

IRRIGATION SCHEDULING OF PEACH TREES (*Prunus persica* L.) BY CONTINUOUS MEASUREMENT OF SOIL WATER STATUS

PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN MELOCOTONEROS (*Prunus persica* L.) MEDIANTE MEDICIÓN CONTINUA DEL STATUS HÍDRICO DEL SUELO

Oussama H. Mounzer¹, Juan Vera^{1,2}, Luis M. Tapia³, Yelitza García-Orellana⁴, Wenceslao Conejero¹,
Isabel Abrisqueta¹, Ma. Carmen Ruiz-Sánchez^{1,2}, José Ma. Abrisqueta-García^{1,2*}

¹Departamento de Riego. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC). 30100. Espinardo, Murcia, España. (jmabrisq@cebas.csic.es). ²Unidad Asociada al CSIC de Horticultura Sostenible en Zonas Áridas (UPCT-CEBAS). ³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP). Uruapan, México. ⁴Departamento de Ingeniería Agrícola. Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Venezuela.

ABSTRACT

Continuous real time soil moisture measurements facilitate the control of soil water availability for plants. The aim of this research was to study soil water content in two irrigation treatments and its effect on the physiological response of young peach trees (*Prunus persica* (L.) Batsch cv. Flordastar) during one growing season. The irrigation treatments were: T-1, scheduled to fulfil crop water requirements (100% E_{Tc}, according to FAO, Penman-Monteith methodology), and T-2, in which irrigation doses and frequency are adjusted continuously to maintain the water content in the main root zone (0-50 cm depth) at +10% to -5% field capacity, as indicated by the continuous measurement of the soil water content by capacitance Frequency Domain Reflectometry (FDR) probes. After irrigation, the different phases of soil water depletion in the root zone were defined according to the evaporation and root absorption processes. The first two phases, which occurred during daylight, included a rapid decrease in the soil water content (149 to 129 mm 0.5 m⁻¹); a third phase of slower soil water depletion (129 to 127 mm 0.5 m⁻¹) occurred during the night, and a fourth involved a rapid decrease (127 to 122 mm 0.5 m⁻¹), followed by a slight recovery, also during the night. A comparative study of the soil-plant water status patterns observed in the two treatments during one growing season was made. The irrigation treatment scheduled according to capacitance probe measurements provided a saving of 18% of irrigation water with respect to the conventional scheduled treatment and had no effect on total yield or vegetative growth of young peach trees.

Key words: *Prunus persica* L. Batsch, capacitance probe, drip irrigation scheduling, soil-plant water relationship, soil water content measurement.

RESUMEN

La medición continua de la humedad del suelo en tiempo real facilita el control de la disponibilidad de agua del suelo para las plantas. El objetivo de esta investigación fue el estudio del contenido de agua del suelo en dos sistemas de riego y su efecto en la respuesta fisiológica de árboles jóvenes de durazno (*Prunus persica* (L.) Batsch cv. Flordastar) durante una temporada de cultivo. Los sistemas de riego fueron: T-1, diseñado para satisfacer los requerimientos de agua para cultivo [100% E_{Tc} (evapotranspiración del cultivo), según la FAO, metodología de Penman-Monteith], y T-2, en el que las dosis y la frecuencia de riego se ajustan continuamente para mantener el contenido de agua en la parte central de la raíz (0-50 cm de profundidad) a entre +10% y -5% de la capacidad de campo, como lo muestran las mediciones continuas del contenido de agua del suelo mediante sondas capacitivas FDR (Frequency Domain Reflectometry). Después del riego, las distintas etapas de agotamiento de agua del suelo en la zona radicular se determinaron en función de la evaporación y de los procesos de absorción radicular. En las dos primeras etapas, que tuvieron lugar durante el día, se registró un rápido descenso en el contenido de agua del suelo (de 149 a 129 mm 0.5 m⁻¹); durante la noche hubo una tercera etapa de disminución de agua del suelo, que fue más lenta (de 129 a 127 mm 0.5 m⁻¹), y hubo una cuarta con un descenso rápido (de 127 a 122 mm 0.5 m⁻¹) seguida de una ligera recuperación, también por la noche. Se realizó un estudio comparativo de los modelos de comportamiento agua-suelo-planta observados en los dos sistemas durante una temporada de cultivo. El sistema de riego programado a partir de instrumentos de medición de capacitancia generó un ahorro de 18% de agua de riego con respecto al convencional y no influyó en el rendimiento total ni en el crecimiento vegetativo de árboles jóvenes de durazno.

Palabras clave: *Prunus persica* L. Batsch, sonda capacitiva, sistema de riego por goteo, relación agua-suelo-planta, medición del contenido de agua del suelo.

* Author for correspondence ❖ Autor responsable.

Received: September, 2007. Approved: June, 2008.

Published as ARTICLE en *Agrociencia* 42: 857-868. 2008.

INTRODUCTION

Peach (*Prunus persica* (L.) Batsch) is one of the most widely cultivated and important deciduous fruit trees in the world. Spain is the fourth producer of peaches after China, Italy and the United States, with 1.2 million metric tonnes per year (FAO, 2006). About 70% is consumed fresh in Spain, 20% is processed (canned, juice, jam or dried), and 10% is exported as fresh fruit.

Beginning with the first studies on irrigation in deciduous fruit trees, authors have generally agreed that irrigation provides three main benefits: improved tree growth (Frecon, 2002), increased yield (Bryla, 2004) and increased fruit size (Day, 2002). Nevertheless, such benefits depend on how, when and how much water is applied to the plant. Excess or deficit irrigation water both have an impact on peach crop productivity, and the best irrigation practices should reduce water use and associated on-site environmental impacts, such as nutrient and chemical leaking and a decline in soil quality. All these have even more importance in areas with scarce water resources, such as the Spanish Mediterranean region.

Water management practices have been proposed to reduce water use without decreasing yield and fruit quality in peach. Regulated deficit irrigation during phenological stages less sensitive to water deficit can save water, with no effect on fruit yield (Ruiz-Sánchez and Girona, 1995; Dichio *et al.*, 2004; Naor, 2006). Partial root zone irrigation reduced water used by 35-40% with no effects on plant physiology or volume canopy (Gong *et al.*, 2005). All these practices were based on calculations of evapotranspiration demand.

In semiarid lands, the extended use of high frequency localised irrigation methods changes the root system growth patterns as well as plant water uptake because of differences in the way water is distributed through the soil profile (Bryla, 2004). Girona *et al.* (2002) indicated that monitoring the available soil water content is critical for irrigation timing, due to variable tree responses, wetting patterns, soil depth and root exploration in high frequency irrigation methods.

Frequent data collection is essential for understanding the water dynamics of the soil-plant-atmosphere continuum. Much effort has been invested in the determination and characterization of the variables that control soil water flow and water absorption by the roots (Goldhamer *et al.*, 1999), because crop production is more closely related to the available soil water (Girona *et al.*, 2002) than to any meteorological variable (DeJong and Bootsma, 1996).

INTRODUCCION

El durazno (*Prunus persica* (L.) Batsch) es uno de los árboles frutales de hoja caduca más importantes y uno de los más cultivados. España es el cuarto productor de durazno; después de China, Italia y Estados Unidos, con 1.2 millones de toneladas métricas por año (FAO, 2006). Aproximadamente 70% se consume en fresco en España, 20% se procesa (enlatado, en jugo, en mermelada o deshidratado), y 10% se exporta como fruta fresca.

En los primeros estudios de riego en árboles frutales caducos, la mayoría de los autores coinciden en cuanto a que el riego proporciona tres beneficios principales: mejora el crecimiento del árbol (Frecon, 2002), incrementa el rendimiento (Bryla, 2004) y aumenta el tamaño del fruto (Day, 2002). Sin embargo, tales beneficios dependen de cómo, cuándo y cuánta agua se aplique a la planta. El exceso y la falta de riego tienen un impacto en la productividad del cultivo de durazno y las mejores prácticas de riego deben reducir el uso de agua y los efectos ambientales locales, tales como la pérdida de nutrientes y químicos y el deterioro de la calidad del suelo. Todo esto resulta más relevante en zonas con escasez de agua, como en la región mediterránea española.

Se han propuesto prácticas de manejo del agua para reducir su uso, sin reducir el rendimiento o la calidad de fruto del durazno. El riego deficitario controlado durante las fases fenológicas menos sensibles al déficit hídrico puede ahorrar agua sin afectar el rendimiento del fruto (Ruiz Sánchez y Girona, 1995; Dichio *et al.*, 2004; Naor, 2006). La irrigación parcial radicular redujo 35-45% el uso del agua, sin afectar la fisiología de la planta o el volumen del dosel (Gong *et al.*, 2005). Todas estas prácticas se hicieron con base en cálculos de la demanda de evapotranspiración.

En terrenos semiáridos, el uso extensivo de sistemas de riego localizado de alta frecuencia modifica los patrones de crecimiento del sistema radicular, así como la absorción hídrica de la planta, a causa de las diferencias en que el agua se distribuye a través del perfil del suelo (Bryla, 2004). Girona *et al.* (2002) indicaron que la monitorización del contenido de agua disponible del suelo es fundamental para programar el riego, debido a la variabilidad en la respuesta de los árboles, los patrones de humedad, profundidad del suelo y exploración de las raíces en sistemas de riego de alta frecuencia.

La recolección frecuente de datos es fundamental para entender la dinámica del continuum suelo-planta-atmósfera. Se ha realizado un gran esfuerzo para determinar y caracterizar las variables que controlan el flujo de agua del suelo y la absorción hídrica de las

Thus, monitoring the soil water content is essential for estimating plant water needs and for scheduling efficient irrigation. Soil water status has long been used for scheduling irrigation (Campbell and Campbell, 1982), and several different methods and techniques exist for estimating soil water content. These include the use of neutron probe, although this method is expensive and labour intensive (Letey, 2007). Other methods for indirectly determining the soil water content involve the use of tensiometers or electrical resistance sensors (Lowery *et al.*, 1986; Hanson *et al.*, 2000).

Newer tools allow the continuous measurement of the soil water content. For example, numerous studies have determined the soil water content using TDR (Time Domain Reflectometry) (Green and Clothier, 1999; Polak and Wallach, 2001). Recently, capacitance FDR probe (Frequency Domain Reflectometry) has given excellent results as far as precision, facility of calibration, installation, and data interpretation and transmission are concerned (Paltineanu and Starr, 1997).

The main goal of this paper was to study soil water content variations measured continuously by capacitance FDR probes, and the physiological response of young peach trees (*cv.* Flordastar) to different irrigation scheduling treatments (a conventional, based on ET_c, and another based on soil water content measurements).

MATERIAL AND METHODS

The experiments were performed during 2004, in an experimental 0.8 ha plot located in Santomera-Murcia (S.E. Spain): 38° 06' N, 1° 02' W. Soil are calcareous, rocky and shallow, with a clay-loam texture and low organic matter and cationic exchange capacity values classified as Lithic xeric haploxeroll (Soil Survey Staff, 2006). The bulk density of the soil was 1.45 g cm⁻³ down to 50 cm, but more compact (1.67 g cm⁻³) at deeper levels. The soil water content at field capacity (θ_{FC}) and at permanent wilting point (θ_{PWP}), as determined in undisturbed soil samples by the Richards pressure plate technique (Richards, 1965), were 0.24 and 0.15 cm³ cm⁻³, respectively, which implied an available soil water content of 90 mm m⁻¹.

Agrometeorological data were recorded by an automated station located within the peach orchard. During the experimental period the average maximum and minimum air temperatures were 30.1 and 7.7 °C. The annual reference evapotranspiration (ET_o) determined by the FAO, Penman-Monteith equation (Allen *et al.*, 1998) was 1100 mm, with a maximum of 7 mm day⁻¹ in August. Rainfall was 440 mm, from which 245 mm occurring in spring.

The plant material consisted of three-year-old peach trees (*Prunus persica* (L.) Batsch *cv.* Flordastar, on GF-677 peach rootstock), spaced 5×5 m. The trees were irrigated by a drip irrigation system consisting of a single lateral line per tree row,

raíces (Goldhamer *et al.*, 1999), ya que la producción está mucho más ligada al agua de suelo disponible (Girona *et al.*, 2002) que a cualquier otra variable meteorológica (DeJong y Bootsma, 1996). Por tanto, monitorear el contenido de agua del suelo es fundamental para la medición de los requerimientos hídricos de la planta y para la programación del riego eficiente. El estatus hídrico del suelo se ha utilizado ampliamente para la programación del riego (Campbell and Campbell, 1982), y existen varios métodos y distintas técnicas para calcular el contenido de agua del suelo; entre éstos el uso de la sonda de neutrones, aunque este método es costoso y requiere mucha mano de obra (Leteo, 2007). Otros métodos para determinar indirectamente el contenido de agua del suelo son el uso de tensiómetros o sensores de resistencia eléctrica (Lowery *et al.*, 1986; Hanson *et al.*, 2000).

Herramientas más recientes permiten realizar la medición continua del contenido de agua del suelo. Por ejemplo, numerosos estudios han determinado el contenido de agua del suelo mediante TDR (Reflectometría en el Dominio Temporal) (Green and Clothier, 1999; Polar and Wallach, 2001). Recientemente, la sonda capacitiva FDR ha dado resultados excelentes en la medida en que calibración, instalación, así como interpretación y transmisión de datos estén implicados (Paltineanu y Starr, 1997).

El objetivo principal de este artículo consistió en estudiar las variaciones en el contenido de agua del suelo mediante mediciones continuas con sondas capacitivas FDR, y la respuesta fisiológica de los árboles jóvenes de durazno (*cv.* Flordastar) a distintos sistemas de programación de riego (el convencional, con base en la ET_c, y otro con mediciones del contenido de agua del suelo).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos se realizaron durante 2004 en una parcela experimental de 0.8 ha localizada en Santomera-Murcia (S.E. España): 36° 06' N, 1° 02' O. Los suelos son calcáreos, rocosos y superficiales, de textura franco arcillosa y con poca materia orgánica, y con valores de capacidad de intercambio catiónico clasificados como haploxerolés lítico-xéricos (Soil Survey Staff, 2006). La densidad del suelo fue de 1.45 g cm⁻³ hasta 50 cm, pero fue más compacta (1.67 g cm⁻³) a niveles más profundos. El contenido de agua del suelo a capacidad de campo (θ_{FC}) y a coeficiente de marchitez permanente (θ_{PWP}), como se determinó en muestras de suelo imperturbadas a través del método de la placa de presión propuesto por Richards (Richards, 1965), fueron 0.24 y 0.15 cm³ cm⁻³, respectivamente, lo que implicó un contenido de agua del suelo disponible de 90 mm m⁻¹.

Los datos agrometeorológicos se registraron en una estación automatizada, ubicada dentro del huerto de durazno. Durante el

with four emitters per tree, placed 1 and 1.5 m of each side of the trunk, providing 2 L h^{-1} .

Two irrigation scheduling treatments were considered. In the T-1 treatment, the trees were irrigated to 100% of ET_c, estimated by the product of reference evapotranspiration (ET_o, Penman-Monteith), crop coefficients (0.40 Feb, 0.60 Mar, 0.70 Apr, 0.95 May, 0.80 Jun, 0.50 Jul, 0.40 Aug-Oct, 0.30 Nov) and the percentage of ground area shaded by the tree (Doorenbos and Pruitt, 1977; Fereres and Goldhamer, 1990; Allen *et al.*, 1998; O'Connell and Goodwin, 2003). In the T-2 treatment the irrigation doses and frequency were adjusted continuously in order to maintain the soil water content of the main root zone (0-50 cm depth) at between +10% and -5% of field capacity. The upper limit is equivalent to the value of the soil water content registered when the wetted front of a nightly irrigation event was detected at 50 cm depth. The lower limit was chosen close to the field capacity to prevent any soil water shortage (Mounzer, 2005).

Irrigation was scheduled for the T-1 treatment, on the basis of weekly estimated ET_c and automatically controlled by a head unit programmer operating on electro-hydraulic valves (Agrosolmen S.L., 25 mm, Solenoid Bacara, Latch 2-way). For the T-2 treatment, the irrigation applications were scheduled on the basis of real-time soil water content measurements controlled by a radio telemetry system. The irrigation water volumes for each treatment were measured with in-line flowmeters (Agrosolmen S. L., Aurus, 25 mm, pulse emitter 10 L).

Treatments were distributed in a completely randomized design with four repetitions, each consisting of one row of 13 trees. The central nine trees were used for experimental measurements and the others served as guard trees.

The volumetric water content through the soil profile was monitored in continuous real time, using two multisensor capacitance probes (C-probe, v.1, Agrilink Inc., Australia) per treatment, placed 10 cm from the emitter, inside a PVC access tube installed within the wetted area. The probe had sensors at 10, 20, 30 and 50 cm depth, which covered 95 % of the active root system (Abrisqueta *et al.*, 2008).

The PVC access tube of each probe was installed with a special auger to ensure good contact between the tube and the soil. The bottom of the PVC access tube was plugged with a rubber bung to avoid water and water vapour from entering the tube. An intrusion plastic column was used to hold the four sensors at their respective depths. A rain gauge was installed just below the emitter to continuously monitor the emitter water flow. Each probe and rain gauge were connected to a radio transmission unit (RTU) with a 7-pin cable. The RTU read the value of each sensor every 5 min and stored an average value every 15 min. The stored raw data were sent by radio signal through a relay station to the laboratory, 17 km from the experimental site, downloaded into a personal computer and graphically displayed as volumetric water content after modification by a locally established calibration equation.

The water content in each soil layer, expressed in mm, was calculated by multiplying the measured volumetric moisture content by the thickness of the corresponding soil layer. The soil water

periodo experimental la temperatura máxima promedio del aire fue $30.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y la mínima $7.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$. La referencia anual de evapotranspiración (ET_o) establecida por la FAO, ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), fue de 1100 mm, con un máximo de 7 mm d^{-1} en agosto. La precipitación fue de 440 mm, de los que 245 mm se registraron en primavera.

Las plantas eran árboles de durazno de tres años de edad [*Prunus persica* (L.) Batsch cv. Flordastar, en el rizoma GF-677 del durazno], con una separación de $5 \times 5 \text{ m}$. Los árboles se regaron con un sistema de riego por goteo que consistió en una sola línea lateral por fila de árbol, con cuatro emisores por árbol, colocados a 1 y 1.5 m de cada lado del tronco, proporcionando 2 L h^{-1} .

Se evaluaron dos sistemas de programación de riego. En el sistema T-1 los árboles se regaron a 100% de ET_c, calculado a partir del producto de la evapotranspiración de referencia (ET_o, Penman-Monteith), coeficientes de cultivo (0.40 Feb, 0.60 Mar, 0.70 Abr, 0.95 May, 0.80 Jun, 0.50, Jul, 0.40 Ago-Oct, 0.30 Nov) y porcentaje de superficie de suelo cubierta por el árbol (Doorenbos y Pruitt, 1977; Federes y Goldhamer, 1990; Allen *et al.*, 1998; O'Connell y Goodwin, 2003). En el sistema T-2 las dosis y la frecuencia de riego se ajustaron continuamente con el fin de conservar el contenido de agua del suelo de la parte central de la raíz (0-50 cm de profundidad) a entre +10% y -5% de la capacidad de campo. El límite superior equivale al valor del contenido de agua del suelo registrado cuando la superficie humedecida de un periodo de riego nocturno se detecta a 50 cm de profundidad. Se determinó un límite inferior próximo a la capacidad de campo a fin de prevenir la escasez de agua (Mounzer, 2005).

El riego del sistema T-1 se programó a partir de un ET_c calculado semanalmente y controlado automáticamente por un programador (controlador) central que opera mediante válvulas electro-hidráulicas (Agrosolmen S. L., 25 mm, Solenoid Bacara, Latch 2-way). Las aplicaciones de riego del sistema T-2 se programaron a partir de las mediciones en tiempo real del contenido de agua del suelo controladas mediante un sistema de radio-telemetría. Los volúmenes de agua de riego de cada sistema se midieron con flujómetros en línea (Agrosolmen S.L., Aurus, 25 mm, emisor de pulso 10 L).

Los tratamientos se distribuyeron en un diseño completamente aleatorizado con cuatro repeticiones, cada uno compuesto de una hilera de 13 árboles. Los nueve árboles centrales se usaron para mediciones experimentales y los demás sirvieron como árboles de protección.

El contenido volumétrico de agua a través del perfil del suelo se monitoreó de manera continua en tiempo real mediante dos sondas capacitivas con multi-sensores (C-probe, v.1, Agrilink Inc., Australia) por tratamiento, colocadas a 10 cm del emisor, dentro de un tubo de acceso de PVC instalado dentro del área de suelo mojado. La sonda tenía sensores a 10, 20, 30 y 50 cm de profundidad, los cuales cubrían 95% del sistema radicular activo (Abrisqueta *et al.*, 2008).

El tubo de acceso de PVC de cada sonda se instaló con una barrena especial a fin de garantizar un contacto adecuado entre la sonda y el suelo. El fondo del tubo de acceso de PVC se cubrió con un tapón de caucho para impedir la entrada del agua y del vapor del agua en el tubo. Se usó una columna plástica de instrusión para

store was calculated by integrating the soil water content of the 5 layers within the monitored soil profile, including the layer corresponding to 40 cm depth, which was estimated as the mean of the 30 and 50 cm readings. The resulting value was compared with the predetermined field capacity to either trigger or halt an irrigation event.

Leaf water relations were determined by measuring stem water potential (Ψ_{stem}) using a pressure chamber (Soil Moisture Equipment Co., mod. 3000), on mature leaves on the north face near the trunk. They were placed in a plastic bag covered with aluminium foil for at least 2 h prior to the measurements, which were carried out at midday every 10-15 days from April to October. Four leaves per treatment (one leaf per tree and one tree per replication) were cut and immediately placed in the chamber according to Hsiao (1990).

Extension shoot length was recorded at biweekly intervals in four tagged shoots per tree, one from each compass direction on four trees per treatment (one tree per replicate). Trunk diameter was determined in all the experimental trees about 30 cm above the graft union in January and December 2004. Canopy shaded area was estimated in August for all the experimental trees. A large tarpaulin (5×5 m) divided into 625 cm² squares was placed under the tree between 11:00 and 13:00 solar time, and the total number of shaded squares counted. Peaches were harvested twice between 7 and 18 May. The total weight of the fruit and the total number of fruit per tree at each picking were recorded in five experimental trees of each replicate and treatment.

Data were analysed using the SPSS software (SPSS, 2002). Analysis of variance (ANOVA) was used to discern treatment effect. Statistical comparisons were considered significant at $p \leq 0.05$.

RESULTS AND DISCUSSION

The soil water store (SWS) registered continuously at 0-50 cm depth between two successive irrigation events (16 July and 18 July) in the T-2 treatment is shown in Figure 1. The SWS showed a sharp increase when irrigation began on the 16th of July and then decreased rapidly as it was turned off. In the morning of the next day, the decrease in soil water content again speeded up as the evaporative demand of the atmosphere gradually increased. In the absence of any irrigation the following night, a very light increase in the soil moisture content was observed (Figure 1).

This slight increase in the soil water store can be explained by water displacement as a result of the lateral hydraulic gradient. The hypothesis is that the sensors are installed near the centre of the active root system (Mounzer, 2005). During the day, the intensive root water uptake depletes the soil water content and generates a hydraulic gradient. In the afternoon, the water uptake decreases and the water in the soil far from the roots tends to equilibrate the hydraulic gradient by moving toward the sensors, slightly raising the soil water content.

fijar las cuatro sondas a sus profundidades respectivas. Se instaló un tapón de lluvia justo debajo del emisor para monitorizar el flujo de agua continuamente. Las sondas y los tapones de lluvia se conectaron a una unidad de radio transmisión (URT) con un 7-pin cable 7. La URT leyó el valor de cada sensor cada 5 min y guardó un valor medio cada 15 min. Los datos en bruto guardados se enviaron por radio señal a través de una estación de transmisión al laboratorio, a 17 km del sitio experimental, se descargaron en una computadora personal y se mostraron gráficamente como contenido volumétrico del agua luego de modificarse con una ecuación de medición establecida localmente.

El contenido de agua en cada capa de suelo, expresado en mm, se calculó multiplicando el contenido volumétrico de humedad medido por el espesor de la capa de suelo correspondiente. La reserva de agua del suelo se calculó integrando el contenido de agua del suelo de las 5 capas en el perfil del suelo monitorizado, incluyendo la capa correspondiente a 40 cm de profundidad, la cual se calculó como el promedio de las lecturas de los 30 y 50 cm. El valor resultante se comparó con la capacidad de campo predeterminada tanto para iniciar como para finalizar un riego.

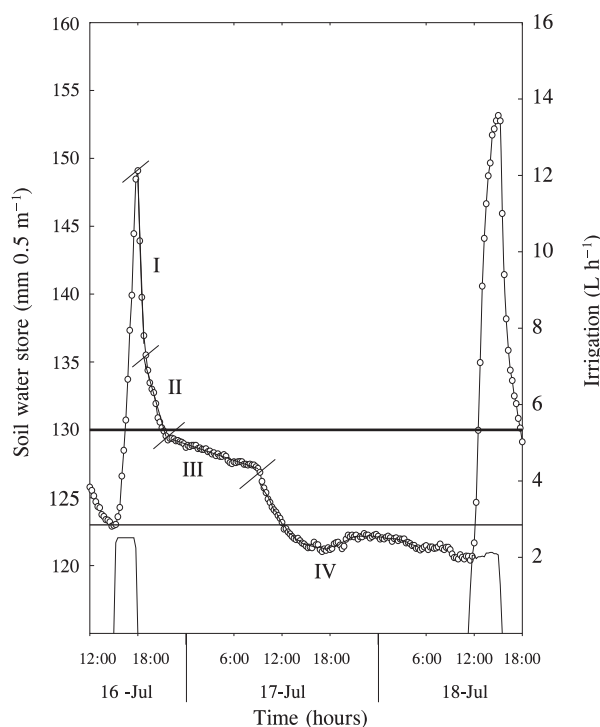


Figure 1. Variation of soil water store down to 50 cm (line) and emitter discharge rate (bars) between the end of irrigation on 16 July and the start of the next irrigation on 18 July, in T-2 treatment. The horizontal lines correspond to field capacity (thick line) and the lower limit (thin line).

Figura 1. Variación de la reserva de agua del suelo hasta los 50 cm (línea) y tasa de pulsos del emisor (barras) entre el corte del riego el 16 de julio y el inicio de éste el 18 de julio, en el tratamiento T-2. La línea horizontal corresponde a la capacidad de campo (línea gruesa) y al límite inferior (línea delgada).

A similar behaviour was described in the soil water depletion dynamic of irrigated orange trees using TDR probes, and was explained by the free drainage and root uptake processes (Polak and Wallach, 2001).

Based on the effect of different driving forces on soil water flow, the transient soil moisture content pattern between the end of irrigation on 16 July and the start of the irrigation on 18 July was fitted for different stages, whose regression models are described in Table 1. Stages I and II corresponded to water distribution, root absorption and soil evaporation processes with different rates of soil water depletion: -13.6 and -1.9 mm h^{-1} .

Stage III represents a night time stage, when root water absorption and evaporation are minimal (vapour pressure deficit, $\text{VPD} < 0.5 \text{ kPa}$); consequently, the soil water depletion rate was lower (-0.2 mm h^{-1}). Stage IV of the soil water depletion process was not constant (third degree polynomial model), it started during the day time when evaporation and root water absorption were substantial ($\text{VPD} \geq 3 \text{ kPa}$), and depletion occurred at a similar rate to that observed in stage II. At about 12:00 h on 17 July the soil water content reached the threshold value (lower limit) at which irrigation would normally be started, and continued to decrease because there was no irrigation.

Figure 2 shows the volumetric soil water content at different depths (10, 20, 30, 40 and 50 cm), together with the soil water store down to 50 cm, and the irrigations applied during one week in July, in the T-2 treatment. The figure depicts the typical soil water content dynamic. The irrigation events caused a rapid increase in soil water content, which subsequently fell (when the irrigation was turned off) at different velocities until the next irrigation started (Figure 2).

Irrigation caused an increase in the soil water content at all depths, except at the deepest (50 cm), which remained unchanged (mean value of $0.22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (Figure 2a). Therefore, it is concluded that under the conditions described, drainage can be considered null, and the decrease in the soil water content, which occurs almost immediately after irrigation is turned

Las relaciones hoja-agua se determinaron mediante la medición del potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) a través de una cámara de presión (Soil Moisture Equipment Co., mod 3000), en hojas maduras en la cara norte del tronco. Se colocaron en una bolsa de plástico cubierta con papel aluminio por lo menos 2 h antes de las mediciones, las cuales se realizaron a mediodía cada 10-15 días de abril a octubre. Se cortaron cuatro hojas por tratamiento (una hoja por árbol y un árbol por réplica) y se colocaron inmediatamente en una cámara de acuerdo con Hsiao (1990).

La longitud del brote axilar se registró en intervalos bisemanales en cuatro brotes marcados por árbol (un árbol por réplica). En todos los árboles experimentales el diámetro del tronco se estableció unos 30 cm arriba de la unión del injerto en junio y diciembre de 2004. Se colocó una lona (5x5) dividida en cuadrados de 625 cm^2 bajo el árbol entre las 11:00 y 13:00 de hora solar, y el número total de cuadrados sombreados contados. Los duraznos se cosecharon dos veces entre el 7 y el 8 de mayo. El peso total de la fruta y el número total de fruta por árbol en cada recolección se registraron en cinco árboles experimentales de cada réplica y tratamiento.

Los datos se analizaron con software SPSS (SPSS, 2002). El análisis de varianza (A de V) se usó para distinguir el efecto del tratamiento. Las comparaciones estadísticas se consideraron significativas con $p \leq 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La reserva de agua del suelo (SWS) registrada continuamente a 0-50 cm de profundidad entre dos riegos sucesivos (16 de julio y 18 de julio) en el tratamiento T-2 se muestra en la Figura 1. La SWS registró un fuerte aumento cuando el riego se activó el 16 de julio y disminuyó después rápidamente cuando éste se suspendió. A la mañana siguiente, la reducción del contenido hídrico del suelo se aceleró nuevamente, mientras que los requerimientos evaporativos de la atmósfera aumentaron gradualmente. Ante la ausencia de riego durante la noche siguiente, se observó un incremento muy ligero en el contenido de humedad del suelo (Figura 1).

El ligero incremento en la reserva de agua del suelo se puede deber al desplazamiento del agua resultado del gradiente hidráulico lateral. La hipótesis es que los sensores están instalados cerca del centro del

Table 1. Regression models between soil water store (SWS) and time (t), for the different stages in the transient moisture soil content pattern analysis.

Cuadro 1. Modelos de regresión entre la reserva de agua del suelo (SWS) y la duración (t), de las distintas fases en el análisis del modelo del contenido xxx de humedad del suelo.

Stages	Regression model	R ²	Prob. level
I	$\text{SWS} = -13.6 t + 1704.4$	0.9544	0.0042
II	$\text{SWS} = -1.9 t + 354.5$	0.9511	<0.0001
III	$\text{SWS} = -0.2 t + 153.3$	0.9731	<0.0001
IV	$\text{SWS} = -0.0044 t^3 + 1.84 t^2 - 259.04 t + 12263$	0.9666	<0.0001

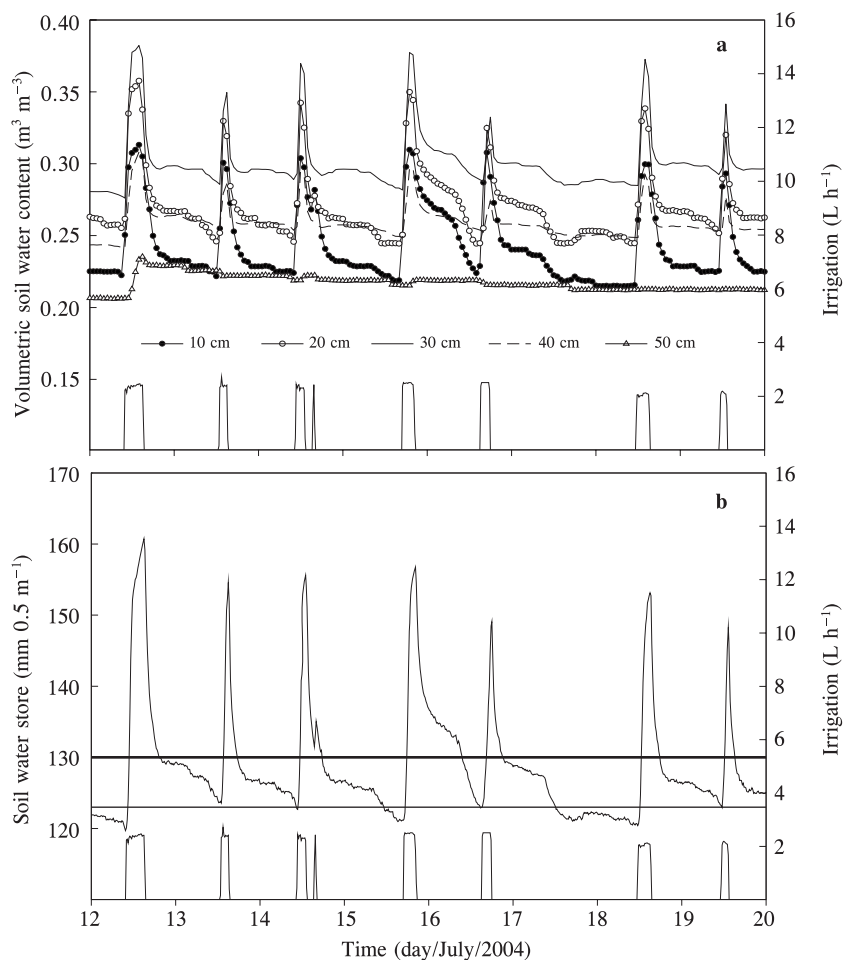


Figure 2. (a) volumetric soil water content at 10, 20, 30, 40 and 50 cm depths and emitter discharge rate (bars); (b) soil water store down to 50 cm (line) and emitter discharge rate (bars) between 12 and 19 July 2004, in T-2 treatment. The horizontal lines correspond to field capacity (thick line) and lower limit (thin line).

Figura 2. (a) contenido volumétrico de agua del suelo a 10, 20, 30, 40 y 50 cm de profundidad y tasa de pulsos del emisor (barras); (b) Reserva de agua del suelo hasta 50 cm (línea) y tasa de pulsos del emisor (barras) entre el 12 y el 19 de julio de 2004, en el tratamiento T-2. Las líneas horizontales corresponden a la capacidad de campo (línea gruesa) y al límite inferior (línea delgada).

off, corresponds mainly to evaporation and root uptake (Green and Clothier, 1999).

The continuous record of the soil water store down to 50 cm during the experimental period (2004) for both irrigation treatments is shown in Figure 3. In the conventionally scheduled irrigation treatment (T-1), the soil water content was low during spring (February-April) and from late summer to the end of the season, indicating an excess of water in June and July, compared with the upper limit of the soil water holding capacity (Figure 3a). Although some drainage below 50 cm might have been expected, this did not occur, because the mean value of the soil water content at this depth remained constant ($\approx 0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, data not shown). Maximum vegetative growth occurred from May to August (Mounzer, 2005).

In treatment T-2 a different pattern of the soil water store was observed (Figure 3b) because the irrigation doses and frequency were scheduled in accordance with the transient soil moisture content and the above mentioned limits (+10% and -5% field capacity) (Mounzer, 2005). The soil water content remained

sistema radicular activo (Mounzer, 2005). Durante el día, la absorción hídrica intensiva del sistema radicular disminuye el contenido de agua del suelo y genera un gradiente hidráulico. Por la tarde, la hídrica agua disminuye y el agua del suelo lejos de las raíces tiende a equilibrar el gradiente hidráulico al desplazarse hacia los sensores, elevando ligeramente el contenido de agua del suelo.

El agua mostró un comportamiento similar en la dinámica de pérdida de agua del suelo de árboles de naranja regados con sondas TDR, que se explica por los procesos de drenaje libre y de absorción hídrica de la raíz (Polak y Wallach, 2001).

Con base en el efecto de distintos gradientes de potencial sobre el flujo de agua del suelo, el patrón del contenido transitorio de humedad del suelo entre el corte del riego, el 16 de julio, y el inicio del mismo, el 18 de julio, se ajustó para las distintas fases, cuyos modelos de regresión se describen en el Cuadro 1. Las fases I y II correspondieron a los procesos de distribución del agua, absorción radicular y evaporación del suelo con distintas tasas de pérdida de agua del suelo: $-13.6 \text{ y } -1.9 \text{ mm h}^{-1}$.

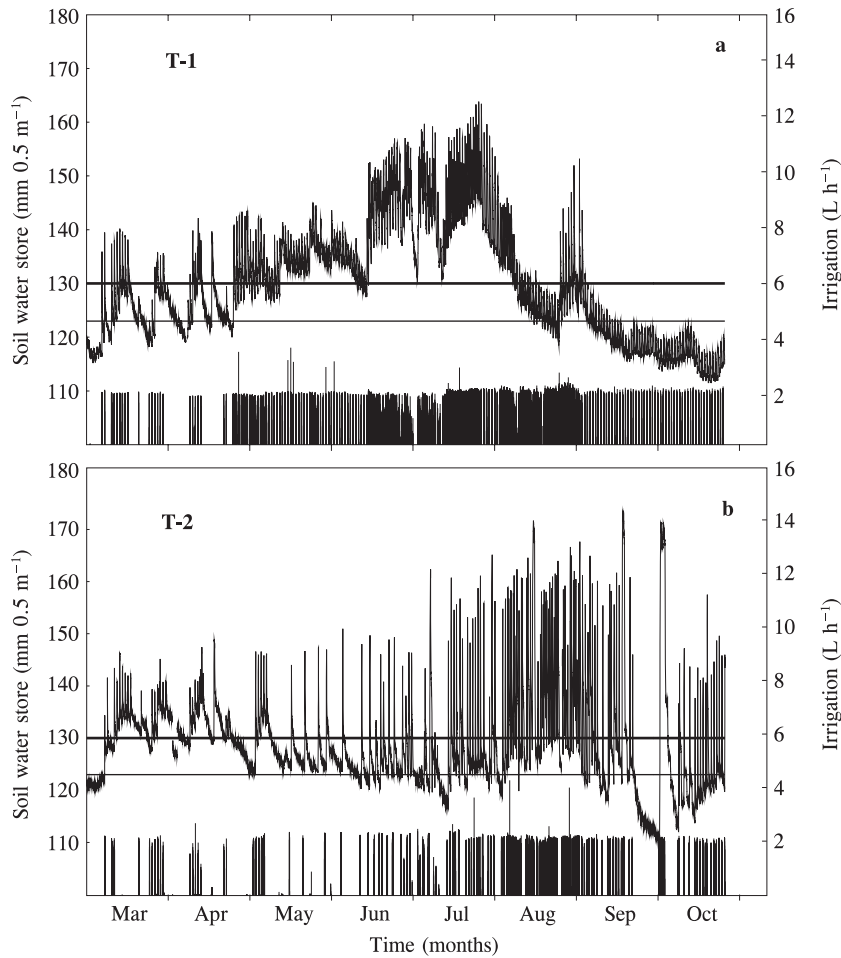


Figure 3. (a) soil water store down to 50 cm in T-1 treatment (line), and emitter discharge rate (bars). (b) soil water store down to 50 cm in T-2 treatment (line), and emitter discharge rate (bars). The horizontal lines correspond to field capacity (thick line) and the lower limit (thin line). 2004.

Figura 3. (a) reserva de agua del suelo hasta los 50 cm en el tratamiento T-1 (línea), y tasa de pulsos del emisor (barras). (b) reserva de agua del suelo hasta los 50 cm en el tratamiento T-2. Las líneas horizontales corresponden a la capacidad de campo (línea gruesa) y al límite inferior (línea delgada). 2004.

above the lower limit throughout the experimental period (except during one week of September due to a malfunction in the head unit programmer).

The recorded soil moisture values in T-2 increased beyond the upper limit after irrigation (Figure 3b), although they fell rapidly due to the root water uptake which prevented the water from reaching 50 cm depth (this sensor did not detect significant soil moisture changes at any time during the growing season) (data not shown). During irrigation episodes, confined saturation conditions were promoted near the capacitance sensors, but quickly abated after the end of irrigation as water was infiltrated through the profile (Figure 3b).

The seasonal pattern of stem water potential (Figure 4) was similar in both treatments. The rainfall from January to May (Figure 4) contributed more than 80% of the annual average, and was responsible for the high and almost constant Ψ_{stem} values during this period. The increase in evaporative demand of the atmosphere in summer brought about a decrease in Ψ_{stem} values. These values were lower in T-2 than in T-1 treatment, from June to July, but from August

La fase III representa una fase nocturna, cuando la absorción hídrica de la raíz y la evaporación son mínimas (déficit de presión de vapor, $DPV < 0.5 \text{ kPa}$); en consecuencia, la tasa de pérdida de agua del suelo fue menor (-0.2 mm h^{-1}). La fase IV del proceso de pérdida de agua del suelo no fue constante (modelo polinomial de tercer grado); dio inicio durante el día cuando la evaporación y la absorción hídrica de la raíz eran considerables ($DPV \geq 3 \text{ kPa}$), y la tasa de pérdida de agua fue similar a aquella observada en la fase II. El 17 de julio, a las 12:00 h, aproximadamente, el contenido de agua del suelo alcanzó el valor de umbral (límite inferior) en el que el riego iniciaría normalmente, y continuó su descenso al no haber riego.

La Figura 2 muestra el contenido volumétrico de agua del suelo a profundidades diferentes (10, 20, 30, 40 y 50 cm), junto con el descenso de la reserva de agua del suelo a 50 cm, y los riegos aplicados durante una semana en julio, en el tratamiento T-2. La figura representa la dinámica típica del contenido de agua del suelo, el cual descendió subsecuentemente (cuando el riego se suspendió) a velocidades distintas hasta el inicio del siguiente riego (Figura 2).

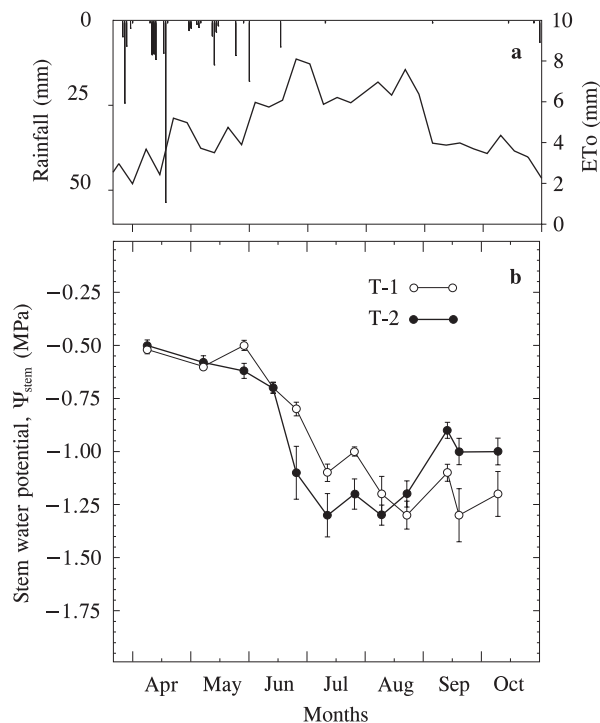


Figure 4. (a) Rainfall (bars) and reference evapotranspiration (ETo) (line) during the experimental period. (b) Seasonal trend of stem water potential (Ψ_{stem}) in T-1 (open symbols) and T-2 (closed symbols) treatments. Each point is the average of four replicates. Vertical bars are \pm the S.E. of the mean, 2004.

Figura 4. (a) Precipitación pluvial (barras) y evapotranspiración de referencia (ETo) (línea) durante el periodo experimental. (b) Tendencia estacional y potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) en los tratamientos T-1 (símbolos abiertos) y T-2 (símbolos cerrados). Cada punto es el promedio de cuatro réplicas. Las barras verticales son \pm el E.S. de la media, 2004.

onwards the increase of the frequency of irrigation in the former treatment induced a recovery in Ψ_{stem} values and improved leaf water status compared with T-1 (Figure 4).

Shoot and trunk growth were not affected by the irrigation treatment. Average trunk diameter at the beginning of the experimental period was about 5 cm and grew 2.5 cm during the year, with no significant differences between treatments (Table 2). Annual growth of terminal shoots, with an initial basal diameter of 10 mm and initial length of 30 cm was similar in both treatments (≈ 552 cm, Table 2). The canopy shaded area was not affected too by the irrigation treatments (Table 2).

No statistically significant differences were found between treatments in the total weight of fruits at harvest or in the number of fruits per tree (Table 3). The yield obtained can be considered adequate for local peach production (Ministerio de Agricultura

El riego causó un incremento en el contenido de agua del suelo en todas las profundidades, exceptuando la mayor (50 cm), misma que se mantuvo sin cambios (valor medio de $0.22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (Figura 2a). Por lo tanto, se concluye que bajo las condiciones descritas, el drenaje puede considerarse inexistente, y la disminución del contenido de agua del suelo, la cual ocurre casi inmediatamente después de la suspensión del riego, se debe principalmente a la evaporación y a la absorción radicular (Grenn y Clothier, 1999).

En la Figura 3 se muestra el registro continuo de la reserva de agua del suelo hasta los 50 cm durante el periodo experimental (2004) de los dos sistemas de riego. En el sistema de riego programado convencionalmente (T-1), el contenido de agua del suelo fue bajo durante la primavera (febrero-abril) y desde el verano tardío hasta el final de la estación, lo que muestra un exceso de agua en junio y julio, en comparación con el límite superior de la capacidad de retención del agua del suelo (Figura 3a). Aunque se había esperado algún drenaje inferior a los 50 cm, esto no sucedió dado que el valor medio del contenido de agua del suelo se mantuvo constante a dicha profundidad ($\approx 0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, no se muestran los datos). El crecimiento vegetativo máximo ocurrió de mayo a agosto (Mounzer, 2005).

En el tratamiento T-2 la reserva de agua del suelo mostró un patrón distinto (Figura 3b) ya que las dosis y la frecuencia de riego se programaron conforme al contenido transitorio de humedad del suelo y los límites mencionados anteriormente (capacidad de campo de +10% y -5%) (Mounzer, 2005). El contenido de agua del suelo se mantuvo por encima del límite inferior durante todo el periodo experimental (excepto durante una semana de septiembre debido a una avería en el programador central).

Los valores de humedad del suelo registrados en T-2 se elevaron más allá del límite superior después del riego (Figura 3b), aunque descendieron rápidamente a consecuencia de la absorción radicular la cual impidió que el agua alcanzara los 50 cm de profundidad (este sensor no detectó cambios significativos en la humedad del suelo en ningún momento durante la temporada de cultivo) (no se muestran los datos). Durante los episodios de riego, las condiciones de saturación aumentaron cerca de los sensores capacitivos, pero éstas disminuyeron rápidamente a medida que el agua se infiltró a través del perfil del suelo (Figura 3b).

El patrón estacional del potencial hídrico del tallo (Figura 4) fue similar en ambos tratamientos. Desde enero hasta mayo la precipitación (Figura 4) contribuyó con más de 80% del promedio anual, y fue responsable de los valores máximos y casi constantes de Ψ_{tallo} durante dicho periodo. El incremento de los

Pesca y Alimentación, 2003), and slightly higher than that found in early Italian peach trees (Caruso *et al.*, 1997). The analysis of variance also indicated no significant effect of picking date on yield, indicating that harvest was not delayed by the different irrigation treatments (Table 3).

The amount of irrigation water applied between harvesting date of the previous year and the harvest in 2004 amounted to 1405 and 1154.5 m³ ha⁻¹ in T-1 and T-2, respectively, meaning 17.8% water saving in T-2 compared with the conventionally scheduled irrigation treatment (T-1). Although this saving may not appear very high, it could be added to that obtained using other deficit irrigation strategies, which could be helpful in areas with increasingly scarce water resources (Ruiz-Sánchez and Girona, 1995).

CONCLUSIONS

Continuous soil water content measurement by capacitance FDR probe has the advantage over other conventional methods (gravimetric, soil water potential, neutron probe) of allowing access to data in real time, so that variations can be analysed taking into account the soil characteristics, root uptake, climatic conditions and limitations of the capacitance probe itself. The transient soil water content after irrigation was divided into different phases (fitted to polynomial model regressions) according to the effect of different driving forces.

Continuous measurements of soil water content by FDR probe allowed an optimal moisture range to be set for the crop according to the soil properties, from which it was possible to precisely adjust the irrigation dose and frequency.

The scheduling of irrigation in young peach trees to maintain the soil water content in the main root zone (0-50 cm depth) at between +10 % and -5% of field capacity permitted a water saving of about 18% compared with conventional scheduling based on ETc estimate, with no significant decrease in fruit yield or vegetative growth.

Table 2. Effect of irrigation scheduling treatments on vegetative growth (annual shoot and trunk growth and shaded area) of Flordastar peach trees. 2004.

Cuadro 2. Efecto de los tratamientos de programación de riego en el crecimiento vegetativo (crecimiento anual del brote y el tronco y superficie cubierta) de árboles de durazno Flordastar. 2004.

Treatment	Annual growth (cm)		Shaded area (%)
	Shoot length	Trunk diameter	
T-1	550 ± 84.2	2.38 ± 0.06	33.48 ± 0.63
T-2	554 ± 107.1	2.58 ± 0.06	30.36 ± 0.72
	ns	ns	ns

ns, non-significant according to ANOVA (P>0.05). Values are mean ± S.E. ❖ ns, no-significativo de acuerdo con A de V (P>0.05). Los valores son la media ± E.S.

requerimientos evaporativos de la atmósfera en el verano causaron una disminución en los valores Ψ_{tallo} . Éstos fueron inferiores en el tratamiento T-2 que en el T-1, de junio a julio, pero de agosto en adelante el incremento de la frecuencia de riego en el tratamiento anterior provocó una recuperación en los valores Ψ_{tallo} y mejoró las condiciones de agua de la hoja en comparación con T-1.

El tratamiento de riego no afectó el crecimiento de los brotes y troncos. El diámetro promedio del tronco al inicio del periodo experimental fue de 5 cm y creció 2.5 cm durante el año, sin diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 2). El crecimiento anual de los brotes terminales, con un diámetro basal inicial de 10 mm y una longitud inicial de 30 cm, fue similar en ambos tratamientos (≈ 552 cm, Cuadro 2). Los tratamientos de riego tampoco afectaron la cubierta del dosel (Cuadro 2).

No hubo diferencias significativas entre tratamientos en el peso total de los frutos en la cosecha o en el número de frutos por árbol (Cuadro 3). El rendimiento obtenido puede considerarse como adecuado para la producción local de durazno (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2003), y ligeramente mayor que el encontrado en árboles tempraneros de durazno

Table 3. Effect of irrigation scheduling treatments on yield (t ha⁻¹ and number of fruits per tree) of Flordastar peach trees. 2004.

Cuadro 3. Efecto de los tratamientos de programación de riego en el rendimiento (t ha⁻¹ y el número de frutos por árbol) de árboles de durazno Flordastar. 2004.

Treatment	1 st harvest		2 nd harvest		Total	
	t ha ⁻¹	N° fruits tree ⁻¹	t ha ⁻¹	N° fruits tree ⁻¹	t ha ⁻¹	N° fruits tree ⁻¹
T-1	3.78	78.25	2.27	43.25	6.05	122.25
T-2	2.80	56.00	3.03	65.00	5.84	121.75
	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns, non-significant according to ANOVA (P>0.05). ❖ ns, no significativos de acuerdo con A de V (P>0.05).

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by Ministerio de Educación y Ciencia (MEC), (AGL2006-12914-C02-01) and Séneca Foundation (03130/PI/05) grants to the authors. O. Mounzer and W. Conejero were recipient of research fellowships from MEC, Spain, I. Abrisqueta from I3P-CSIC, Spain and Y. García-Orellana from Fundayacucho (Venezuela).

LITERATURE CITED

- Abrisqueta, J. M., O. Mounzer, S. Álvarez, W. Conejero, Y. García-Orellana, L. M. Tapia, J. Vera, I. Abrisqueta, and M. C. Ruiz-Sánchez. 2008. Root dynamics of peach trees submitted to partial rootzone drying and continuous deficit irrigation. *Agr. Water Manage.* DOI: 10.1016/j.agwat.2008.03.003.
- Allen, R. G., R. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage* 56, FAO, Roma, 300 p.
- Bryla, D. 2004. Trials Find Drip Irrigation Most Efficient for Peach Trees. Agricultural Research Initiative. California State University. Fresno, Ca. USA. 4 p.
- Campbell, G. S., and M. D. Campbell. 1982. Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice. *In*: Hillel, D. (ed). *Advances in Irrigation*. Vol. 1: 25-41.
- Caruso, T., D. Giovannini, F. P. Marra, and F. Sottile. 1997. Two new planting systems for early ripening peaches (*Prunus persica* L. Batsch): Yield and fruit quality in four low-chill cultivars. *J. Hortic. Sci.* 72: 873-883.
- Day, R. K. 2002. Tree Water Use. Orchard Notes. University of California Cooperative Extension. Tulare. Ca. USA. 30 p.
- DeJong, R., and A. Bootsma. 1996. Review of recent developments in soil water simulation models. *Can. J. Soil Sci.* 76: 263-273.
- Dichio, B., C. Xiloyaniz, B. Nuzzo, G. Montanaro, and A.M. Palese. 2004. Post harvest regulated deficit irrigation of peach tree in a Mediterranean environment: effects on vegetative growth and yield. *Acta Hortic.* 664: 169-174.
- Doorenbos J., and W. O. Pruitt. 1977. Crop water requirements. *Irrigation and Drainage*, Paper 24. Ed. FAO. Roma, 144 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2006. <http://faostat.fao.org/>
- Fereres, E., and D. A. Goldhamer. 1990. Deciduous fruit and nut trees. *In*: Steward, B. A., and D. R. Nielsen (eds). *Irrigation of Agricultural Crops*. Agronomy 30. Published by ASA, CSSA and SSA, Madison, Wisconsin. USA. pp: 987-1017.
- Frecon, J. L. 2002. Best management practices for irrigating peach trees. New Jersey Agricultural Experiment Station. USDA. New Brunswick, N. J. USA. 8 p.
- Girona, J., M. Mata, E. Fereres, D. A. Goldhamer, and M. Cohen. 2002. Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water deficits. *Agr. Water Manage.* 54: 107-122.
- Goldhamer, D. A., E. Fereres, M. Mata, J. Girona, and M. Cohen. 1999. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subject to deficit irrigation. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 124: 437-444.
- Gong, D., S. Kang, and J. Zhang. 2005. Responses of canopy transpiration and canopy conductance of peach (*Prunus persica*) trees to alternate partial root zone drip irrigation. *Hydrol. Process.* 19: 2575-2590.
- Green, S. R., and B. E. Clothier. 1999. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant and Soil* 206: 61-77.
- Hanson, R. B., S. Orloff, and D. Peters. 2000. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. *Cal. Agric.* 54: 38-42.
- italiano (Caruso *et al.*, 1997). El análisis de varianza tampoco indicó ningún efecto significativo de la fecha de recolección sobre el rendimiento, lo que muestra que ninguno de los tratamientos de riego retrasaron la cosecha (Cuadro 3).
- La cantidad de agua de riego aplicada entre la fecha de la cosecha del año previo y la cosecha en 2004 ascendió a 1405 y a 1154.5 m³ ha⁻¹ en T-1 y T-2, respectivamente, lo que significa un 17.8% en el ahorro de agua en T-2 en comparación con el tratamiento de riego programado convencionalmente (T-1). Aunque este ahorro pueda no parecer muy significativo, podría agregarse al obtenido mediante diferentes programaciones deficitarias de riego, las cuales pueden ser útiles en zonas donde hay una creciente escasez de recursos hídricos (Ruiz-Sánchez and Girona, 1995).

CONCLUSIONES

La medición continua del contenido de agua del suelo con sondas capacitivas (FDR) tiene la ventaja sobre los métodos convencionales (gravimétrico, potencial de agua del suelo, sonda de neutrones) de permitir el acceso a los datos en tiempo real, de manera que las variaciones pueden analizarse considerando las características del suelo, absorción radicular, condiciones climáticas y limitaciones de la misma sonda capacitiva. El contenido transitorio de agua del suelo tras el riego se dividió en distintas fases (ajustadas a análisis de regresión polinomial) en función del efecto de los diversos gradientes de potencial.

Las mediciones continuas del contenido de agua del suelo con la sonda FDR permitieron establecer un rango de humedad óptimo para el cultivo en función de las propiedades del suelo, con lo que la dosis y frecuencia de riego se pudieron ajustar con precisión.

La programación del riego en árboles de durazno jóvenes para conservar el contenido de agua del suelo en el área de la raíz central (0-50 cm de profundidad) a entre +10% y -5% de la capacidad de campo redundó en un ahorro de agua de aproximadamente 18% en comparación con la programación convencional basada en el cálculo de ET_c, sin disminución significativa en el rendimiento frutal o el crecimiento vegetativo.

—Fin de la versión en Español—



Hsiao, T. C. 1990. Measurements of plant water status. *In*: Stewart B. A., and D. R. Nielsen (eds). *Irrigation of Agricultural Crops* (Monograph no. 30). American Society of Agronomy, Madison, pp: 243-279.

- Letey, J. 2007. Optimizing irrigation for agricultural water management: scientific principles. Agricultural Water Management: Proceeding of a Workshop in Tunisia. The National Academic Press. Washington, D.C. USA. pp: 51-65.
- Lowery, B., B. C. Datiri, and B. J. Andraski. 1986. An electrical readout system for tensiometers. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 494-496.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). 2003. Superficies y Producciones Agrarias. Estadística Agroalimentaria de España.
- Mounzer, O. 2005. Riego localizado de precisión en frutales de hueso: *Prunus armeniaca* L. y *Prunus persica* (L.) Batsch. European Ph. D. Thesis, Polytechnic University of Cartagena, Murcia, Spain. 199 p.
- Naor, A. 2006. Irrigation scheduling of peach - deficit irrigation at different phenological stages and water stress assessment. Acta Hort. 713: 339-350.
- O'Connell, M., and I. Goodwin. 2003. Partial wetting - a potential water management saver for peach and apple. Proceedings of the Australian Agronomy Conference. Australian Society of Agronomy. Geelong, Victoria, Australia. 5 p.
- Paltineanu, I. C., and J. L. Starr. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 1576-1585.
- Polak, A., and R. Wallach. 2001. Analysis of soil moisture variations in an irrigated orchard root zone. Plant and Soil 233: 145-159.
- Richards, L. A. 1965. Physical conditions of water in soil. In: Black, C. A. (ed). Methods of Soil Analysis. Agronomy n° 9, American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp: 128-152.
- Ruiz-Sánchez, M. C., y J. Girona. 1995. Investigaciones sobre riego deficitario controlado en melocotonero. In: Riego Deficitario Controlado. Fundamentos y Aplicaciones. Colección Cuadernos VALUE 1. Mundi Prensa. UE. pp: 67-95.
- SSF (Soil Survey Staff). 2006. Keys to Soil Taxonomy. 10th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 341 p.
- SPSS Inc. 2002. SPSS Professional Statistics. Business Intelligence Division, v.12, Chicago, Illinois, USA.