de la máxima contracción diaria del tronco (MXC), flujo de savia (FS) y potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) durante 15 días de supresión del riego en limoneros adultos. Los valores de intensidad de señal y ruido sin letras en común son significativamente diferentes según el test de la $LSD_{0,05}$ (Adaptada de Ortuño *et al.* 2006b)

Indicador	Señal media	Ruido medio	Señal/ruido
MXC	1.23a	0.055a	22.4
SF	1.10b	0.073a	15.1
Ψ_{tallo}	1.19ab	0.070a	17.1

Si bien resulta imprescindible que el indicador utilizado para la programación del riego posea una adecuada sensibilidad para detectar una situación de déficit hídrico, este indicador debe ser igualmente sensible para detectar la recuperación desde una situación de estrés. En este sentido, es importante resaltar que si bien el FS y la MXC son altamente sensibles para detectar la aparición de una situación de estrés hídrico (Ortuño *et al.*, 2004a; Ortuño *et al.*, 2004b; Ortuño *et al.*, 2006b), la respuesta del FS a la recuperación de un déficit hídrico es más lenta debido a la posible influencia de los procesos de recarga de las capacitancias, lo que le hace perder utilidad a los fines aludidos (Ortuño *et al.*, 2005).

Además, es importante conocer la respuesta de los posibles indicadores a utilizar frente a otras situaciones ambientales adversas. En este sentido, Ortuño *et al.* (2006a) demostraron como los indicadores del estado hídrico basados en medidas tanto continuas como discontinuas en las plantas presentan ante situaciones de exceso de agua en el suelo respuestas muy similares a las ocasionadas por un déficit hídrico. Por esta razón, un autómata para la programación del riego en base a un indicador del estado hídrico medido en las plantas debe de recibir información complementaria procedente de sensores de humedad del suelo y/o climáticos capaces de permitir al autómata discernir la causa inductora de modificaciones en los valores del indicador.

Obtención de niveles de referencia

Los necesarios valores de referencia de cualquier indicador para la normalización de sus valores u obtención de la intensidad de señal, puede realizarse de dos maneras diferentes: i) mantener en la misma plantación algunos árboles de referencia sin ninguna limitación de riego, y ii) desarrollar líneas de base entre los valores del indicador seleccionado en árboles bajo condiciones no limitantes de suministro hídrico y parámetros relacionados con la demanda evaporativa de la atmósfera. Con las relaciones obtenidas se puede acceder a conocer el valor de referencia del indicador a partir de los parámetros climáticos que más convenga, aunque deben de ser usadas dentro de sus límites de confianza.

Ortuño *et al.* (2006c) encontraron en limoneros que el FS y el Ψ_{tallo} correlacionan mejor con la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) (Figura 5), mientras que la MXC lo hace con la temperatura media diaria (Figura 6). En un trabajo similar, Moreno *et al.* (2006) indicaron que en olivos la MXC correlaciona mejor con los valores al mediodía del déficit de presión de vapor y la temperatura del aire ($MXC = -0.78 + 0.04 T_{md}$, $r^2 = 0.786$; $MXC = -0.07 + 0.13 VPD_{md}$, $r^2 = 0.825$).

En relación a dichos comportamientos, hubiera sido de esperar que los parámetros medidos a lo largo del día (SF y MXC) correlacionasen mejor con los indicadores de la demanda evaporativa medidos a lo largo del día, mientras que el Ψ_{tallo} debería haberse relacionado mejor con las variables climáticas medidas a mediodía.

Programación del riego

Para programar el riego se ha de seleccionar un determinado valor umbral de intensidad de señal del indicador utilizado. Para realizar de forma adecuada la selección de este valor umbral se ha de conocer la trascendencia agronómica y fisiológica de distintas intensidades de señal. De esta manera, se podrá seleccionar un determinado valor umbral para programar el riego pudiendo prever el ahorro de agua y el impacto en la cosecha y calidad de la fruta.

Goldhamer y Fereres (2001) propusieron distintos protocolos para el riego de cultivos leñosos tanto jóvenes como adultos: En el caso de árboles adultos con riego de alta frecuencia de aportes (cada dos días o menos) sugirieron el siguiente proceso: i) Seleccionar una fecha de comienzo y aplicar una determinada dosis de riego y, ii) Cuando la intensidad de señal exceda el valor umbral tres días consecutivos la dosis de riego se aumenta un 10 %. En el caso contrario, el riego se disminuye un 10 %. Aunque los cortos periodos de tiempo para programar el riego son aconsejables, otros autores como Vélez (2004) propusieron procedimientos similares pero con programaciones semanales.

Son escasos los trabajos existentes en la bibliografía en los cuales se evalúe la respuesta de cultivos leñosos a la programación del riego con indicadores del estado hídrico, y además adolecen de falta de continuidad durante varios años.

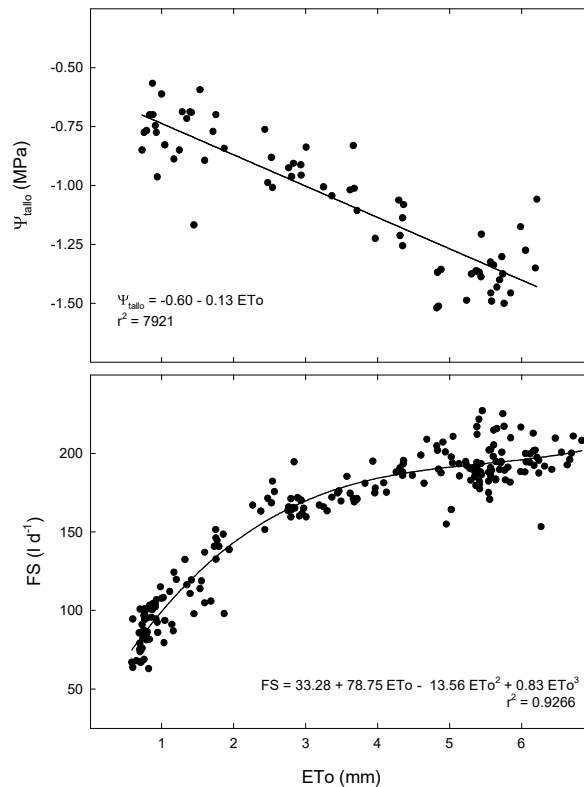


Fig. 5. Relaciones entre ET_0 y, potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallos}) y tasas diarias de flujo de savia (FS) en limoneros adultos bajo condiciones no limitantes de riego (Adaptada de Ortuño *et al.*, 2006c).

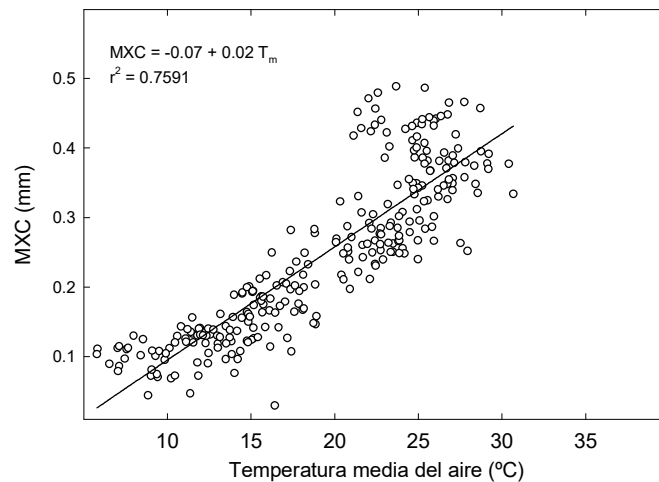


Fig. 6. Relación entre la temperatura media diaria y la máxima contracción diaria (MXC) de los troncos de limoneros adultos bajo condiciones no limitantes de riego (Adaptada de Ortuño *et al.*, 2006c)

En este sentido, en 1989 Li *et al.* señalaron las ventajas en melocotonero de la programación del riego en función del valor de la máxima contracción diaria del tronco (MXC) en relación a la programación en función de las lecturas de tensiómetros en el suelo y de una estrategia de riego deficitario. Posteriormente, Goldhamer y Fereres (2004) compararon en almendro distintos tratamientos de riego programados en función de valores umbrales de la intensidad de señal de la MXC, demostrando que era posible programar el riego en base exclusivamente a medidas de dicho indicador del estado hídrico.

Recientemente, Vélez (2004) en clementina de Nules durante dos años comparó dos tratamientos regados a distintos umbrales de intensidad de señal de la MXC respecto de un control regado en función de las lecturas de la ETC de un lisímetro de pesada. Los resultados ratificaron la idea de la posibilidad de programar el riego en base exclusivamente de las medidas de la MXC, así como de programar niveles de riego deficitario con mínimos impactos en la cosecha, disminución de los riesgos de contaminación por drenaje y ahorros de energía

En la actualidad, nuestro grupo de trabajo está realizando un ensayo de programación del riego en limonero con muy prometedores resultados, ratificando, una vez más, la posibilidad de programar el riego en base a la MXC y obteniendo aceptables ahorros de agua sin afectar la cosecha ni la calidad del limón (Y. García-Orellana, comunicación personal).

Si bien todavía son numerosas las interrogantes por resolver, no cabe la menor duda que estos resultados demuestran que es posible programar el riego en función exclusivamente de las medidas de parámetros indicadores del estado hídrico de las plantas, tales como la MXC, y abren un espectacular futuro a esta línea de investigación y a sus posibilidades de aplicación en la programación precisa del riego.

Bibliografía

- Alarcón, J.J., Ortuño, M.F., Nicolás, E., Torres, R., Torrecillas, A., 2005. Compensation heat-pulse measurements of sap flow for estimating transpiration in young lemon trees. *Biología Plantarum* 49: 527-532.
- Allen, R.G., Pereira, R.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage* 56, FAO, Roma.

- Améglío, T., Archer, P., Cohen, M., Valancogne, C., Daudet, F.A., Dayau, S., Cruziat, P., 1999. Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant and Soil* 207: 155-167.
- Choné, X., van Leeuwen, C., Dubourdieu, D. Gaudillère, J.P., 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany* 87: 477-483.
- Fernández, J.E., Palomo, M.J., Díaz-Espejo, A., Clothier, B.E., Green, S.R., Girón, I.F., Moreno, F., 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management* 51: 99-123.
- Ginestar, C., Castel, J.R., 1996. Utilización de dendrómetros como indicador de estrés hídrico en mandarinos jóvenes regados por goteo. *Riegos y Drenajes XXI* 89: 40-46.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science* 20: 115-125.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science* 23: 11-19.
- Goldhamer, D., Fereres, E., Cohen, M., Girona, J., Mata, M., 2000. Comparison of continuous and discrete plant-based monitoring for detecting tree water deficits and barriers to grower adoption for irrigation management. *Acta Horticulturae* 537: 431-445.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., Salinas, M., 2003. Can almond trees directly dictate their irrigations needs?. *California Agriculture*. 57: 138-144.
- Green, S.R. Clothier, B.E., 1988. Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat-pulse technique. *Journal of Experimental Botany* 39: 115-123.
- Hanson, R.B., Orloff, S., Peters, D., 2000. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. *California Agriculture* 54: 38-42.
- Hsiao, T.C., 1990. Measurements of plant water status. In *Irrigation of agricultural crops* (Monograph no. 30). Eds. B A Stewart and D R Nielsen. pp. 243-279. American Society of Agronomy, Madison.
- Jones, H.G., 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* 55: 2427-2496.
- Li, S.H., Huguet, J.G., Bussi, C., 1989. Irrigation scheduling in a mature orchard using tensiometers and dendrometers. *Irrigation and Drainage Systems* 3: 1-12.
- Moreno, F., Conejero, W., Martín-Palomo, M.J., Girón, I.F., Torrecillas, A., 2006. Maximum daily trunk shrinkage reference values for irrigation scheduling in olive trees. *Agricultural Water Management* (Enviado a publicar).
- Moreno, F., Fernández, J.E., Clothier, B.E., Green, S.R., 1996. Transpiration and root water uptake by olive trees. *Plant and Soil* 184: 85-96.
- Naor, A., 2000. Midday stem water potential as a plant water stress indicator for irrigation scheduling in fruit trees. *Acta Horticulturae* 537: 447-454.
- Nicolás, E., Torrecillas, A., Ortuño, M.F., Domingo, R., Alarcón, J.J., 2005. Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements. *Agricultural Water Management* 72: 131-145.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A., 2004a. Comparison of continuously recorded plant-based water stress indicators for young lemon trees. *Plant and Soil* 267: 263-270.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A., 2004b. Interpreting trunk diameter changes in young lemon trees under deficit irrigation. *Plant Science* 167: 275-280.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A., 2005. Sap flow and trunk diameter fluctuations of young lemon trees under water stress and rewatering. *Environmental and Experimental Botany* 54: 155-162.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A., 2006a. Water status indicators of lemon trees in response to flooding and recovery. *Biología Plantarum* (En prensa).

- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Torrecillas, A., 2006b. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees-Structure and Function* 20: 1-8.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Mounzer, O., Alarcón, J.J., Torrecillas, A., 2006c. Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. *Plant and Soil* 279: 229-242.
- Shackel, K.A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D., Gurusinghe, S., Hasey, J., Kester, D., Krueger, B., Lampinen, B., McGourty, G., Micke, W., Mitcham, E., Olson, B., Pelletrau, K., Philips, H., Ramos, D., Schwankl, L., Sibbett, S., Snyder, R., Soutwick, S., Stevenson, M., Thorpe, M., Weinbaum, S., Yeager, J., 1997. Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTechnology* 7: 23-29.
- Vélez, J.E., 2004. Programación de riego en cítricos en base a sensores de medida del estado hídrico del suelo y la planta. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. 113 pp.