

Utilización de sensores en planta para la programación del riego

Sensores del estado hídrico de la planta: variaciones del diámetro del tronco y medida del flujo de la savia

En los últimos años, ha quedado claro que el riego deficitario puede maximizar la producción por unidad de agua aplicada. Ahora bien, su éxito es altamente dependiente del correcto desarrollo del déficit hídrico en la planta, por lo que se deberá atender tanto al momento en el que debe ocurrir como a su duración e intensidad. Para ello, es fundamental poder contar con indicadores de estrés hídrico que sean robustos y sensibles a los cambios del estado hídrico de la planta y/o del suelo.

R. Domingo^{1,3}, P.A. Nortes¹, G. Egea¹, R. Torres², A. Pérez-Pastor^{1,3}.

¹Departamento de Producción Vegetal. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica (ETSIA-UPCT).

²Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial (ETSII-UPCT).

³Unidad Asociada al CSIC de Horticultura Sostenible en Zonas Áridas (UPCT-CEBAS).

En España, donde el clima predominante es de tipo mediterráneo, la escasez e irregularidad de las precipitaciones, unidas a la alta demanda evaporativa, son las causas del desarrollo de fuertes déficit hídricos estacionales. Bajo estas circunstancias y sin el necesario complemento de agua de riego, el cultivo de frutas y hortalizas es raramente rentable, a pesar del clima propicio para la producción de los cultivos. De ahí el gran valor otorgado al agua como factor de producción y condicionante del buen aprovechamiento de otros recursos puestos hoy a disposición de la agricultura.

El sector agrícola, con sus 3,3 millones de hectáreas en regadío, utiliza alrededor del 70% de los recursos hídricos totales, porcentaje elevado según otros sectores que basan su expansión en una disponibilidad creciente de agua. Si a esta mayor competencia por los recursos unimos sus costes elevados y crecientes, la pérdida de calidad por contaminación y/o salinización, la sequía actual con los embalses a niveles mínimos y las previsiones de disminución de las precipitaciones, es evidente que todo aquello que pueda contribuir a mejorar la productividad del agua en nuestros regadíos será bienvenido.

Programación del riego en plantaciones frutales

Una de las técnicas fundamentales para que el agua de riego sea manejada eficientemente es la programación de riegos. La decisión en cada caso particular de la cantidad de agua aplicar y del momento adecuado para efectuar un riego no es fácil y requiere de la visión integral del conjunto suelo-planta-atmósfera, considerando, además, el sistema de riego.

Aunque los sistemas de riego localizado han contribuido sobremanera al ahorro de agua en la agricultura (de ahí el interés de su mayor implantación), es necesaria la puesta a punto de nuevos métodos de programación y de ayuda a la toma de decisiones que permitan mantener la competitividad de nuestras explotaciones.

Actualmente el método más utilizado para determinar las necesidades máximas de agua del cultivo (ETc), y por lo tanto para la elaboración de los programas de riego, se basa en el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo) —el modelo recomendado es el de Penman-Monteith— y en la aplicación de un coeficiente empírico (Kc) dependiente de la especie, superficie cubierta y características físicas del medio ambiente. Cuando se dispone de los valores de Kc correspondientes a árboles adultos y el porcentaje de suelo sombreado por el cultivo a regar es inferior al 60-70%, se aplica, además, un coeficiente reductor (Kr) que viene dado en función de dicho porcentaje de cobertura. De este modo, la ecuación para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo viene dada por:

$$ETc = ETo \times Kc \times Kr$$

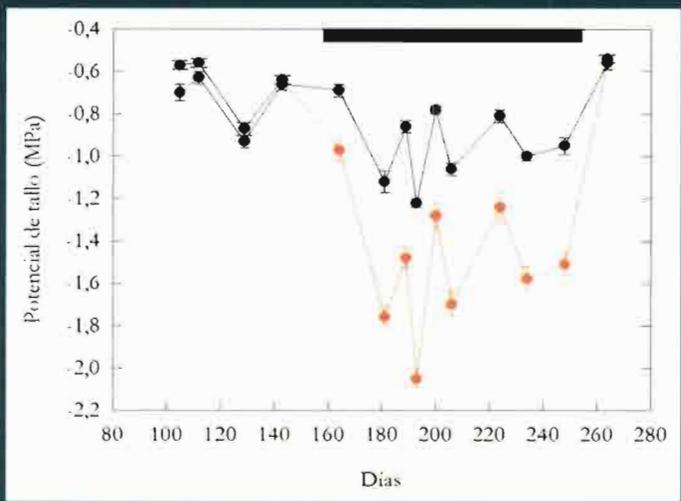
Sin embargo e independientemente del uso generalizado, el método presenta algunas lagunas que pueden reducir la precisión de la programación del riego, entre ellas:



Foto 1. Cámara de presión y secuencia del proceso de medida del potencial hídrico de hoja cubierta.

FIGURA 1.

Evolución estacional del potencial de tallo a mediodía en almendros 'Marta'. Árboles con riego al 100% ETC (●) y en riego deficitario controlado (100-50-100% ETC). La barra horizontal muestra el período de déficit hídrico al 50% de la ETC.



1. El no disponer de un conjunto de valores de K_r para los distintos cultivos, lo que dificulta la determinación de las necesidades de agua en árboles con cobertura parcial.

2. La utilización de valores de E_{To} de la semana anterior para la programación de la semana entrante, desfase que puede dar lugar tanto a situaciones de exceso como de infradotación hídrica bajo condiciones climáticas cambiantes, especialmente en suelos de baja capacidad de retención hídrica y con bajos porcentajes de humedecimiento del suelo. Además, aportes equivalentes a las máximas necesidades de agua del cultivo no tienen por qué implicar óptimos beneficios.

Si a las incertidumbres propias del método se unen las asociadas a la estima de la precipitación efectiva, profundidad radicular, etc., los errores acumulados pueden dar lugar a dotaciones tanto por exceso como por defecto. De ahí que en los últimos años y con el propósito de mejorar la eficiencia de uso del agua y el control automático del riego hayan surgido nuevas técnicas de ayuda a la programación, especialmente dirigidas a los sistemas de riego localizado por su mayor precisión en la aplicación del agua.

► Sensores del estado hídrico de la planta

Desde antiguo se ha considerado que el método ideal para el control del riego era utilizar la propia planta como detector de sus necesidades hídricas, al integrar ésta las condiciones de su entorno, clima y suelo. Sin embargo, son muy escasas las explotaciones comerciales que se apoyan en la medida de parámetros relacionados con el estado hídrico de la planta para el manejo del riego.

Uno de los indicadores tradicionales del estado energético del agua en la planta es el potencial hídrico foliar (Ψ), y las medidas más útiles con fines de diagnóstico, las realizadas al alba (Ψ_a) y a mediodía, estas últimas en hojas cubiertas (Ψ_t), con cámara de presión (foto 1). Distintos autores, trabajando con especies leñosas, han señalado la alta sensibilidad de ambos parámetros al régimen de riego y su relación con la respuesta productiva, sugiriendo su uso como indicadores de referencia en estudios tendientes a evaluar la idoneidad de nuevos indicadores de estrés hídrico de

la planta. En este contexto y a modo de ejemplo, se muestra la evolución estacional del potencial de hoja cubierta (Ψ_t) en un ensayo de riego deficitario controlado (RDC) en almendro (figura 1 y foto 1). La reducción del riego al 50% del control produjo una rápida disminución de Ψ_t , con valores mínimos a los pocos días del cambio de riego y el mantenimiento de los mismos durante el resto del período de déficit. Igualmente, la reanudación del riego al 100% de la ETC produjo un claro cambio de tendencia en Ψ_t , alcanzándose valores similares a los del control.

Aunque el método más práctico para la medida de Ψ es la cámara de presión (foto 1), presenta el inconveniente de la laboriosidad de las medidas y el no estar adaptado para el registro de datos en continuo, y por tanto para la automatización del riego. Por ello y gracias a los avances en las técnicas de medida y al desarrollo de la informática, varios grupos de investigación dedican sus esfuerzos a la puesta a punto de nuevas técnicas de programación en base a la información continua y en tiempo real suministrada por sensores colocados en planta.

Dentro de esta línea de investigación, las técnicas que han experimentado mejoras más notables han sido las relativas a las medidas de:

1. Las variaciones continuas de diámetro de tronco y ramas (VCD), mediante el uso de sensores de desplazamiento variable y respuesta lineal, LVDT (foto 2).
2. De flujo de savia en tronco y ramas principales (foto 3 y figura 2).

4ª Feria de la Tecnología Agraria del Mediterráneo

del 19 al 22 de Enero de 2006

PALACIO FERIAL DE LA PROVINCIA DE ALICANTE
Ctra. N-340 Km. 731 Aptdo. 192 • 03200 EL CHE (Alicante)
Tel. 966 657 600 • Fax 966 657 631
Autovía A-7 Murcia-Murcia
<http://www.feriaalicante.com> • Email: ifa@feriaalicante.com

GENERALITAT VALENCIANA
CRAM



Foto 2. Parcela experimental de almendros 'Marta' (ETSIA-UPCT). Detalle de colocación de los sensores LVDT en tronco y equipo de almacenamiento de datos para el control del riego.



Foto 3. Almendros 'Marta' cultivados en maceta y detalle de colocación del sensor de flujo de savia y de las balanzas utilizadas para las medidas de transpiración.

Variaciones de diámetro

A partir de las lecturas continuas de diámetro obtenidas con sensores LVDT (dendrómetros) se pueden obtener distintos parámetros, si bien, han sido la máxima contracción diaria (MCD) y la pendiente de crecimiento de tronco (CD) las que han despertado mayor interés como indicadores del estado hídrico del árbol.

MCD se obtiene por diferencia entre el máximo diámetro registrado por la mañana y el mínimo observado al atardecer (figura 3) y viene a representar el aporte de agua del floema a la transpiración. Como las paredes celulares de los tejidos vivos son flexibles, pequeñas pérdidas o ganancias de agua en respuesta a gradientes de potencial hídrico pueden originar que el tronco o las ramas se contraigan o se dilaten en función de la variación de volumen.

El crecimiento diario de tronco o ramas (CD) viene dado bien por la diferencia entre los máximos diámetros de días consecutivos o bien por la pendiente de la recta de éstos frente al tiempo si se desea el valor medio de un período de tiempo.

Así, en la figura 3 se puede observar cómo el diámetro de tronco se contrae de forma clara durante el período del día de mayor radiación y cómo las contracciones diarias son mayores en el tratamiento de déficit hídrico moderado. De igual modo, la figura 3

muestra la inhibición del crecimiento de tronco por efecto del déficit hídrico, como consecuencia de la reducción de los aportes durante el período de riego deficitario (días 160-210).

Diferentes investigadores, a partir de ensayos tendientes a estudiar la sensibilidad de distintos sensores e indicadores al déficit hídrico en árboles frutales, han indicado la mayor sensibilidad de MCD y CD en comparación a otros parámetros tradicionales como el potencial hídrico y la conductancia foliar. Ahora bien, el interés de utilizar uno u otro va a estar determinado, en gran medida, por las tasas de crecimiento del árbol. Así, en plantaciones adultas con bajas tasas de crecimiento se desaconseja el uso de CD; todo lo contrario al caso de plantaciones jóvenes donde el objetivo sea maximizar su crecimiento de cara a una pronta entrada en producción.

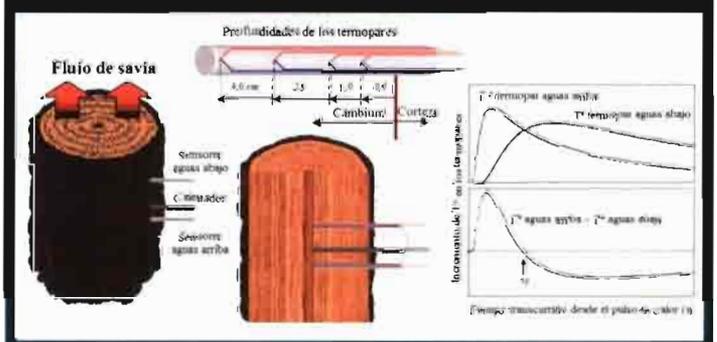
Flujo de savia

La medida continua del flujo de savia en tronco o ramas permite estimar la transpiración o consumo de agua por la planta en cada momento. Una técnica frecuentemente empleada se basa en el método de compensación del pulso de calor, consistente en seguir la velocidad de desplazamiento de un pulso de calor emitido por una fuente térmica introducida en el recorrido de la savia. El tiempo transcurrido entre la emisión del pulso de calor y la recepción de éste por un sensor dispuesto aguas abajo permite calcular el tiempo invertido por la savia en recorrer esa distancia. Para distinguir entre el efecto de convección por movimiento de la savia y el transporte de calor por conducción térmica, se colocan asimétricamente un sensor aguas abajo y otro aguas arriba del calentador (figura 2 y foto 3).

El equipo de medida registra los tiempos en los que se igualan las temperaturas de los termopares situados aguas arriba y abajo del calentador (t_0). Con estos valores y las distancias de instalación de los termopares al calentador se estima la velocidad del pulso de calor en cada profundidad. La conversión de velocidad del pulso de calor a flujo de savia total requiere de la estima de las propiedades físicas de la matriz leñosa y de la superficie de madera conductora.

FIGURA 2.

Disposición de termopares y calentador en tronco para la medida de flujo de savia por el método de compensación de pulso de calor, y detalle de la evolución de las temperaturas aguas arriba y aguas abajo del calentador, con indicación del tiempo de corte (t_0).



MLT : la cultura del trabajo ~~bien hecho~~

mejor



manipulando paja



limpiando granjas



ensilando



cargando cereales

La cultura del trabajo bien hecho significa optimizar todas las tareas de la finca con más rapidez y más eficacia que nunca.

Esté manipulando paja, o ensilando, limpiando las granjas, cargando camiones, manejando estiércol o manipulando cereales, MLT trabajará más horas que cualquier otra máquina de su finca.

Sus prestaciones hidráulicas, su fuerza, su seguridad y su maniobrabilidad son todas las características que hacen de Manitou el líder en agricultura.

Para saber más sobre la gama MLT, no dude en contactar con nosotros :

MANITOU BF Oficina de información en España

Centro operativo: Avenida Central, 37 - 28120 Ciudad Santo Domingo (Madrid)

Tel. 91 622 13 24 - Fax 91 622 17 49 - E-mail: comercial@manitou.fr www.manitou.com

 **MANITOU**

FIGURA 3.

a) Variaciones de diámetro de tronco (VDT) en almendros 'Marta'. Árboles con riego al 100% ETC (—) y en riego deficitario controlado (100-50-100% ETC) y detalle comparativo de MCD durante el periodo de déficit.
b) Evolución de la radiación global y del diámetro de tronco, con indicación de los parámetros máxima contracción y crecimiento diario de tronco.

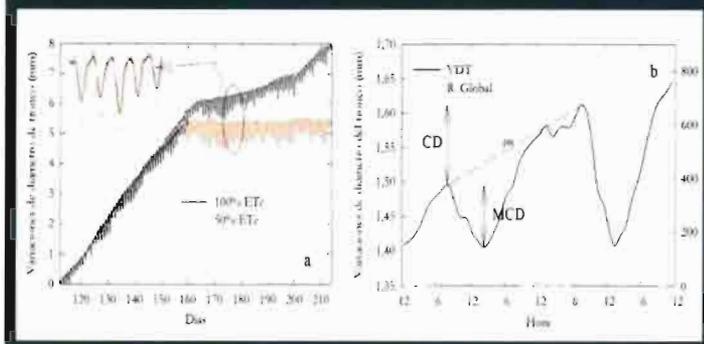
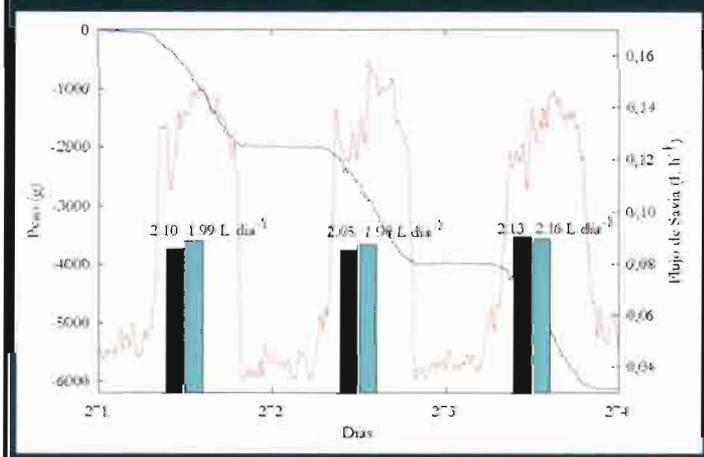


FIGURA 4.

Evolución de flujo de savia (—), pérdida de agua por transpiración (—), y consumos diarios por compensación de pulso de calor (■) y balance hídrico (■).



Un ejemplo sacado de un estudio de calibración de la técnica de medida del flujo de savia y realizado por nuestro grupo en almendros en maceta (foto 3) permite ilustrar el comportamiento hídrico de la planta a partir de este tipo de medidas. Así, en la figura 4 se recogen las evoluciones de las tasas de flujo de savia y pérdida de agua por transpiración durante tres días, bajo condiciones iniciales de humedad a capacidad de campo, sin aportes adicionales de riego y suelo cubierto con lámina plástica para evitar pérdidas de agua por evaporación. La similitud de las condiciones reinantes del entorno clima y suelo en los tres días mostrados se refleja en tasas de flujo de savia y transpiración semejantes, con valores máximos alrededor de mediodía y próximos a cero por la noche, coincidiendo con medidas de transpiración prácticamente nulas.

Aunque la técnica de medida de flujo de savia por compensación de pulso de calor posee una base teórica sólida y son muchos los trabajos que manifiestan su sensibilidad al consumo de agua por la planta y su interés como indicador del estado hídrico de la planta, presenta, actualmente, algunos inconvenientes de cara a su utilización en la programación automática del riego.

Entre ellos:

- Su laboriosa y precisa instalación.
- La pérdida de sensibilidad de las medidas con el tiempo, lo que obliga a un seguimiento permanente e instalación de nuevas sondas.
- La escasa precisión en condiciones de bajo flujo, horas nocturnas.
- La alta variabilidad encontrada.
- La ausencia de valores umbrales para su uso.

Independientemente de los inconvenientes atribuibles a ambas técnicas, su uso potencial ha dado lugar a propuestas de protocolos de programación del riego que quedan recogidos en la bibliografía referenciada y que, a modo de resumen y para el caso de árboles adultos en riego localizado, consisten en:

1. Registrar los valores de referencia de MCD (MCD_r = valores correspondientes a árboles bajo condiciones no limitantes de agua) a lo largo de la campaña de riego.
2. Establecer los valores umbrales de MCD (MCD_u) relativos a MCD_r en base a los objetivos del riego (por ejemplo, $MCD_u = 1,5 MCD_r$, para los períodos menos sensibles al déficit hídrico en plantaciones en riego deficitario controlado).
3. Iniciar la campaña de riegos con un programa previamente establecido por métodos tradicionales.
4. Registrar MCD de la plantación y compararla con MCD_u de modo que, cuando la MCD de 3-4 días consecutivos exceda o no alcance la MCD_u , las dosis de riego aumenten o disminuyan en un porcentaje fijado.

Consideraciones finales

Aunque la utilización de sensores en planta para la programación automática del riego presenta algunas dificultades de índole práctica, no es menos cierto que la alta sensibilidad de determinados indicadores de estrés hídrico ha contribuido a la elaboración de estrategias de riego con altas eficiencias de uso del agua. Ahora bien, con el objetivo de poder ser utilizados a nivel de explotación comercial, es necesario disponer de una plataforma de programación que se encargue de la lectura de sensores, ejecución de sentencias y actuación sobre el programa de riego preestablecido, tema que resulta de gran interés para los investigadores de este grupo. ■

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la financiación recibida para esta línea de investigación a través de los proyectos CICYT (AGL2002-04048-C03-02) y PTRI (PTR1995-0693-OP-02-02).

Bibliografía

- Alarcón, J.J., Domingo, R., Green, S., Sánchez-Blanco, M.J., Rodríguez, P., Torrecillas, A. 2000. Sap flow measurement as an indicator of transpiration in young apricot trees. *Plant and Soil*. 227, 77-85.
- Fereres, E., Goldhamer, D.A., 2000. Avances Recientes en la Programación de los Riegos. *Ingeniería del Agua*. 7 (1), 47-54.
- 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. *Irrig. Sci.* 20, 115-125.
- Nortes, R.A., Pérez-Pastor, A., Egea, G., Conejero, W., Domingo, R. 2005. Comparison of changes in stem diameter and water potential values for detecting water stress in young almond trees. 77, 296-307.