



UNIVERSIDAD
DE MURCIA



CENTRO DE EDAFOLOGÍA Y BIOLOGÍA
APLICADA DEL SEGURA (CEBAS)

Balance hídrico y respuesta del melocotonero extratemprano al riego deficitario

Isabel Abrisqueta Villena
Licenciada en Biología

Directores: M^a Carmen Ruiz Sánchez
José M^a Abrisqueta García

Memoria presentada para optar al Grado de Doctor
por la Universidad de Murcia

Murcia, 2010

Balance hídrico y respuesta del melocotonero extratemprano al riego deficitario

Memoria presentada por la Licenciada en Biología
Isabel Abrisqueta Villena
para optar al Grado de Doctor por la Universidad de
Murcia

Isabel Abrisqueta Villena

VºBº
Los Directores

VºBº
El Tutor

Mª Carmen Ruiz Sánchez
Investigador Científico del CSIC

Antonio L. García Torres
Profesor Titular de la
Universidad de Murcia

José Mª Abrisqueta García
Científico Titular del CSIC



MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



CENTRO DE EDAFOLOGÍA Y BIOLOGÍA APLICADA
DEL SEGURA

M^a Carmen Ruiz Sánchez y José M^a Abrisqueta García, Investigadora Científica y Científico Titular del CSIC, respectivamente

AUTORIZAN

La presentación de la Tesis Doctoral titulada “**Balance hídrico y respuesta del melocotonero extratemprano al riego deficitario**”, realizada por Isabel Abrisqueta Villena, bajo nuestra dirección y supervisión, en el Departamento de Riego del Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS) de Murcia, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Murcia.

En Murcia, a 3 de septiembre de 2010

Fdo.: M^a Carmen Ruiz Sánchez

Fdo.: José M^a Abrisqueta García



UNIVERSIDAD
DE MURCIA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA AGRÍCOLA
GEOLOGÍA Y EDAFOLOGÍA

Facultad de Química

D. Antonio Lino García Torres, Profesor titular de Universidad del Área de Química Agrícola y adscrito al Departamento de Química Agrícola Química Agrícola, Geología y Edafología, como tutor ratifica,

La presentación de la memoria de Tesis Doctoral titulada “Balance hídrico y respuesta del melocotonero extratemprano al riego deficitario”, realizada por Isabel Abrisqueta Villena, bajo la dirección y supervisión de D^a. M^a Carmen Ruiz Sánchez y D. José M^a Abrisqueta García, en el Departamento de Riego del CEBAS-CSIC, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Murcia.

Murcia, a 3 de Septiembre de 2010



UNIVERSIDAD
DE MURCIA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA AGRÍCOLA
GEOLOGÍA Y EDAFOLOGÍA

Facultad de Química

D. Luís Almela Ruiz, Catedrático de universidad del Área de Química Agrícola y Director del Departamento de Química Agrícola, Geología y Edafología,
INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada “Balance hídrico y respuesta del melocotonero extratemprano al riego deficitario”, ha sido realizada por D^a Isabel Abrisqueta Villena, bajo la inmediata dirección y supervisión de D^a M^a Carmen Ruiz Sánchez y D. José M^a Abrisqueta García, y que el Departamento ha dado su conformidad para que sea presentada ante la Comisión de Doctorado.

Murcia, a 3 de Septiembre de 2010

La licenciada Isabel Abrisqueta Villena ha disfrutado, durante el tiempo de realización de su Tesis Doctoral, una beca predoctoral CSIC del Programa I3P.

Este trabajo se encuadra dentro de las actividades del Departamento de Riego del CEBAS (CSIC) en los proyectos de investigación "Riegos deficitarios de precisión para mejorar la eficiencia del uso del agua en frutales (CICYT-AGL2006-12914-C02-01), 'Elaboración de protocolos de programación del riego en melocotonero en función de indicadores de estado hídrico en suelo' (Fundación SÉNECA-03130/PI/05), 'Mejora de la calidad del fruto mediante telecontrol del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera en melocotonero' (Fundación SÉNECA-08847/PI/08) e 'Integración en tiempo real de índices de estrés hídrico para el riego de frutales: Interacción humedad-raíces' (MICIIN-AGL2009-06981).

Índice

ÍNDICE

	Pág.
1. Resumen y Abstract	3
2. Justificación y Objetivos	19
3. Antecedentes	25
3.1 Cultivo del melocotonero	25
3.1.1 Características agronómicas y fisiológicas	25
3.1.2 Situación del cultivo	32
3.2 Riego en frutales	36
3.2.1 Necesidades hídricas	36
3.2.2 Riegos deficitarios	47
3.3 Sistema radical	52
3.3.1 Absorción radical	52
3.3.2 Métodos de medida del sistema radical	53
4. Material y métodos	63
4.1 Características de la parcela experimental	63
4.2 Clima	66
4.3 Material vegetal y labores culturales	70
4.4 Sistema y programación del riego	72
4.5 Tratamientos de riego	74
5. Determinación de las necesidades hídricas mediante balance hídrico	79
5.1 Introducción	79
5.2 Material y métodos	79
5.2.1 Lisímetros de drenaje	80
5.2.2 Determinación de los parámetros de balance hídrico	81
5.3 Resultados y Discusión	89
5.3.1 Estado hídrico del suelo	89
5.3.2 Evapotranspiración del cultivo (ET_C)	94
5.3.3 Coeficiente de cultivo (K_C)	97

6. Respuesta agronómica y fisiológica al riego deficitario	103
6.1 Introducción	103
6.2 Material y métodos	104
6.2.1 Estado hídrico del suelo	104
6.2.2 Estado hídrico de la planta	107
6.2.3 Crecimiento vegetativo	108
6.2.4 Fructificación y crecimiento del fruto	117
6.2.5 Producción y calidad de la cosecha	119
6.3 Resultados y Discusión	121
6.3.1 Relaciones hídricas	121
6.3.2 Crecimiento vegetativo	145
6.3.3 Crecimiento reproductivo	164
7. Conclusiones y Conclusions	181
8. Bibliografía	191
9. Índice de tablas, figuras y fotografías	219
10. Abreviaturas y símbolos	231

Capítulo 1
Resumen y Abstract

Resumen

La agricultura en las regiones semiáridas afronta de modo casi permanente situaciones muy limitantes por la escasez y baja calidad de los recursos hídricos disponibles. Al déficit estructural de agua se añade la presión del desarrollo turístico y residencial y la competencia por otros usos. En estas regiones son necesarias nuevas estrategias que permitan reducir los consumos de agua y limitar los efectos adversos en el medioambiente. Entre ellas cabe destacar las orientadas a disminuir los aportes de agua con mínimo impacto en la producción a través de las estrategias de riego deficitario o con la mejora de los sistemas de aplicación de agua, a través de la programación de los riegos.

Los procedimientos de programación de riego se basan en estimas de la evapotranspiración de los cultivos (ET_C), en medidas del estado hídrico de las plantas, o de la humedad del suelo. En los últimos años, el desarrollo de nuevos equipos ha ayudado a la toma de decisiones en el manejo del riego en base al control en continuo de estas variables. Entre los equipos de monitorización del agua en el suelo destacan las sondas de capacitancia que permiten obtener información de la dinámica del agua en el suelo ya que miden en continuo y tiempo real las variaciones del contenido de agua en el perfil del suelo.

El melocotonero es el cuarto frutal más producido en el mundo y el segundo en la Unión Europea. España es la segunda productora de la UE, situándose la mayor parte de las plantaciones en el área mediterránea con bajas precipitaciones ($\approx 300 \text{ mm año}^{-1}$). La Región de Murcia es la tercera productora a nivel nacional, contribuyendo con un 20% a la producción nacional, con una producción media de 250.000 t en los últimos 5 años. En la Región de Murcia es el segundo frutal de hueso más importante después del almendro en superficie y el primero en producción (Anuario Estadístico de la Región de Murcia, 2008).

Por estas razones el objetivo general de esta Tesis se centró en la determinación de las necesidades hídricas del melocotonero extratempra-

no bajo condiciones mediterráneas y en el estudio de la respuesta agronómica y fisiológica a los riegos deficitarios. Además se evaluaron los efectos de la programación automática del riego basada en la medida del contenido de agua en el suelo con sensores de capacitancia, frente a la programación tradicional basada en el cálculo de la ET_c. Se han estudiado los efectos en las relaciones agua-suelo-planta, la dinámica radical, el crecimiento vegetativo y del fruto, la producción y calidad de la cosecha en los distintos tratamientos de riego durante tres años.

Los ensayos se han realizado en la finca experimental del CEBAS-CSIC, situada en Santomera, Murcia: 38° 06' 31.2" N; 1° 02' 13.7" W. Se ha seleccionado una parcela de 0.8 ha de melocotoneros (*Prunus persica* (L.) Batsch) cv. Flordastar (variedad extratemprana), injertado sobre patrón híbrido de melocotonero x almendro GF-677, plantados en Febrero de 2002, a un marco de plantación de 5 x 5 m, distribuidos en cuatro repeticiones de 78 árboles cada una (6 hileras x 13 árboles). El sistema de riego consiste en un lateral por fila de árboles, con 8 goteros autocompensantes por árbol, ubicados cada 0.5 m a cada lado del tronco y con un caudal nominal de 2 L h⁻¹.

El suelo de la parcela es pedregoso y posee una textura franco-arcillosa, con bajos contenidos en materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico y una densidad aparente media de 1.42 g cm⁻³, si bien a partir de 50 cm de profundidad está más compactado (1.7 g cm⁻³). Los contenidos volumétricos de humedad a capacidad de campo y en el punto de marchitez fueron de 0.29 y 0.15 cm³ cm⁻³, respectivamente, con un contenido de agua disponible de 140 mm m⁻¹. El agua de riego procedente del Trasvase Tajo-Segura, era de baja salinidad (1.5 dS m⁻¹ de conductividad eléctrica). Los datos climáticos se obtuvieron a partir de una estación meteorológica automática situada en la misma finca experimental.

Se han ensayado los siguientes tratamientos de riego:

- Control (T1) regado sin restricción en el suministro hídrico (120-140% de la ET_c, calculada en base a la evapotranspiración del cultivo de

referencia (ET_0) utilizando la ecuación de Penman-Montheith (Allen *et al.*, 1998) y los coeficientes de cultivo propuestos por FAO.

- Riego deficitario sostenido, RDS, (T2), regado al 50% de la ET_C todo el ciclo

- Riego parcial de raíces, RPR, (T3), regándola 50% de la ET_C alternativamente un lado u otro del árbol.

- Riego deficitario controlado, RDC, (T4) regado al 25% de la ET_C excepto en la fase de rápido crecimiento del fruto que se riega al 100% de la ET_C .

- Riego automático (Ta), basado en la medida del contenido de agua en el suelo con sondas de capacitancia (tipo FDR) con diferentes umbrales para el inicio y fin del riego: 2007, riego nocturno para completar el 100% de la ET_C (FAO, Penman-Monteith); 2008, riego nocturno según lecturas a las 22:00 h, con inicio del riego al 90% de la capacidad de campo (CC) en la zona radical activa (0-50 cm) y fin cuando las lecturas del sensor situado a 80 cm aumentaban un 2%; y 2009: riego en tiempo real con dos períodos: Crecimiento del fruto: inicio del riego al 95% de CC y fin al 100% de CC y Postcosecha: inicio al 90 y fin al 95% de CC.

Las necesidades hídricas del melocotonero Flordastar fueron evaluadas mediante el cálculo de la evapotranspiración real del cultivo (ET_C), utilizando el método de balance hídrico para lo que se emplearon lisímetros de drenaje (5 x 5 x 1.5 m) construidos en la parcela experimental, evaluando los cambios en la cantidad de agua almacenada en el suelo con sonda de neutrones para lo que se instalaron en cada lisímetro 5 tubos de acceso hasta una profundidad de 1.2 m, a 0, 0.5, 1, 1.5 y 2 m del segundo gotero. La humedad en los primeros 10 cm se determinó con un TDR, instalando, a 10 cm de cada tubo, dos varillas de acero inoxidable de 15 cm.

El balance se realizó en el tratamiento control mediante la aplicación de la ecuación de la conservación de la masa, con medidas de la humedad del suelo cada 7-10 días. El riego se midió con contadores, el drenaje en continuo con caudalímetros y la lluvia y las demás variables

meteorológicas necesarias para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) con datos de la estación automática. Con estos datos se calcularon los coeficientes de cultivo (KC) para melocotoneros adultos en riego localizado en las condiciones locales de clima mediterráneo.

Los valores de Kc aumentaron durante la estación de crecimiento, con un ligero descenso de Kc después de la recolección. Los máximos consumos de agua suceden en verano. En comparación con los valores de Kc propuestos por la FAO-56, éstos últimos tienden a sobreestimar la ET_C al inicio de la estación.

El uso de los coeficientes de cultivo propuestos en el cálculo de las necesidades hídricas del melocotonero Flordastar se traduciría en un ahorro de agua de riego del 16%, tal y como se requiere para una gestión precisa del riego en zonas semiáridas con recursos hídricos limitados.

Los sensores de capacitancia han resultado ser unas herramientas adecuadas para el control, en continuo y en tiempo real, del contenido de agua del suelo, así como para la evaluación del impacto de diferentes programas de riego. Los datos de humedad en cada profundidad, además, proporcionan una valiosa información sobre el movimiento del frente húmedo, profundidad y actividad del sistema radical y de cómo se usa el agua de riego.

En las condiciones experimentales ensayadas, se sugiere que el contenido de agua en el suelo se mantenga en niveles superiores a $210 \text{ mm } 0.8 \text{ m}^{-1}$ (correspondiente a una humedad volumétrica media de $0.26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Esto se traduce en un valor umbral del 10% de la capacidad de campo, que se propone como límite inferior para activar la programación del riego automático. Este límite se estableció para el período de poscosecha en base a la determinación del punto de inflexión, derivado de la curva de agotamiento del agua en el suelo como la intersección entre las líneas con diferente pendiente.

La dinámica de crecimiento de las raíces se estudió en los tratamientos T1, T2 y T3, realizando medidas cada 7-15 días de la longitud de

raíces con un escáner de visión circular que permite la visualización de raíces a través de tubos transparentes (minirrizotrones) y el posterior análisis de las imágenes con un programa informático específico (WinRHIZO Tron[®]). Se instalaron 3 minirrizotrones de 1.8 m, con una inclinación de 45°. Los resultados obtenidos avalan el uso del método simplificado de evaluación de raíces nuevas frente al de raíces totales, permitiendo obtener valores de densidad de longitud de raíces (DLR) en melocotonero de una forma más rápida.

La dinámica de crecimiento de la DLR en condiciones de adecuado suministro hídrico (tratamiento control) mostró un crecimiento continuo durante todo el año, con diferentes tasas de crecimiento diario, en función de la fenología del cultivo. Tras la recolección se produce un aumento de la tasa crecimiento que se mantiene hasta mediados de verano, cuando se observan los máximos crecimientos (a mediados de agosto), para después disminuir. La tasa de crecimiento de las raíces se ralentiza durante la etapa de máximo crecimiento de los frutos, por lo que queda claro que los frutos actúan como fuertes sumideros de los fotoasimilados, provocando un patrón claramente alternante entre el crecimiento de la parte aérea y el de las raíces.

El déficit de riego aplicado de forma sostenida (tratamiento T2) redujo en un 52% el crecimiento radical con respecto al tratamiento control, mientras que sólo fue del 23% en el tratamiento de riego parcial de raíces, en el que no se observaron diferencias significativas en el crecimiento de raíces entre ambos lados, por lo que se concluye que la alternancia de riego no produce un efecto significativo en la dinámica de crecimiento de raíces de melocotonero.

El contenido de agua en el suelo (medido con sonda de neutrones) y el potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) (medido a mediodía con cámara de presión en hojas cubiertas) se redujeron en respuesta al déficit hídrico mostrando los árboles del tratamiento deficitario controlado valores de (Ψ_{tallo}) más bajos (-1.8 MPa) durante el periodo postcosecha, coincidiendo con las mayores reducciones en el riego. Los tratamientos de PRD y RDS mostraron valores similares de agua en el suelo y Ψ_{tallo} .

El déficit hídrico afectó al crecimiento vegetativo del árbol de forma similar en todos los tratamientos deficitarios, sin embargo se observó la siguiente progresión: diámetro del tronco (medido con calibre durante el reposo) > madera de poda (peso en campo, en otoño) \geq tamaño de la copa (superficie sombreada en verano) > crecimiento en longitud de ramos.

La producción en los tratamiento deficitarios fue significativamente menor que la del tratamiento control durante los tres años de ensayo, sin diferencias entre el riego deficitario sostenido (T2), parcial de raíces (T3) y deficitario controlado (T4). En 2007 las producciones fueron anormalmente bajas en todos los tratamientos debido a las condiciones climáticas adversas durante la floración y a una excesiva poda realizada el año anterior.

El efecto del déficit hídrico acumulado provocó en los tratamientos de riego deficitario (T2, T3 y T4) un menor crecimiento vegetativo que se tradujo en árboles de menor tamaño lo que limitó la producción con respecto a los árboles sobre-regados del tratamiento control durante los tres años de ensayo. En el tratamiento de riego automático la producción fue más baja que la del tratamiento control sólo el primer año, siendo similar en 2008 y 2009.

De forma global, los tratamientos deficitarios indujeron un menor porcentaje de frutos ($\approx 26\%$) de calibre comercial A y B (diámetro entre 61 y 73 mm) que en los tratamientos control y de riego automático ($\approx 50\%$).

Si los datos de producción se normalizan con la sección de tronco desaparecen las diferencias entre tratamientos. Además, los tratamientos deficitarios fueron más eficientes en el uso del agua que el tratamiento sobre-regado, siendo el más eficiente el de RDC (T4) con las mayores reducciones de riego (al 35 % respecto de la ET_C).

Cuando los límites de agua en el suelo se definen con precisión, como sucede en los dos últimos años, el tratamiento de riego automático Ta permite una programación eficiente del riego que conduce a un adecuado estado hídrico de la planta y limitando exclusivamente el crecimiento vegetativo sin afectar la producción ni la calidad de la cosecha.

El manejo del riego deficitario en melocotonero debe ser ajustado de forma que se limiten los déficits hídricos en el periodo postcosecha, muy largo en el caso de las variedades extratempranas como la empleada en el estudio, si no se quiere afectar negativamente la productividad del cultivo.

Abstract

Agriculture in semi-arid zones faces a quasi-permanent situation of water scarcity and low quality water resources. Besides a structural water deficit, tourist and residential development, as well as competition from other uses add to the problem. In these areas, new strategies which decrease water consumption and limit environmentally adverse effects are necessary. These strategies include the aimed to reduce the amount of water used in irrigation applications with a minimum impact on yield, so called deficit irrigation strategies or by the improvements in water application systems by means of irrigation scheduling.

Irrigation scheduling procedures are based on the crop evapotranspiration (ET_C) estimates, plant-based parameters or soil water content measurements. During recent years, developments in new equipment have led to irrigation management practices based on the continuous monitoring of these variables. The equipment used for soil water content monitoring includes the capacitance probes which provide data on the soil water dynamics from the continuous and real-time measurements of soil water content variations throughout the root zone, facilitating decision-making for precise irrigation scheduling.

Peach is the fourth more important fruit crop in the world and the second in Europe. Spain is the second largest producer. Most peach tree plantations are located in the Mediterranean area with its attendant low rainfall ($\approx 300 \text{ mm year}^{-1}$). The province of Murcia is ranked third in peach production in Spain, with an average annual yield for the last 5 years of about 250,000 t, representing about 20% of the Spanish total.

For these reasons the general objective of this thesis focused on the determination of the water requirements of early maturing peach trees growing under Mediterranean conditions and in the study of the agronomic and physiological response to deficit irrigation. Also, irrigation scheduling based on the soil water content, as measured by capacitance probe, was compared with traditional scheduling based on ET_C calculations. Plant and

soil water relations, vegetative and fruit growth, yield and fruit quality were evaluated during three growing seasons in the different irrigation treatments.

The experiments were performed in an experimental 0.8 ha plot at the CEBAS-CSIC experimental station located in Santomera-Murcia (S.E. Spain: 38° 06' N, 1° 02' W). The plant material consisted of five-year-old peach trees (*Prunus persica* (L.) Batsch) cv. Flordastar, on GF-677 peach rootstock), planted in February 2002, spaced 5 × 5 m, arranged in 4 replications of 78 trees each (6 rows x 13 trees) design. The trees were irrigated by a drip irrigation system consisting of a single lateral line per tree row, with eight emitters per tree, placed 0.5 m from tree trunk, each delivering 2 L h⁻¹.

The soil is highly calcareous, rocky and shallow, with a clay-loam texture and low organic matter and cationic exchange capacity values. The bulk density of the soil was 1.45 g cm⁻³ down to 0.5 m, but higher values (1.67 g cm⁻³) were found at deeper levels. The mean values of soil water content at field capacity and at permanent wilting point were 0.29 and 0.15 m³ m⁻³, respectively, which implied an available soil water content of 140 mm m⁻¹. The irrigation water used was considered to be of low salinity (electrical conductivity = 1.5 dS m⁻¹). An automatic meteorological station sited 200 m away from the experimental plot provided the meteorological data.

The following treatments were applied:

- T1 treatment (control), irrigated above estimated crop evapotranspiration (120-140% of ET_C), determined according to daily crop reference evapotranspiration (ET₀), calculated using the Penman-Monteith equation (Allen et al., 1998) and crop coefficients from the FAO.

- T2 treatment, sustained deficit irrigation, SDI, irrigated at 50% of ET_C during the growing season.

- T3 treatment, partial root drying, PRD; irrigated at 50% ET_C on one side of the rootzone while the other side was kept dry.

- T4 treatment, regulated deficit irrigation (RDI), irrigated to fully cover 100% ET_C only during stage III of fruit growth, with the irrigation water reduced to 25% ET_C during the rest of the growing season.

- Automatic irrigation (Ta) treatment, irrigation was automatically scheduled using the capacitance probe and radio transmission system, following different criteria each year. In 2007, irrigation started at 22:00 h, and 100% of daily water requirements (computed with FAO-Penman-Monteith's method) were provided. In 2008: irrigation was automatically managed by monitoring the soil water content (SWC) at 22:00 h, and irrigation only started if the SWC in the top 0.5 m layer at this time was below 90% of field capacity (FC), stopping when the sensor at 0.8 m depth showed an increase of 2% over its value recorded at 22:00 h. In 2009:

Crop water requirements (ET_C) for well irrigated early-season peach trees were assessed by the water balance method (using drainage lysimeters (5 x 5 x 1.5 m) in which soil water content variations were measured using neutron probe for that 5 access tubes were installed at 0, 0.5, 1, 1.5 y 2 m from the second emitter at 1.2 m depth in the control treatment. Soil moisture in the top 0.1 m of the soil was determined by time domain reflectometry (TDR).

Crop water use (ET_C) was estimated using the mass conservation water balance equation: Rainfall was recorded in real-time using a rain gauge sited 2 m above the surface. Drainage was measured by setting automatic tipping bucket gauges at the end of the drain tubes located at the bottom of the lysimeters, thus allowing free gravity water flux. These were connected to a telemetry system. An automatic meteorological station sited 200 m away from the experimental plot provided the meteorological data from which ET_0 values were calculated, from which K_c values were calculated for drip irrigated adult peach trees growing under Mediterranean climate conditions.

The measured crop water use followed the same trend as the ET_0 , increasing with time, but reaching a peak in August, a shift of 1.5 months compared with the peak in ET_0 . The crop coefficient (K_c) was calculated

using the measured crop water use and the ET_0 values. Over the two years, K_c increased gradually, beginning with irrigation in February and extending to early May. There was a brief fall at the end May in K_c , followed by a recovery in early June until a maximum K_c was reached in August. This was followed by a rapid decline in K_c in mid November, when irrigation ended.

The results indicate that the FAO-56 method tended to overestimate ET_C early in the season, while the proposed K_c would promote a water saving of about 16% in the irrigation water. This information can be used for the accurate water management of drip irrigation in semi-arid areas with limited water resources.

The continuous soil water content measurements using capacitance FDR-type probes allow access to data in real time (Figure 2), so that variations can be analyzed taking into account the soil characteristics, root uptake, climatic conditions and limitations of the capacitance probe itself. These data allowed an optimal moisture range to be set for the crop, from which it was possible to precisely adjust the irrigation dose and frequency and automatic irrigation.

Under our experimental conditions, it is suggested that the soil water content at which plant water stress was evident corresponded to a mean SWC value of 210 mm in the 0-0.8 m soil upper layer (mean volumetric soil water content of $0.26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). That could result in a threshold value of 10% of the soil field capacity being adopted as a lower limit to activate automatic irrigation scheduling based on soil water content measurements. The limit, defined as breaking point, was determined as the transition between the two phases of decline in SWC in a drying soil: the relatively rapid phase and a subsequent slower phase, when the soil water content strongly limits crop water uptake. Even so, this limit was established for the postharvest period, which coincides with a non-critical period as regards water stress.

The root dynamics were in the three drip irrigation treatments: T1, T2 and T3. Root length was measured frequently using minirhizotrons and

a circular-vision scanner. The minirhizotron technique proved to be a satisfactory tool for evaluating root system dynamics in peach trees. The most active root growth of drip irrigated early-season peach trees was observed in the upper 0.55 m of soil with roots mostly concentrated between 0.40 and 0.55 m, although there was a tendency (non-significant) for them to be distributed more deeply in the continuous deficit irrigated treatment. Overall, more than 86% of the roots were very thin with diameters of ≤ 0.5 mm.

Higher root length density values were recorded in non-limiting irrigation conditions (T1) than in both deficit irrigations (T2 and T3) treatments, where root growth was reduced on average by 73 and 42%, respectively. While providing nearly the same irrigation water savings, The T3 treatment induced higher root length density values than in the continuous deficit irrigation treatment. In the partial root irrigation treatment no significant differences in the growth of roots between both sides were observed, therefore it can be concluded that alternation of irrigation does not produce a significant effect on the dynamics of growth of peach tree roots.

On the other hand, a parallel root dynamics was evident in three irrigation treatments, with roots continuing to grow throughout the experimental period. Different root growth rates were detected according to the phenological stage, causing alternating growth patterns between aerial and root parts of the tree. Maximum root growth occurred immediately after harvest.

The soil water content (measured neutron probe) and the stem water potential (Ψ_{stem}) (measured at noon with pressure chamber in covered leaves) were reduced in response to the water deficits, showing the RDI treatment trees the lowest Ψ_{stem} values (-1.8 MPa) during the post-harvest, coinciding with major reductions in irrigation. PRD and RDS treatments showed similar values of water status in the soil and in the plant.

The water deficit affected the vegetative growth of trees similarly in all deficit treatments, however the following progression: trunk diameter (measured with caliper during dormancy) > wood pruning (weighted in the

field, autumn) \geq size canopy (volume and shaded area, summer) $>$ growth in length of shoots, was noticed.

Yield in the deficit treatments was significantly lower than the control treatment during the three years of study, no differences between the sustained deficit irrigation (T2), and partial root drying (T3) and regulated deficit irrigation (T4). In 2007 productions were abnormally low in all treatment due to adverse climatic conditions during the flowering and excessive pruning performed the previous year.

The effect of the accumulated water deficit resulted in deficit irrigation (T2, T3 and T4) treatments lowered vegetative growth resulting in smaller trees which limited production with respect to over irrigated treatment during the three years of trial. In the treatment of automatic irrigation the yield was lower than that of the control treatment only in the first year, being similar in 2008 and 2009.

Globally, deficit irrigated treatments induced a minor percentage of fruit ($\approx 26\%$) of commercial grade A and B (diameter 61 to 73 mm) than in the automatic irrigation and control treatments ($\approx 50\%$).

If the yield data are normalized with trunk diameter data, the differences between treatments disappeared. In terms of water use efficiency (defined as the ratio between yield and total irrigation applied water) it was clear that the deficit irrigation treatments were more efficient than the over-irrigated trees of the control treatment. The RDI treatment, with the greatest irrigation reduction (35% of the ET_C), were the most efficient in this respect.

When the limits of water in the soil are defined with precision, as in the two last years, treatment of automatic irrigation based on soil water content measurements with capacitance probes, allows an efficient scheduling irrigation that leads to a suitable plant water status and exclusively limiting vegetative growth without affecting production or quality of the harvest.

Deficit irrigation strategies in peach trees must be adjusted to limit water deficits during the postharvest period of early maturing cultivars,

1. Resumen y Abstract

which is very long as in the case of 'Flordastar', if fruit yield is not to be reduced.

Capítulo 2
Justificación y objetivos

El melocotonero es el frutal más importante de la Unión Europea, siendo España el segundo país productor. La Región de Murcia es la tercera productora a nivel nacional contribuyendo con un 20 % a la producción nacional (con una producción media de 260.000 t en los últimos 5 años). Dentro de la Región de Murcia, es el segundo frutal de hueso más importante después del almendro en superficie y el primero en producción (Anuario Estadístico de la Región de Murcia, 2008).

La cuenca del Segura tiene problemas muy importantes de escasez de agua y sobreexplotación de acuíferos. La precipitación media anual es muy baja (300 mm) y con una fuerte variación espacio-temporal; la evapotranspiración de referencia media alcanza los 700 mm al año. Al déficit estructural de agua se añade la presión del desarrollo turístico y residencial y la competencia por otros usos. Por lo que son necesarias nuevas estrategias que permitan reducir los consumos de agua y limitar los efectos adversos en el medioambiente. Entre ellas cabe destacar las orientadas a disminuir los aportes de agua con mínimo impacto en la producción a través de las estrategias de riego deficitario controlado (Chalmers *et al.*, 1981; Goldhamer, 1989; Ruiz-Sánchez y Girona, 1995). Otras incluyen la mejora de los sistemas de aplicación de agua, a través de la programación de los riegos.

Los procedimientos de programación de riego se basan en estimas de la evapotranspiración de los cultivos (Allen *et al.*, 1998), en medidas del estado hídrico de las plantas (Goldhamer y Fereres, 2001; Conejero *et al.*, 2007; García-Orellana *et al.*, 2007), o en medidas de la humedad del suelo (Hanson *et al.*, 2000). Entre estos últimos destacan los que miden la tensión de agua, usados para el manejo del riego de alta frecuencia (Phe- ne y Howell, 1984) o las técnicas electromagnéticas, que permiten una medida rápida, no destructiva y fácilmente automatizable (Topp y Davies, 1985; Dean *et al.*, 1987; Paltineanu y Starr, 1997). Éstas permiten obtener información de la dinámica del agua en el suelo ya que miden en continuo y tiempo real las variaciones del contenido de agua en el perfil del suelo (Starr y Paltineanu, 1998; Goldhamer *et al.*, 1999).

El método de balance hídrico del suelo ha sido utilizado ampliamente en diversos estudios, con el objetivo de cuantificar la evapotranspiración de plantaciones de almendro en riego por goteo (Fererres, 1978; Holzapfel, 1979; Fereres *et al.*, 1981a; 1981b; 1982; Sharples *et al.*, 1985; Franco 1993), albaricoquero (Abrisqueta *et al.*, 2001), cítricos (García-Petillo y Castel, 2007) y en otras especies, con objeto de conseguir un adecuado manejo de las reservas de agua disponibles (Posnikoff y Knapp, 1996).

La determinación de las necesidades hídricas requiere el conocimiento exacto de los distintos componentes del balance de agua en el suelo, que se fundamenta en que el proceso de evapotranspiración se produce a expensas del agua almacenada en la zona radical, la cual proviene del riego o las precipitaciones, descontada la que se pierde por escorrentía o drenaje (Asare *et al.*, 1996; Cohen *et al.*, 1996).

En relación a la mejora de la eficiencia de la programación de los riegos, hay que destacar que el conocimiento de la fenología del cultivo es muy importante, desde el punto de vista del manejo del cultivo, tanto del ajuste de sus necesidades de agua, fertilizantes y otros agroquímicos, como de la determinación de los períodos críticos al déficit de riego (Torrecillas *et al.*, 2000). La delimitación de las fases de crecimiento vegetativo y del fruto, así como la competencia entre el crecimiento de la parte aérea y de las raíces resulta de interés a fin de comprobar los procesos afectados ante situaciones de déficit hídrico (Chalmers, 1989).

En relación al crecimiento de las raíces, aunque las diferentes especies vegetales tienen determinadas genéticamente las características del crecimiento radical, éstas son muy susceptibles de ser modificadas por el medio ambiente en el que se desarrollan, variando en función de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, del clima y de las condiciones de cultivo. De éstas últimas, la disponibilidad de agua es el factor determinante más importante (Fernández *et al.*, 1992). Los estudios de dinámica de raíces permiten obtener información acerca de su evolución y determinar las épocas de crecimiento en el perfil del suelo.

Por todo ello, el objetivo general de este trabajo de investigación se centró en la determinación de las necesidades hídricas del melocotonero extratemprano bajo condiciones de clima mediterráneo y en el estudio de la respuesta agronómica y fisiológica a los riegos deficitarios. Además se evaluaron los efectos de la implementación del riego automático basado en el mantenimiento de un contenido óptimo de agua en el suelo, sobre la base de las lecturas de sensores de capacitancia, frente a la programación tradicional basada en el cálculo de la ET_C . Se estudiaron los efectos en las relaciones agua-suelo-planta, la dinámica radical, el crecimiento vegetativo y productivo de los tratamientos ensayados.

Para lograr este objetivo principal se desarrollaron los siguientes objetivos parciales:

- Determinación de las necesidades hídricas: consumo de agua y coeficientes de cultivo
- Respuesta agronómica y fisiológica a los riegos deficitarios y al riego automático con sensores de capacitancia. Este objetivo parcial ha incluido un estudio de la dinámica del sistema radical y su relación con el estado hídrico del suelo, así como una evaluación del estado hídrico de la planta, del desarrollo vegetativo y del fruto, y de la producción y calidad de la cosecha.

Capítulo 3
Antecedentes

3.1 Cultivo del melocotonero

3.1.1 Características agronómicas y fisiológicas

El melocotonero es originario de China, donde las referencias de su cultivo se remontan a 3.000 años. Los romanos lo llevaron a Persia (actual Irán) a través de las rutas comerciales, llegando a ser conocidos allí como fruta pérsica, de ahí el nombre *persica*, en alusión a su supuesto origen.

Hacia el año 330 a.C. llegaron a Grecia, y durante la Edad Media su cultivo se extendió por toda Europa. En el siglo XIX se constata que el melocotonero aparece ya como cultivo en expansión. A principios del siglo XX se empiezan a seleccionar genotipos de melocotoneros a partir de poblaciones procedentes de semilla y se fijan por medio de injerto (Badenes, 2000).

El melocotonero pertenece a la familia de las Rosáceas y, dentro de ellas y según la clasificación más comúnmente aceptada, al género *Prunus* y a la especie *persica*. El nombre científico completo es *Prunus persica* (L.) Batsch. Las variedades más comunes de cultivo para consumo incluyen: *vulgaris*: melocotonero común, *laevis*: nectarina, y *platycarpa*: paraguayo (Cambra, 1985).

Tanto las nectarinas como los paraguayos derivan por mutación de los melocotoneros comunes, y los únicos caracteres diferenciales son la ausencia de tomentosidad en la piel del fruto, en el primer caso, y la forma aplastada del fruto, en el segundo.

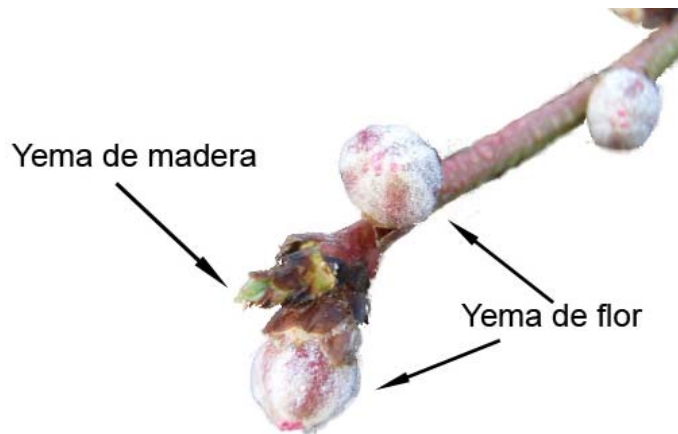
Las raíces del melocotonero están muy ramificadas y tienen un típico color anaranjado, con lenticelas muy evidentes (Fideghelli, 1986). Son especialmente sensibles a la presencia de raíces incluso de la misma especie.

En cuanto a la parte aérea, se trata de un árbol caducifolio de porte pequeño, que puede alcanzar los 6-8 m de altura. El melocotonero es una especie basífona, es decir, que un ramo vertical dejado vegetar libremente

3. Antecedentes

te produce brotes más vigorosos en la base y progresivamente menos vigorosos hacia el ápice. La corteza que reviste el tronco y las ramas es lisa y de color gris más o menos oscura con tonalidad rojiza.

Las yemas pueden ser de madera o de flor (Fotografía 3. 1). Las primeras se distinguen sobre todo por su forma cónica y menores dimensiones, formadas por 8-10 pérulas revestidas por una tomentosidad blanquecina. Las yemas de flor son globosas, de mayor tamaño, formadas por 10-12 pérulas mucho más tomentosas y se localizan en la madera de un año (Fideghelli, 1986).



Fotografía 3. 1. Detalle de las yemas de madera y de flor de melocotonero.



Fotografía 3. 2. Detalle de las hojas de melocotonero.

Las hojas del melocotonero son oblongas, lanceoladas, con una longitud generalmente de 140-180 mm y una anchura de 40-50 mm (Fotografía 3. 2). El limbo es liso, a veces ondulado a lo largo del nervio central, con los bordes finamente aserrados o doblemente dentados (Fideghelli, 1986). Generalmente son hojas simples y muy pocas veces aparecen dos o tres hojas en un mismo nudo, sólo en los ramos vigorosos. La foliación es posterior a la floración.

Las flores por lo general son solitarias o en grupos de dos o cuatro (Fotografía 3. 3). En cuanto a la polinización, es una especie autocompatible, autógena, no alternante. La fecundación tiene lugar normalmente entre 24 y 48 horas después de la polinización.



Fotografía 3. 3. Detalle de una flor de melocotonero.

El fruto es una drupa de gran tamaño, entre 40-80 mm (pericarpio membranoso, mesocarpio muy carnoso, endocarpio leñoso), de forma más o menos globosa, con una línea de sutura y una cavidad alrededor del pedúnculo (Fotografía 3. 4). Las formas que se presentan con más frecuencia son con una protuberancia acentuada en zonas meridionales.



Fotografía 3. 4. Fruto de melocotonero en cosecha

La multiplicación de forma vegetativa se realiza mayoritariamente mediante injerto de yema (en T o de escudete). La propagación mediante semillas se emplea únicamente en la mejora genética, para crear nuevas variedades. Para la propagación de algunos patrones se emplea la propagación por semillas o mediante estaquillado.

Prácticas culturales

La poda pretende dirigir el crecimiento de la planta a fin de conseguir un desarrollo armonioso y una fructificación óptima en cantidad y calidad (Urbano Terrón, 1999). La poda dependerá en gran medida de las densidades de plantación.

La poda de formación se puede realizar en vaso (Fotografía 3. 5) o en palmeta. Ambas son adecuadas para bajas densidades de plantación (250-500 árboles por hectárea), aunque requieren mucha mano de obra y retrasan la entrada en producción. Para altas densidades de plantación se emplea la poda de formación en palmeta libre, Ypsilon o fusseto, que confieren precocidad pero requieren poda en verde.



Fotografía 3. 5. Poda de formación en vaso.

El aclareo de frutos resulta imprescindible para conseguir una producción de calidad. Consiste en eliminar un número de frutos determinado, para así favorecer el crecimiento y calidad de los que permanecen. Se prefieren aclareos manuales, dejando un fruto por cada 15-20 cm de ramo. Se realiza después de la caída natural de frutos y antes del endurecimiento del hueso, aproximadamente unos 30 días después de la plena floración.

Si se omite el aclareo, se obtendrá un fruto de baja calidad, quedarán muy agotadas las reservas del árbol y puede incluso quedar comprometida la producción del año siguiente.

En riego localizado, el abonado se realiza por fertirrigación desde marzo a octubre.

Las necesidades de nutrientes por año recomendadas para árboles adultos son: 80-140 kg ha⁻¹ de N, 50-60 kg ha⁻¹ P₂O₅ y 100-150 kg ha⁻¹ K₂O. Los fertilizantes comúnmente empleados son el ácido fosfórico, nitrato amónico, nitrato cálcico y nitrato potásico.

Deben realizarse análisis foliares para evaluar la evolución de los macro y micronutrientes. Frecuentemente se ven afectados por deficiencias de calcio y magnesio, y en menor medida de zinc y manganeso.

3. Antecedentes

Es importante mantener el suelo libre de malas hierbas por motivos de competencia con el cultivo (agua y fertilizantes). Para ello, se recurre a escardas mecánicas en la zona seca de la calle y al empleo de herbicidas en las zonas humectadas por los goteros.

Los aportes hídricos en función de las necesidades de la planta, pretenden asegurar una más regular y elevada productividad, además de favorecer también la calidad de los frutos. La profundidad del suelo a la que debe afectar el riego es, aproximadamente, de 80 cm.

Los sistemas de riego tradicionales son el riego por surcos y a manta, con volúmenes que oscilan entre 10.000 y 12.000 m³ ha⁻¹, fundamentales para obtener calibre, especialmente en variedades tardías.

León *et al.* (1987) establecen que las necesidades de agua de melocotonero, para un marco de plantación de 5 x 3.5 m, en condiciones de riego localizado oscilan entre 5.000 y 6.800 m³ ha⁻¹ para variedades tempranas y entre 5.300 y 7.100 m³ ha⁻¹ para variedades tardías, para las condiciones edafoclimáticas de la Región de Murcia. Erena *et al.* (1999) las cifran en unos 6.670 m³ ha⁻¹ para variedades extratempranas y 8.605 m³ ha⁻¹ para las tardías.

En la mayor parte de los cultivares, la fecha de recolección se determina por cambios en el color de fondo de la piel, de verde a amarillo. La madurez máxima varía entre cultivares y corresponde a una firmeza de la pulpa en la que la fruta se puede manejar sin daños por magullamiento.

La recolección del melocotonero suele ser manual, aunque también se realiza una recolección mecanizada, con vibrador, en variedades para la industria.

Variedades

Existen numerosas variedades en la Región de Murcia, siendo las más representativas: Catherina, Carson, Baby Gold, Andross, Sudanell.

Se describen a continuación las características de la variedad Flor-dastar utilizada en este estudio.

Es el resultado del cruzamiento de “Flordagold” x “Earligrande”, realizado en el Fruit Crops Department, Universidad de Florida, en 1976.

Se trata de una variedad atractiva, de bajo requerimiento de frío y de maduración extratemprana. Posee una firmeza tal que le da condiciones ventajosas para el transporte y almacenaje. Es además resistente a bacteriosis, causada por *Xanthomonas* sp.

Para esta variedad, Egea *et al.* (2003), han estimado unos requerimientos de aproximadamente 225 horas frío (temperatura por debajo de 7 °C) para terminar la dormancia, por lo que se adapta muy bien a las condiciones climáticas de la Región de Murcia. Por lo general fructifica bien cuando el promedio del mes más frío está entre 14 y 17 °C. En zonas de temperaturas más elevadas se observa retraso en la brotación y carga irregular de fruta (CAPA, 1999).

La planta es semierecta, vigorosa y productiva, pero responde bien a la poda permitiendo distintas formas de conducción. El número de yemas florales es moderado, por lo que requiere un aclareo poco intenso, en caso de no registrarse pérdida de flores debido a heladas. Las hojas son de tamaño moderado, exhibiendo glándulas peciolares globosas. Las flores son grandes, color rosado claro. El polen es amarillo brillante y abundante, siendo las plantas autofértiles (CAPA, 1999).

El fruto es de tamaño medio, promediando los 5 cm de diámetro y los 80 g de peso en el momento de la madurez comercial. Aclareos intensos de fruto permiten la obtención de mayores calibres y peso individual medio (CAPA, 1999).

Madura unos 75-80 días después de plena floración. La forma del fruto es truncada, con una notable punta firme en áreas de menos de 200 horas frío. La sutura es suave y la pubescencia es medianamente corta. La pulpa es tierna, de atractivo color amarillo. Si el fruto se deja madurar en planta desarrolla una tonalidad rojiza. Se lo clasifica como semiprisco por la separación del hueso de la pulpa cuando está sobremaduro. La calidad y firmeza de la pulpa son buenas. No se oxida fácilmente al ser cortado.

Portainjertos

Un árbol frutal se puede cultivar sobre sus propias raíces. Sin embargo, en fruticultura se utiliza un plantón formado por la asociación de un patrón o portainjerto, que aporta el sistema radical, y variedad o injerto que motiva la parte aérea. Los patrones más comúnmente empleados para el melocotonero son los francos, o de semilla de melocotonero, los de ciruelo y los híbridos de melocotonero x almendro.

El empleado en el presente trabajo es el GF-677, híbrido natural de melocotonero x almendro, obtenido en la Estación de la Grande Ferrade (Burdeos). Tiene una excelente adaptabilidad a los suelos alcalinos, húmedos o secos. Se trata de un híbrido de gran vigor y a pesar de ello la productividad que imprime a diferentes variedades es muy buena. Además de tener buena afinidad con el grupo melocotonero-pavía-nectarina, es afín con las diferentes variedades de almendro, un buen número de variedades de ciruelo chino-japonés y alguna de ciruelo europeo y albaricoquero.

Durante el primer año resulta muy sensible a la asfixia radical. Posteriormente, aunque sensible, lo es algo menos que otros patrones utilizados. Es el patrón que menos exigencias hídricas manifiesta. Su sensibilidad a los diversos hongos del terreno es muy parecida a la del patrón franco. Quizás sea más sensible a la podredumbre de raíces por *Armillaria*, pero es relativamente más tolerante a la podredumbre del cuello. Muy sensible a diferentes tipos de nemátodos.

3.1.2 Situación del cultivo

El melocotonero es un frutal de zona templada, no muy resistente al frío, cuya área de cultivo se extiende entre 30 y 40° de latitud. Según la FAO (2008), es el cuarto frutal producido en el mundo con 17.500 miles t, después del plátano, el manzano y el peral. Los principales países del mundo productores de melocotón son, por este orden: China, Italia, Espa-

ña, Estados Unidos, Grecia, Turquía e Irán. Así, se puede decir que se trata de un frutal difundido en todo el mundo, pero cuya producción principal se localiza en Europa.

Dentro de la Unión Europea, el melocotonero ocupa el segundo lugar en producción con alrededor de 4.200 miles t, después del manzano (FAO, 2008).

Según el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM, 2009), España es la segunda productora a nivel europeo (Tabla 3. 1). La superficie total actual de melocotonero es de 54.887 ha, de las cuales el 93 % es de regadío. Este hecho se debe a que el rendimiento medio de la superficie en producción de secano es de 4 t ha⁻¹, mientras en regadío es de 17 t ha⁻¹.

Tabla 3. 1. Producción de melocotón (miles de t) a nivel mundial, europeo y nacional.

	2007	2008*	2009**
MUNDO	17 700	18 000	16 000
UE	4 200	4 100	4 200
ESPAÑA	846	1 298	1 151

*Provisional; **Estimado

(Fuente MARM, FAO, 2009)

La mayor parte de la producción de melocotonero (Figura 3. 1) se destina al consumo en fresco (80 %), el 20 % restante se destina a la industria. Sólo el 10 % se destina a la exportación.

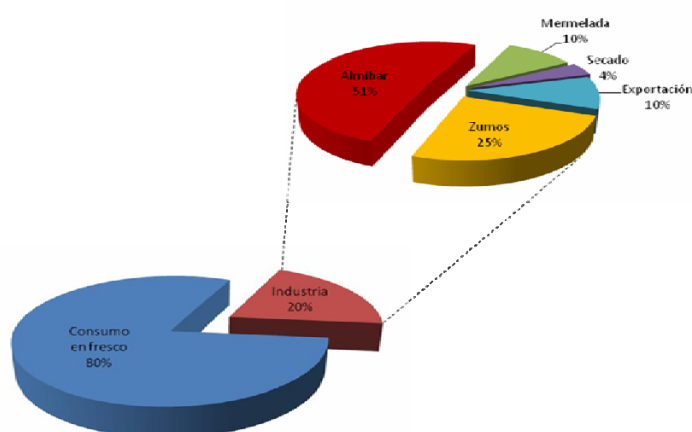


Figura 3. 1. Destino de la cosecha de melocotón en España.

3. Antecedentes

Según el MARM (2009), las principales zonas de producción son la Región de Murcia (218.300 t), Cataluña (213.000 t) y Aragón (220.500 t) que contribuyen al 77% de la producción nacional, le siguen Andalucía (72.400 t) y Extremadura (48.600 t) (Figura 3. 2).

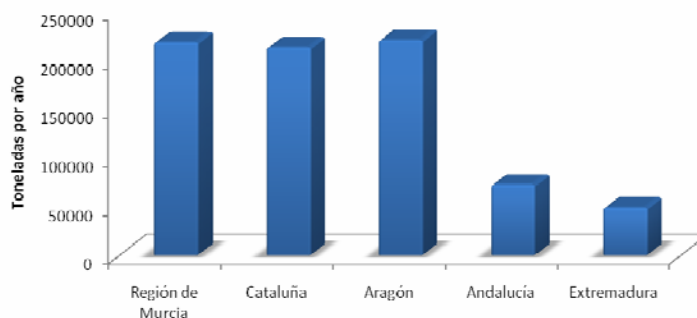


Figura 3. 2. Producción de melocotón en España (t año⁻¹). 2007

Según datos del Anuario Estadístico de la Región de Murcia (CARM, 2008), el melocotonero es el segundo frutal de hueso más importante en Murcia, después del almendro, con unas 12.000 ha y el primero en producción con un total 275.000 t, según datos estimados en 2009 (MARM, 2009). La producción de melocotón está concentrada en los municipios de Cieza (zona principal), Blanca, Abarán, Calasparra, Molina de Segura y Ulea (Figura 3. 3).



Figura 3. 3. Mapa de localización del cultivo de melocotonero en la Región de Murcia

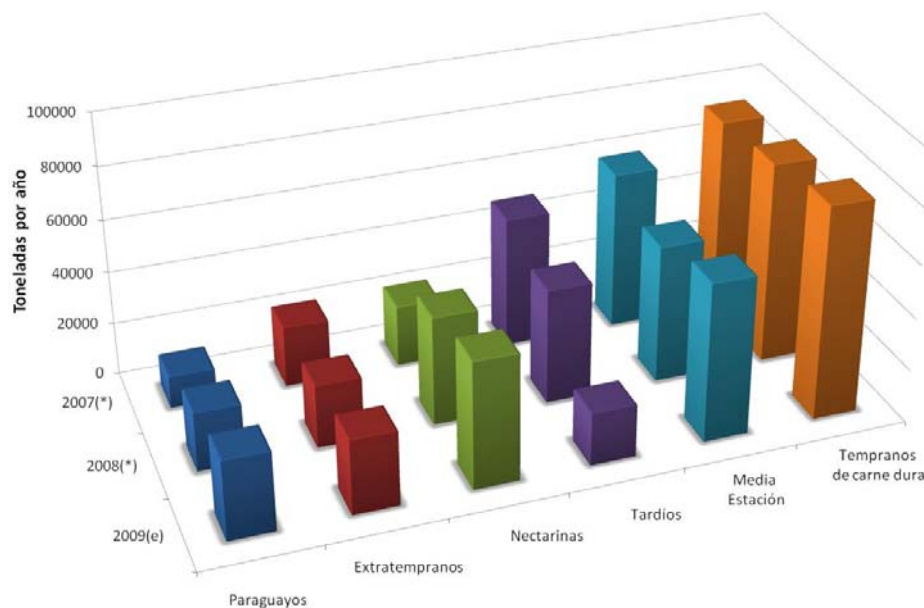


Figura 3. 4. Evolución de la participación de las diferentes variedades de melocotón en la producción de la Región de Murcia. (*) Datos provisionales, (e) Datos estimados. (CARM, 2009)

La mayor producción, dentro de las distintas variedades cultivadas de melocotón en los últimos años, corresponde a la de variedades tempranas de carne dura (Figura 3. 4), cuya época de recolección abarca desde finales del mes de mayo hasta el mes de septiembre.

El principal receptor de los melocotones murcianos es Alemania (23.3%) que, junto al Reino Unido (17.3%) y Francia (25.6%) acaparan más del 66% del total de las exportaciones.

El mercado actual para el melocotón de España está sobradamente cubierto, por lo que urge aumentar la demanda interna por medio de campañas de promoción, o diversificar los mercados (Badenes, 2000). Las tendencias de plantación del melocotonero se orientan al cultivo de variedades de maduración extratemprana en las zonas cálidas y al de variedades tardías de carne dura en las zonas menos cálidas.

En el sur de Europa y América, cada vez son más escasas las horas-frío necesarias para la mayoría de variedades californianas. Por este motivo existen problemas con variedades de melocotón como Springcrest y Maycrest, que no alcanzan la calidad deseada debido a esta falta de frío. Ello ha llevado a un interés creciente por la gama de variedades

des con bajas necesidades de frío como: Flordastar y Flordaking (en melocotón amarillo), Flordaglo (en melocotón blanco) o la nectarina amarilla Mayglo.

Las preferencias de los consumidores por el color de la carne y el uso del fruto (mercado en fresco, enlatado, congelación o secado) contribuyen a la diversidad y al gran número de cultivares cultivados en todo el mundo.

3.2 Riego en frutales

La mayor parte de las plantaciones de frutales se localiza en climas caracterizados por unas bajas e irregulares precipitaciones, lo que da lugar a fuertes déficits hídricos estacionales. La sensibilidad del melocotonero a la sequía obliga al cultivo en condiciones de regadío para la obtención de producciones rentables.

En el área mediterránea el agua es, sin lugar a dudas, el factor más limitante de la producción de frutas y hortalizas. En el caso de los frutales, el agua no sólo debe asegurar la obtención de producciones rentables sino que debe contribuir a mantener árboles capaces de producir en años subsiguientes (Ruiz-Sánchez y Girona, 1995).

El hecho de que la racionalización del agua se esté convirtiendo en un objetivo prioritario en las sociedades avanzadas, no sólo en el ámbito agrícola sino también en el industrial, urbano, servicios, etc., obliga a los investigadores a centrar sus esfuerzos en optimizar el uso del recurso. Este hecho es de singular importancia en el sector agrario, dado que éste utiliza el 75% de los recursos hídricos (Libro Blanco del Agua en España, 2008)

3.2.1 Necesidades hídricas

La mayor parte del agua consumida por una plantación de melocotoneros, como ocurre en las plantaciones de frutales en general, resulta

de la combinación de dos procesos: evaporación a la atmósfera a través del proceso de transpiración, y evaporación directamente desde la superficie del suelo. Desde este punto de vista, se considera la plantación formada por los árboles y la superficie del suelo, que puede estar desnuda o cubierta de hierba, ocurriendo los procesos de transpiración y evaporación simultáneamente por lo que se engloban en el término evapotranspiración (ET) (Fereres, 1978; Faci y Martínez-Cob, 1993; Gill *et al.*, 1996; Campbell y Willianson, 1997; Cohen *et al.*, 1997).

El conocimiento de la evapotranspiración de los cultivos es esencial para un uso eficiente del agua de riego. Sobre la utilidad y limitaciones de los diversos métodos desarrollados para medir la evapotranspiración existe abundante bibliografía, la más importante recogida en las revisiones de Martín de Santa Olalla y De Juan (1993), Farahani y Ahuja (1996) y Salvucci (1997).

La medida directa de la evapotranspiración incluye la pesada del sistema suelo-planta, sin embargo, debido al alto coste de los lisímetros y a la laboriosidad de su montaje y mantenimiento, se han desarrollado otras técnicas de medida indirecta, que estiman las necesidades de riego mediante diversas aproximaciones basadas en: variables agrometeorológicas (atmósfera), balance hídrico del suelo o índices del estado hídrico en la suelo o la planta, y que de forma resumida se comentan.

Agro-meteorológicas

Entre los métodos más utilizados se encuentran los basados en la ecuación de balance de energía usando variables meteorológicas estándar (Doorenbos y Pruitt, 1975; Allen *et al.*, 1998), aunque también existen los métodos micrometeorológicos como la covarianza de torbellinos (Foken y Wichura, 1996; Villalobos *et al.*, 2000), la razón de Bowen (Blad y Rosenber, 1974) o la renovación de la superficie (Paw *et al.*, 1992). En estos casos se obtiene una estimación de la evapotranspiración del cultivo (ETc) para períodos de tiempo relativamente largos y con poca precisión (Daudet y Vachaud, 1977; Jagtap y Jones, 1989), aunque en los úl-

timos años se han desarrollado modelos que permiten aproximaciones diarias (Testi *et al.*, 2006).

Merecen destacarse los métodos que con una perspectiva espacial intentan desarrollar índices relacionados con el estado hídrico del cultivo a partir de datos de sensores remotos (Allen *et al.*, 2005).

Balance hídrico del suelo

El balance hídrico se fundamenta en que el fenómeno de evapotranspiración se produce a expensas del agua almacenada en la zona radical (variación de stock), la cual proviene del riego y de las precipitaciones y, que junto a las pérdidas por drenaje y escorrentía, se representan de forma simplificada en la Figura 3. 5.

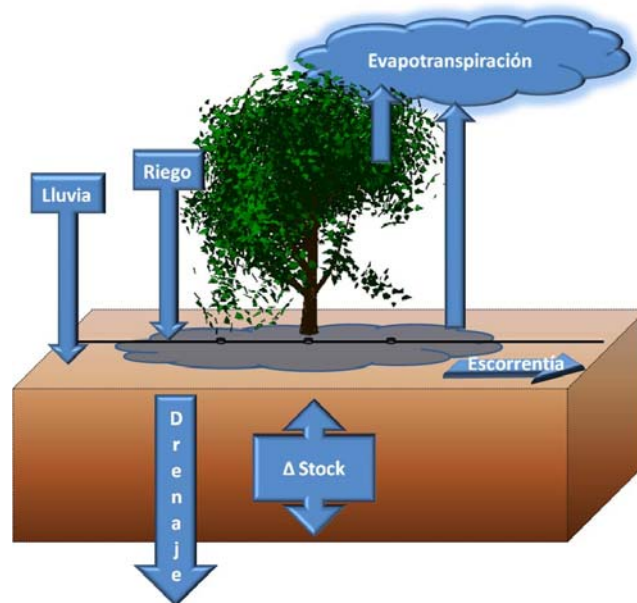


Figura 3. 5. Esquema general descriptivo de los componentes que intervienen en el balance de agua en el suelo.

El balance hídrico se realiza mediante la ecuación de conservación de la masa (Faures *et al.*, 1995; Kerkides *et al.*, 1996; Moreno *et al.*, 1996; Sánchez-Cohen *et al.*, 1997).

La variación del contenido de agua en el suelo deberá ser igual a las entradas de agua (lluvia y riego) menos las salidas de agua (drenaje, escorrentía y evapotranspiración):

$$\Delta S = P + I - (D + R + ET_c) \quad [3. 1]$$

donde: ET_c es la evapotranspiración del cultivo, P es la lluvia, I es el riego, ΔS es la variación de stock hídrico entre dos fechas, D es el drenaje por debajo del perfil y R es la escorrentía (Maraux y Lafolie, 1998; Schiller y Cohen, 1998).

Mediante la aplicación de un balance hídrico se pueden conocer todos los términos de la ecuación anterior menos la evapotranspiración del cultivo, la cual se despeja en función de los demás términos:

$$ET_c = P + I - \Delta S - D - R \quad [3. 2]$$

El método de balance hídrico ha sido ampliamente usado en cítricos (Koo y Sites, 1955; Koo, 1961; Kalma y Stanhill, 1969; Hoffman *et al.*, 1982; Smajstrla *et al.*, 1982; Wiegand y Swanson, 1982; Sharples *et al.*, 1985; Castel *et al.*, 1987; Metochis, 1989; Castel y Buj, 1990, 1993; Morgan, 1992; Durán, 1993; Sepaskhah y Kashefipour, 1995; Fares y Alba, 1999; Grismer, 2000) y en otros cultivos (McGowan y Williams, 1980; Vauchaud *et al.*, 1985; Moreno *et al.*, 1988; Andreu *et al.*, 1997). También en plantaciones de almendro en riego por goteo (Fererres, 1978; Holzapfel, 1979; Fereres *et al.*, 1981a; 1981b; 1982; Sharples *et al.*, 1985; Franco, 1993) y en otras especies (Franco *et al.*, 2000; Abrisqueta *et al.*, 2001)

Los dos componentes del método del balance hídrico que pueden ser medidos con un alto nivel de confianza son el riego y la variación del contenido de agua en el suelo. Con respecto a este último parámetro, McGowan y Williams (1980), han encontrado una gran variación en los cambios de agua almacenada en el suelo. Esto fue debido fundamentalmente a la heterogeneidad espacial de la distribución de la lluvia en el suelo, así como a la variación del drenaje y extracción de agua por las raíces. Esto requiere una especial atención ya que es necesario el au-

mento del número de puntos de muestreo cuando está siendo estimada la evapotranspiración. Además, esta variación es por lo general bastante grande bajo riego por goteo debido a la no uniformidad de la distribución del agua tanto en superficie como en profundidad.

Diferentes autores han realizado lecturas semanales o mensuales empleando de 1 a 38 tubos de acceso de sonda de neutrones (Koo, 1961; Kalma y Stanhill, 1969; Sharples *et al.*, 1985; Moreno *et al.*, 1988; Sepaskhah y Kashefipour, 1995; Andreu *et al.*, 1997; Fares y Alva, 1999).

Por otro lado, los otros dos componentes del balance hídrico que se determinan con un gran grado de incertidumbre son, la lluvia efectiva y el drenaje, el cual aumenta al incrementar la lluvia.

Castel y Buj (1990) consideran como lluvia efectiva toda aquella que es menor de 40 mm por semana, mientras que Domingo *et al.* (1996) consideran efectiva toda lluvia mayor de 5 mm al día y menor de 30 mm a la semana.

Morgan (1992) apunta que tanto la escorrentía como el drenaje son difíciles de medir, y que por lo tanto la evapotranspiración debería ser determinada durante periodos de relativamente escasa lluvia. Vachaud *et al.* (1985) proponen que el balance hídrico no es el método más apropiado para la estimación de la evapotranspiración cuando las lluvias son lo suficientemente abundantes como para producir escorrentía. Koo (1961) usa solamente periodos con menos de 3 mm de lluvia a la semana para reducir los posibles errores en la estimación de drenaje.

La metodología para el cálculo de las necesidades hídricas por balance hídrico cuando se emplea riego por goteo se ha desarrollado a partir de la utilizada en riego convencional de superficie, en el que se humedece prácticamente toda la superficie del suelo (Doorenbos y Pruitt, 1977), aunque teniendo en cuenta las características técnicas que diferencian al riego por goteo:

- Menor evaporación directa, al no humectarse toda la superficie del suelo

- Mayor transpiración del cultivo, debido a una más fácil disponibilidad de agua en los bulbos húmedos
- Mayor evaporación causada por los efectos de microadvección del suelo seco que rodea a los árboles (Gómez-Aparisi, 1990, 1991).

En general, se aplica un coeficiente de corrección relacionado con el porcentaje de suelo sombreado por el cultivo (Vermeiren y Jobling, 1980; Ervin y Koski, 1998).

Índices de estado hídrico del suelo

Para conocer la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, el volumen de agua de riego a aportar y la frecuencia de aplicación, se han desarrollado diversos métodos de medida de la humedad del suelo. El uso de sensores de humedad para el manejo del riego implica que el nivel de agua en el suelo se mantenga dentro de unos límites. De una forma simplificada el límite superior se relaciona comúnmente con la capacidad de campo en el perfil y el inferior con un umbral determinado por debajo del cual el cultivo sufre estrés hídrico (Campbell y Campbell, 1982).

Los sensores de humedad del suelo pueden medir el *potencial matricial* o el *contenido volumétrico de agua* del mismo. Los sensores que miden *potencial matricial* se basan en la medida directa de la tensión del agua en el suelo (tensiómetros) o de forma indirecta de la resistencia eléctrica del suelo (sensores matriciales granulares, tipo WaterMark®, o bloques de yeso); son relativamente baratos y de fácil uso por los agricultores (Eldredge *et al.*, 1993; Thompson y Armstrong, 1987). A pesar de la simplicidad de uso, estos sensores tienen restricciones técnicas que limitan su rango de trabajo y precisión en suelos en fase de desecación rápida (Campbell y Campbell, 1982; Thompson *et al.*, 2006). No obstante, se han utilizado con éxito en sistemas de control automatizado de los riegos (Phene y Howell, 1984; Phene *et al.*, 1989).

Los sensores de medida del *contenido de agua* en el suelo incluyen la sonda de neutrones y las sondas capacitivas tipo TDR y FDR (Holmes *et al.*, 1967; Campbell y Campbell, 1982; Gardner, 1986; Phene *et al.*, 1990). Los límites para el inicio del riego con estos sensores barajan la combinación de dos conceptos el “agua disponible o agua útil” y el de “nivel de agotamiento permisible” (NAP). El primero se define como la cantidad de agua entre capacidad de campo y punto de marchitez y el segundo se refiere a la reducción permisible en el agua útil antes de requerir un riego, es decir el contenido de humedad en el suelo por debajo del cual la absorción radicular consume energía en detrimento de la producción. Por ello convendría mantener el nivel de agua del suelo entre la capacidad de campo y el NAP, lo que correspondería al concepto de “agua fácilmente disponible” (AFD) (Doorenbos y Kassam, 1979; Allen *et al.*, 1998; Fares y Alva, 2000a; Fares y Polyakov, 2006).

El uso de la sonda de neutrones se ha limitado a los centros de investigación debido al riesgo radioactivo que lleva y la complejidad de su mantenimiento (Gear *et al.*, 1977).

Las sondas tipo TDR (Time Domain Reflectometry) (Topp *et al.*, 1980) se presentaron como herramienta portátil que no necesitaba calibración y permitía medir con precisión el contenido volumétrico de agua en el suelo. Topp y Davis (1985), discutieron en detalle la aplicación del TDR y la posibilidad de utilizarlo en el control del riego. Sin embargo, su precio alto y su sensibilidad a la salinidad del suelo (Dalton, 1992) han limitado su uso a centros de investigación.

En 1997, Paltineanu y Starr, presentaron una nueva versión de sondas capacitivas tipo FDR (Frequency Domain Reflectometry) menos sensible a la salinidad y temperatura del suelo, más barata que el TDR, más versátil y práctica de utilizar. Este tipo de sondas permite un registro continuo de las variaciones de humedad en la zona radicular de los cultivos (Starr y Paltineanu, 1998), por lo que resulta muy eficaz en la automatización del riego.

La calidad de los datos obtenidos con la sonda FDR depende mucho de su instalación ya que el radio de influencia de los sensores es relativamente pequeño (Mounzer *et al.*, 2006, 2007). En ausencia de huecos entre el sensor y el suelo su precisión es de $\pm 0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Muñoz-Carpena, 2004). Las variaciones de temperatura entre 10 y 30 °C tienen un efecto imperceptible en la medida de la humedad del suelo (Paltineanu y Starr, 1997). El acoplamiento de los sistemas de adquisición de datos de las sondas capacitivas con un sistema de radio-transmisión permite monitorizar en tiempo real la dinámica del agua y su disponibilidad para el cultivo (Fares y Alva, 2000; Vera *et al.*, 2009).

Índices de estado hídrico de la planta

Un indicador de la situación hídrica de un cultivo debe detectar lo antes posible una situación de déficit hídrico, ser representativo y robusto. La evaluación directa del estado hídrico de las plantas se puede determinar a través del contenido de agua o de su estado energético (potencial hídrico) en los distintos órganos vegetales, mientras que la indirecta engloba la medida de las consecuencias de la falta de agua en los órganos vegetales, como son las variaciones del diámetro del tronco, la temperatura foliar, el intercambio gaseoso (conductancia estomática, transpiración, fotosíntesis), etc.

Los métodos basados en indicadores del estado hídrico de la planta constituyen una valiosa herramienta para el manejo del riego dada su naturaleza dinámica, la cual está estrechamente relacionada con las condiciones climáticas y del suelo, así como con la productividad del cultivo (Goldhamer *et al.*, 2003; Remorini y Massai, 2003; Intrigliolo y Castel 2006a, b; Ortuño *et al.*, 2006a).

Los principales indicadores del estado hídrico de la planta se muestran de forma resumida en la Tabla 3. 2, agrupados en los que permiten una medida continua o discontinua, cuál es su significado fisiológico, las principales ventajas e inconvenientes y cómo resultan afectados por el déficit hídrico.

3. Antecedentes

Tabla 3. 2. Resumen de las características de los principales indicadores del estado hídrico de la planta

Medida discontinua	Descripción	Método de medida	Ventajas / Desventajas
Contenido relativo de agua, CRA..	Contenido actual de agua en un tejido (P_{fresco}) con respecto al contenido máximo a plena turgencia ($P_{máx}$).	Determinación del peso fresco, peso a plena turgencia y peso seco. $CRA = \frac{P_{fresco} - P_{seco}}{P_{máx} - P_{seco}}$	Dificultad para la medida en campo y la correcta determinación de $P_{máx}$.
Potencial hídrico, ψ :	$\psi = \psi_s + \psi_p + \psi_m + \psi_g$ Dado que el componente gravitacional es despreciable, y el matricial suele incluirse en el osmótico, a efectos prácticos: $\psi = \psi_s + \psi_p$	En hojas o tallo con la cámara de presión (Scholander et al., 1965; Turner, 1998; Hsiao, 1990).	Es el parámetro más utilizado para representar el estado hídrico de las plantas. La cámara de presión permite una lectura rápida, sencilla y económica en condiciones de campo (Spomer, 1985; Bennet, 1990). Laboriosidad en las medidas. Imposibilidad de automatizar.
Potencial osmótico, ψ_s	Debido a la presencia de solutos disueltos en los tejidos vegetales.	Osmómetro (Turner, 1986).	Afectado por: factores ambientales locales y endógenos que hace que sus niveles varíen según el momento del día (Torrecillas et al., 1988), a lo largo de la estación de crecimiento (Winkel y Rambla, 1993), con la edad de la hoja (Ruiz-Sánchez et al., 1997) o con la orientación o posición que ocupan en el árbol (Sánchez-Blanco, 1983).
Potencial de presión, ψ_p	Causado por el conjunto de presiones de turgencia y presiones hidrostáticas del xilema.	Sonda de presión (Steudle, 1990).	
Potencial matricial, ψ_m	Refleja la presencia de agua no osmótica en los tejidos		
Potencial gravitacional, ψ_g	Representa la diferencia de energía potencial debida a la diferencia de altura.		
Intercambio gaseoso.	Pérdida de agua y entrada de CO ₂ a través de los estomas, lenticelas y cutícula de la hoja (Kramer, 1983).		
Conductancia foliar.	Mide el grado de apertura de los estomas en términos de pérdida de agua.	Porómetro de difusión y analizador de gases por infrarrojos.	Permite la medida en campo Papel esencial de los estomas en la fisiología de la planta. Afectado por numerosos factores exógenos y endógenos y tiene errores en el muestreo, por lo que no es un indicador del estado hídrico eficaz (Jones, 1990).
Fotosíntesis.	Tasa de asimilación neta de CO ₂ en hojas.	Analizador de gases por infrarrojos.	

Medida discontinua	Descripción	Método de medida	Ventajas / Desventajas
Florescencia de las clorofilas.	Índices basados en la reflexión de la luz por las hojas a diferentes longitudes de onda (Peñuelas et al., 1993).	Técnicas de teledetección (espectrorradiómetros).	
Tasa de transpiración foliar.	Evaluada como pérdida de agua.	Métodos gravimétricos (León <i>et al.</i> , 1986), con el uso de porómetros o analizadores de gases por infrarrojos (Pearcy <i>et al.</i> , 1991), con lisímetros (Yang <i>et al.</i> , 1990) o con la determinación del flujo de savia en el xilema.	Aumenta a lo largo del día en respuesta al aumento de radiación y DPV. El retraso entre la transpiración y la absorción de agua provoca cierto grado de déficit hídrico.
Temperatura foliar.	La evaporación del agua transpirada permite la regulación térmica de la hoja. Medida del calentamiento de la hoja debido al cierre estomático en respuesta al déficit hídrico.	Termómetros de infrarrojos.	Se usa desde los años 60 como indicador del estrés de la planta (Jackson, 1982; Hatfield, 1983). Difícil interpretación debido a que se involucran un gran número de factores ambientales y de la planta (Gardner <i>et al.</i> , 1992).
Movimientos foliares.	Variación de la orientación o epinastia, enrollamiento de las hojas o disminución del crecimiento.	Transportador de ángulos, medidores de área foliar.	No permiten su registro automático y requieren laboriosas determinaciones en campo.
Crecimiento del fruto.	Cambios en diámetro, peso o volumen.	Calibres o dendrómetros (registro continuo). Relaciones alométricas para la conversión del diámetro a peso o volumen (Domingo, 1994; Mounzer <i>et al.</i> , 2007).	Se pueden establecer valores umbrales para indicar cambios de riego en estrategias de riego deficitario (Ebel <i>et al.</i> , 1995). El empleo de sensores de desplazamiento lineal permite automatizar estas medidas con un registro continuo (Link <i>et al.</i> , 1998; Kainer <i>et al.</i> , 2006). Proceso más lento en la detección del estrés hídrico que otros indicadores.

3. Antecedentes

Medida continua	Descripción	Método de medida	Ventajas / Desventajas
Cavitación.	Interrupción de la columna de agua en los vasos conductores del xilema que se produce cuando se supera un determinado umbral de tensión.	La interrupción de la columna de agua produce sonidos audibles o ultrasonidos que pueden ser registrados por detectores de forma automática (Tyree y Dixon, 1983). De manera indirecta por la pérdida de conductividad hidráulica de ramos.	Dichos registros acústicos podrían servir para programar el riego (Jones, 1990). Además del estrés hídrico la causan ciclos de congelación y descongelación, factores mecánicos y la presencia de agentes patógenos.
Contenido hídrico del tronco.	Cambios en el contenido hídrico de tronco o ramos.	Técnicas de reflectometría en el dominio del tiempo (Time Domain Reflectometry, TDR).	Complejidad y coste de los equipos (Nadler <i>et al.</i> , 2006).
Variaciones de diámetro de tronco o ramos.	Cambios diarios de diámetro del tronco debidos al desequilibrio entre la demanda climática y la capacidad absorbente de las raíces durante las horas de sol (contracción) que durante la noche recupera el equilibrio hídrico (hinchamiento). Muestra valores mínimos en las horas centrales del día y máximos a primeras horas de la mañana.	Sensores de desplazamiento variable y respuesta lineal, de alta precisión (dendrómetros).	Robustos indicadores del estado hídrico de las plantas gracias a los avances tanto en electrónica computacional como en ciencia de los materiales (Ginestar y Castel, 1996; Fereres y Goldhamer, 2000). Han sido utilizadas para la programación automática del riego (Huguet, 1985; Schoch <i>et al.</i> , 1989, 1990; Goldhamer y Fereres, 2001; Ortuño <i>et al.</i> , 2006; Conejero <i>et al.</i> , 2007; García-Orellana <i>et al.</i> , 2007). Algunas especies muestran una disminución de la máxima contracción diaria al sobrepasar un umbral de déficit hídrico (Klepper <i>et al.</i> , 1973; Hinckley y Bruckerhoff, 1975; Huguet <i>et al.</i> , 1992; Goldhamer <i>et al.</i> , 1999).
Flujo de savia.	Velocidad del movimiento de agua desde las raíces a las hojas que depende de la disponibilidad del agua en el suelo y de la capacidad de los estomas a responder a la demanda bioclimática.	Técnicas térmicas se clasifican en tres grupos: método: radial del calor constante (Granier, 1985), método de balance de calor (Valancogne y Nasr, 1989) y método de pulso de calor (Marshall, 1958).	Útil para determinar el consumo de agua, la dinámica de la transpiración e indicador de estrés hídrico por su gran sensibilidad a los factores climáticos reinantes. Cuidado esmerado en la instalación de los sensores. Taponamiento de los vasos. Requiere el conocimiento de la sección conductora en el punto de medida.

3.2.2 Riegos deficitarios

El término, riego deficitario (RD), se usa para definir las prácticas de riego deliberadas y sistemáticas donde sólo una fracción de las necesidades de agua de los cultivos no satisfechas por las lluvias es reemplazada por el riego.

El **riego deficitario de alta frecuencia** consiste en regar todo el ciclo por debajo de la demanda del cultivo pero utilizando una frecuencia de aportes lo suficientemente alta como para evitar la aparición de situaciones de estrés trascendentes (Sánchez-Blanco y Torrecillas, 1995). Si bien el riego deficitario de alta frecuencia puede constituir una alternativa ante determinadas circunstancias, éste presenta lagunas importantes, como no considerar que el déficit hídrico puede resultar más a menos trascendente en función del momento fenológico.

Un paso adelante en la mejora de la eficiencia del uso del agua fue la aplicación de estrategias de **riego deficitario controlado (RDC)**, que desde finales de la década de los 80 se vienen aplicando a diversos frutales, entre ellos el melocotonero, en las que los déficits hídricos se hacen coincidir con determinados períodos fenológicos. El RDC es una alternativa en situaciones de limitada disponibilidad de agua para riego que trata de adecuar los aportes hídricos al comportamiento fisiológico del árbol, y se basa en reducir las dosis de agua a aplicar en momentos o períodos fenológicos en los que el déficit hídrico no afecta (o afecta menos) a la producción final, aplicando el 100% de las necesidades hídricas en los períodos críticos, que en el caso de los frutales y en concreto el melocotonero, coincide con la fase III de rápido crecimiento del fruto (Chalmers *et al.*, 1981).

El melocotonero ha sido utilizado como planta modelo en diversos ensayos de RDC debido posiblemente al hecho de poseer dos características de antemano ventajosas en la aplicación de estas estrategias de riego, como son la clara diferenciación de las tres fases de crecimiento del fruto, especialmente en las variedades tardías (Connors, 1919; Chalmers y van den Ende, 1975; DeJong *et al.*, 1987) y una clara separación de los

procesos de crecimiento vegetativo y del fruto, precediendo en el tiempo la fase de rápido crecimiento de los ramos a la del fruto (Chalmers *et al.*, 1981).

El crecimiento del melocotón, al igual que el de otras drupas, corresponde al de una doble sigmoide con tres fases bien diferenciadas (Figura 3. 6).

La fase I es una fase de activa división celular, incluye también el primer período de rápido crecimiento en el que el volumen del endocarpio es el que más se ve incrementado. A pesar de lo trascendente de esta fase, hay que señalar, que coincide con un período de bajos requerimientos hídricos y ligeras precipitaciones pueden aliviar cualquier tipo de déficit (Chalmers *et al.*, 1984; Li *et al.*, 1989a, c), por lo que la sensibilidad al déficit hídrico no es clara.

Durante la fase II el fruto crece exteriormente de forma muy lenta, teniendo lugar los procesos de endurecimiento del hueso, por esto parece ser una fase de baja sensibilidad al déficit hídrico (Chalmers *et al.*, 1981).

La fase III corresponde al segundo período de rápido crecimiento, básicamente debido a un engrosamiento de las células del mesocarpio. Al igual que en otros frutos con alto contenido hídrico, es la fase crítica más sensible al déficit hídrico por su efecto en el peso y tamaño finales (Chalmers *et al.* 1981; Li *et al.*, 1989c).

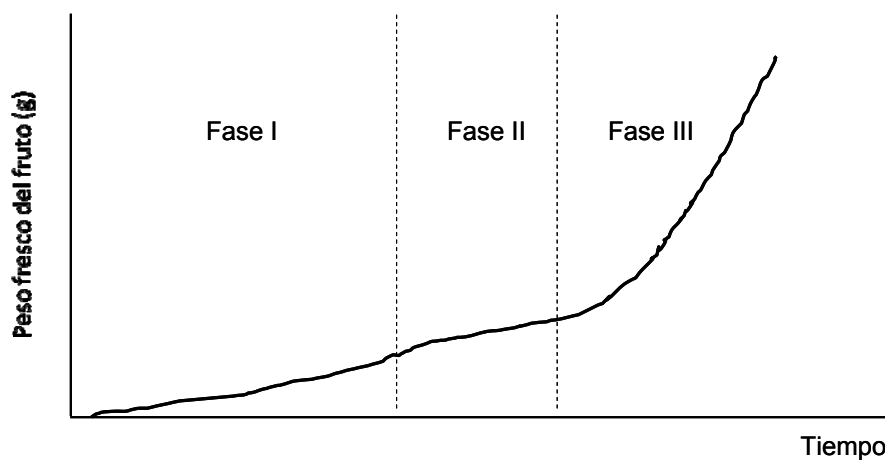


Figura 3. 6. Crecimiento del melocotón en peso fresco e identificación de las 3 fases de desarrollo del fruto

En todas las variedades de melocotonero el crecimiento vegetativo tiene lugar durante los 3 primeros meses del ciclo, aunque en variedades tempranas se puede apreciar un segundo crecimiento después de la cosecha. De esta forma, el crecimiento vegetativo activo coincide con las fases I y II de crecimiento del fruto (que suponen en variedades tardías tan sólo el 2% de su volumen final) (Chalmers *et al.*, 1984).

Esta separación en el tiempo de los procesos de rápido crecimiento del fruto (fase III) y de los ramos permite aplicar déficits hídricos de forma que la reducción del riego durante la brotación y desarrollo de los ramos limitaría este proceso, pudiéndose atender plenamente las necesidades de la planta durante el crecimiento del fruto, sin limitar el tamaño final del mismo.

Los primeros resultados obtenidos en melocotonero bajo RDC se realizaron por investigadores australianos (Chalmers *et al.*, 1981, 1984; Mitchell y Chalmers, 1982) quienes consiguieron ahorros de agua en torno al 30% con reducciones del riego en las fases I y II de crecimiento del fruto y riego al 100% de las necesidades hídricas en la fase III. En variedades de maduración tardía, el RDC ha sido utilizado con éxito en Lleida, aplicando déficit de riego (35% de la ETc) durante la fase II de crecimiento del fruto y en la poscosecha, sin afectar la producción final ni la calidad de la cosecha. Estos ensayos se han realizado en suelos profundos (Girona *et al.*, 2005) con ahorros de agua de riego del 35%, así como en suelos más superficiales (Girona *et al.*, 2003), donde los ahorros de agua fueron menores (22%).

En melocotón para industria, Rufat *et al.* (2009) plantearon estrategias de riego que, sin afectar negativamente a la producción total o incluso mejorando algunos aspectos cualitativos, puedan compensar ligeras disminuciones en producción. Los ahorros de agua fueron del 12% y los déficits de riego se aplicaron durante la fase II de crecimiento del fruto donde se regó al 40% del control o en un déficit ligero (al 70% del control) durante la fase III.

En albaricoqueros 'Búlida' reducciones de riego superiores al 30%, respecto a las máximas necesidades del cultivo, originaron disminuciones muy importantes de los rendimientos y, por lo tanto, no parecen recomendables desde el punto de vista económico. Sin embargo, aportes del 40% de la evapotranspiración del cultivo (ETc) durante los períodos menos sensibles al déficit hídrico, permiten ahorros de agua del 20% respecto a las necesidades totales sin afectar a la producción ni a la calidad de la cosecha, siempre y cuando se mantenga el riego al 100% de la ETc durante los periodos críticos: segunda fase de rápido crecimiento del fruto (Fase III) y período postcosecha inicial, aproximadamente los 2 meses siguientes a la cosecha (Torrecillas *et al.*, 2000). El RDC, así manejado, constituye una estrategia de riego muy válida cuando se dispone de aguas de baja salinidad (Domingo *et al.*, 2001 y Pérez-Pastor *et al.*, 2009).

Otra estrategia de riego deficitario planteada recientemente es la denominada **riego parcial de raíces (RPR)**, del inglés Partial Rootzone Drying (PRD). Se trata de una técnica de riego localizado, desarrollada en Australia, que ha permitido importantes ahorros de agua sin pérdidas en el rendimiento y calidad de la cosecha (Loveys *et al.*, 1997, 1998).

El RPR se basa en el papel que las fitohormonas pueden jugar en el control de las pérdidas de agua vía transpiración (Dry *et al.*, 2000a, b). Existen evidencias de que las raíces responden ante la disminución del potencial hídrico del suelo enviando señales de tipo químico al tallo, tales como el ácido abscísico (ABA), que promueven el cierre estomático (Zhang y Davies, 1991; Davies *et al.*, 1994).

El RPR trata de separar la respuesta bioquímica de la planta al estrés hídrico (aprovechando sus efectos beneficiosos) de los efectos adversos de la falta de agua. Para ello una parte del sistema radical permanece húmedo (con riego), con lo que se asegura un aporte hídrico suficiente para mantener el vigor de la parte aérea, mientras que otra zona del sistema radical permanece seca (sin riego), con lo que se liberan señales bioquímicas que son transportadas vía xilema a las hojas donde regulan la apertura de estomas, limitando las pérdidas de agua vía trans-

piración. El cambio de zona de riego se alterna cada 10-15 días. El resultado final son plantas con un crecimiento y producción elevado y un consumo inferior de agua, o lo que es igual, una mejora en la eficiencia del uso del agua.

Esta metodología ha sido utilizada con éxito especialmente en uva de mesa, donde se han descrito mejoras en la eficiencia del uso del agua entre un 26 y un 86% dependiendo de la variedad seleccionada, sin pérdida en la calidad de la uva, debido al papel de las señales químicas que no sólo regulan la transpiración, sino que también potencian procesos como ajuste osmótico que incrementa la cantidad de azúcares y sólidos solubles tanto en las hojas como en los frutos (Dry *et al.*, 1998, 1999).

Potencialmente todas las plantas son capaces de responder de forma similar al RPR, habiéndose citado importantes ahorros de agua sin impactos negativos en el fruto ni en la producción total en manzano (Gowing *et al.*, 1990; Caspari *et al.*, 2004). En olivo, no obstante Fernández *et al.* (2006) indican que alternar el riego no supone un cambio importante en la absorción de agua por las raíces de una u otra parte del árbol, y que la reducción observada en la transpiración de árboles bajo RPR fue similar a la de árboles en RDC, por lo que no se justifica la mayor inversión y dificultad en el manejo del RPR.

En uva Tempranillo, Intrigliolo y Castel (2009a) indican que el RPR no produjo diferencias ni en el crecimiento vegetativo ni en la producción, ni calidad del vino a igualdad de agua de riego aplicada. Por lo que parece que es la cantidad de agua y no la forma de aplicarla la que afecta el comportamiento de las viñas, confirmando las conclusiones de Marsal *et al.* (2008), quienes indican que el RPR es menos efectivo en suelos profundos que en suelos arenosos donde los ciclos de secado se manejan más fácilmente.

3.3 Sistema radical

3.3.1 Absorción radical

En las plantas la absorción de agua está condicionada por la distribución del sistema radical, que depende de la especie (cultivar y portainjerto), de las condiciones ambientales y características del terreno, y por el agua disponible en el suelo (Atkinson, 1980; Wiersum, 1980; Drew, 1988; Baker *et al.*, 1992; Klepper, 1992; Smucker y Aiken, 1992; Zhang *et al.*, 1996; Burgess *et al.*, 1998).

La distribución de un sistema radical se puede definir por la densidad de longitud de raíces (DLR), expresada como cm de raíz por cm³ de suelo, por la longitud radical para cada profundidad, o en el perfil completo, por el peso de las raíces en las diferentes capas del perfil y por la profundidad de enraizamiento (Kage y Ehlers, 1996; Grabarnik *et al.*, 1998).

Una elevada absorción hídrica está asociada a altos valores de DLR sólo cuando el agua está realmente disponible. No obstante, cuando existen tensiones de agua elevadas, las zonas con bajos valores de DLR, pero más alto contenido hídrico, son capaces de suplir la mayor parte de agua que necesitan.

Aunque se ha observado que la suberización de los tejidos exteriores de la raíz provoca una disminución en la absorción de agua a través de éstos (Hayward y Spurr, 1943; Kramer y Bullock, 1966), no se puede afirmar por ello que la raíz haya dejado de funcionar, ya que se ha observado también que las raíces pueden absorber agua a través de grietas, heridas y lenticelas de su superficie (Kramer, 1983; Faust, 1989).

Además, se debe tener en cuenta que la proporción de raíces suberizadas es mayor que la de no suberizadas (sólo abundantes en periodos de desarrollo) (Kramer y Bullock, 1966; Adiku *et al.*, 1996; Okano y Omae, 1996; Pietola y Smucker, 1998); por ello, a pesar de ser menos absorbentes, la cantidad de agua absorbida por las raíces suberizadas de los frutales puede ser incluso mayor que la absorbida por las no suberizadas, en algunos momentos (Wild, 1992; Burgess *et al.*, 1998).

En este sentido, se puede observar que el crecimiento radical de cerezos, ciruelos, albaricoqueros (Head, 1967), olivos (Fernández *et al.*, 1992) y almendros (Ross y Catlin, 1978; Franco, 1993), se reduce drásticamente sobre la mitad del verano, donde se dan elevadas demandas evapotranspirativas, por lo que se puede deducir que un elevado porcentaje de agua es absorbido a través de raíces suberizadas.

En consecuencia, actualmente no se considera una división entre las raíces en zonas absorbentes (no suberizadas) y no absorbentes (suberizadas), sino que se realiza una división en zonas de mayor o menor absorción hídrica, planteándose como principal problema la determinación de la superficie radical activa en la absorción de agua (Brown y Upchurch, 1987; Wiersum, 1987).

3.3.2 Métodos de medida del sistema radical

Gracias a los estudios de **distribución** de raíces se sabe que en la mayoría de los árboles frutales en sistemas de cultivo tradicionales, las raíces se desarrollan entre los 20 y 100 cm de profundidad, con un 70% en los primeros 40 cm (Faust, 1989). Para árboles frutales cultivados en régimen de riego por goteo la distribución radical cambia sensiblemente desarrollándose ésta de modo más concentrado y limitado a la zona humedecida, y dentro de ésta en los horizontes más superficiales (Ruggero, 1984; Ramos *et al.*, 1987; Villeneuve y Bousquet, 1987; Michelakis y Vougioucalou, 1988; Van Zyl, 1988; Faust, 1989; Chalmers, 1990; Fernández *et al.*, 1992), atribuyéndose este fenómeno a una mejor aireación de las capas superficiales (Baldini, 1992).

Mediante los estudios de **dinámica** de raíces se obtiene información acerca de la evolución de las mismas, pudiéndose determinar las épocas de crecimiento y la intensidad de la exploración del sistema radical en el perfil del suelo.

Si, en general, los estudios de las raíces en condiciones de campo son difíciles y laboriosos, esto es particularmente así en los que hacen referencia a la dinámica del sistema radical, al requerir sucesivas y fre-

cuentas medidas en el mismo sitio, lo que no es posible mediante las técnicas de muestreo que implican la destrucción de las raíces.

Sachs (1873) fue el primer investigador que propuso hacer crecer las plantas en contenedores de paredes transparentes, para poder observar las raíces y hacer un seguimiento diario de su crecimiento. Esta técnica ha sido posteriormente difundida por todo el mundo como un buen medio para observar las raíces en condiciones de campo, destacando los trabajos de Garwood (1967) sobre la variación estacional del desarrollo radical de plantas de césped.

Oskamps y Batjer (1932) demostraron que mediante el recuento de las raíces que se encuentran en la pared de un perfil de suelo, puede, de una forma sencilla, determinarse su distribución en el mismo.

Hall *et al.* (1953), introdujo los isótopos radiactivos en los estudios del sistema radical de las plantas, sin embargo, pronto se comprobó que, aunque los isótopos radiactivos son una herramienta importante para la investigación de la fisiología radical no lo son para el estudio de la ecología de las raíces.

Hasta mediados del siglo XX casi todos los estudios se centraron en el puro conocimiento de las raíces de las plantas. A partir de entonces, se realizaron teniendo en cuenta las condiciones ecológicas del medio en el cual tiene lugar el desarrollo de las raíces; estos trabajos son la base fundamental de la moderna ecología de las raíces.

Cabe destacar las revisiones sobre metodología de estudio del sistema radical de Troughton (1957), Krasilnikov (1960), Shalyt (1960), Mckell (1962), Carlson (1965), Lieth (1968), Newbould (1968), Yorke (1968), Schuurman y Goedewaagen (1971), Kolesnikov, (1971; 1972), Böhm *et al.* (1977), Böhm (1979) y Heeraman y Juma (1993).

La necesidad de más datos sobre la dinámica del desarrollo radical, indujo a la construcción de modernos laboratorios bajo tierra, llamados rizotrones (del griego *rhizos*: raíz y *tron*: instrumento de estudio), dedicados al estudio de las raíces a través de paredes de cristal. Desde que se construyó el primer prototipo en 1962 en East Malling, Inglaterra (Ro-

gers, 1969), muchos de estos laboratorios han sido construidos por todo el mundo (Hilton *et al.*, 1969; Taylor, 1969; Taylor y Böhm, 1976).

Pearson y Lund (1968) y Roberts (1976) emplean el más simple rizotrófon en plantas de algodón en condiciones de campo, que consiste en la colocación de placas de cristal en las paredes de una trinchera abierta al suelo.

Más tarde se incluyen los elementos necesarios para que se pueda medir el agua que drena por el suelo. En definitiva se trata de asociar al rizotrófon un lisímetro (Soileau *et al.*, 1974; Arkin *et al.*, 1978; Karnok y Kucharski, 1982).

Actualmente, los rizotrones se están empleando no sólo para el estudio de la dinámica radical, sino para otros muchos fines como son: i) la lixiviación a través del perfil del suelo de determinados compuestos químicos; ii) influencia de la temperatura del suelo en el desarrollo de la raíz y de la parte aérea de una planta; iii); influencia de los cambios del contenido de oxígeno sobre el desarrollo radical; iv) el efecto de la capa freática sobre los diferentes estados de desarrollo.

Waddington (1971) describió una técnica para la observación de raíces de trigo, en la que emplea tubos cilíndricos de paredes acrílicas transparentes. Pero fue Bates (1937) el primero que utilizó tubos de cristal insertados en el suelo. El fundamento se basa en que las raíces en su crecimiento, chocan con las paredes del tubo y son vistas desde el interior de éste mediante un espejo montado en una varilla conjuntamente con un sistema de iluminación.

Böhm (1974), empleó tubos de vidrio de 15 cm de longitud para observar en el campo las raíces del rábano. Fue el primero en emplear la palabra *minirrizotrófon* y en comparar los resultados obtenidos con otros sistemas de observación de raíces en condiciones de campo.

Las partes comunes de estos sistemas de medida de la dinámica radical son (Brown *et al.*, 1987):

3. Antecedentes

- Tubo transparente de observación (minirrizotrón), sobre cuyas paredes exteriores son interceptadas las raíces al azar (Fotografía 3. 6).
- Equipo que permite ver las raíces desde el extremo exterior del tubo; puede ser una lente o una cámara que es insertada en el tubo (Fotografía 3. 6).
- Equipo para grabar y almacenar la imagen.
- Dispositivo para transportar todo el equipo.

Los tubos deben introducirse en el suelo antes de que se realice la plantación o al inicio de ésta y deben mantenerse limpios para capturar imágenes óptimas.



Fotografía 3. 6. Minirrizotrón y escáner para la adquisición de imágenes.
Fuente: CID, Inc. (www.cid-inc.com).

Sanders y Brown (1978) sustituyen el espejo por un duodenoscopio equipado con una cámara fotográfica de 35 mm. Posteriormente, otros investigadores usaron endoscopios (Maertens y Clauzel, 1982; Vos y Groenworld, 1983), y boroscopios equipados con cámara de televisión para grabar imágenes de las raíces en una cinta de video (Upchurch y Ritchie, 1983; 1984; Box *et al.*, 1989; Ferguson y Smucker, 1989; Majdy *et al.*, 1992). La utilización del color junto con monitores de alta resolución, permite que ésta sea introducida en minirrizotrones de 50 mm de diámetro. Smucker *et al.* (1987) describen un sistema automático de movimiento

de la cámara de video en el interior del minirrizotrón, el cual ha sido posteriormente utilizado por otros autores (Cheng *et al.*, 1991).

Taylor y Böhm (1976) advierten que la utilización de un tubo de plástico, frente al de vidrio descrito por Bates (1937) produce una separación del suelo cuando el contenido hídrico del mismo disminuye. Generalmente los minirrizotrones son tubos cilíndricos de diámetro variable, sin embargo, Sanders y Brown (1978) emplean un minirrizotrón en forma de prisma de base cuadrada

La instalación del tubo es crítica, pues es imprescindible conseguir que se mantenga una buena interfase suelo-tubo (Cheng *et al.*, 1991). Algunos investigadores han utilizado un sistema de paredes hinchables para lograr una perfecta adaptación (Merrill *et al.*, 1987; Gijnsman *et al.*, 1991); otros autores, con este mismo fin, proponen la utilización de tubos de pared flexible, para que el crecimiento de las raíces en la interfase suelo-tubo sea más representativo del desarrollo radical (Box y Jonson, 1987; Maertens, 1987).

En los primeros estudios mediante minirrizotrones, los tubos se instalaron en el suelo verticalmente, pero en la actualidad se considera que dicha posición no es recomendable ya que el suelo de la interfase suelo-tubo es menos compacto, lo que crea vías de crecimiento rápido, sobreestimándose, consecuentemente, el desarrollo radical (Bragg *et al.*, 1983). A pesar de esto, algunos investigadores siguen utilizando esta orientación en trabajos recientes (Barrs *et al.*, 1990; Meyer y Barrs, 1991).

Sin duda, la colocación de los tubos horizontalmente a diferentes profundidades, cubriendo la zona de desarrollo radical (Dugas *et al.*, 1985; Meyer y Barrs, 1985) es teóricamente la mejor; sin embargo, dado las dificultades que entraña su instalación, se ha optado por colocarlos inclinados formando diversos ángulos con la vertical: 15° (Rasiah *et al.*, 1992), 20-25° (Glenn *et al.*, 1987a), 60° (Ball-Coelho *et al.*, 1992), y mayoritariamente, 45° (Sanders y Brown, 1978; Bragg *et al.*, 1983; Abrisqueta *et al.*, 1991; Fernández *et al.*, 1992; Hendrick y Pregitzer, 1992; Majdy *et al.*, 1992).

3. Antecedentes

En los primeros trabajos, la longitud radical se calculaba utilizando el principio de Newman (Newman, 1966), basado en los cruces de las raíces distribuidas al azar sobre las líneas de una cuadrícula, para posteriormente relacionar esta longitud con el volumen de suelo en el que estaban contenidas (Taylor *et al.*, 1970; Böhm, 1974; Sanders y Brown, 1978); en la actualidad, la medida se lleva a cabo mediante el conteo de número de raíces que se observa en una superficie determinada de la pared del tubo (Upchurch y Ritchie, 1983; Upchurch, 1987).

Cuando se utilizan los minirrizotrones para calcular la DLR, hay que considerar que las raíces que se observan a través de las paredes del tubo desde su interior, se encuentran ocupando un volumen de suelo que no va más allá de 2 ó 3 mm por detrás de la pared exterior del minirrizotrón y, por tanto, puede calcularse el volumen de suelo en que se localizan las raíces; este procedimiento fue usado por Sanders y Brown (1978), y por Moore (1981). Sin embargo, Upchurch y Ritchie (1983), convierten el número de raíces observadas con el minirrizotrón, directamente en densidad de longitud radicular, independientemente de la longitud y diámetro de las mismas.

Se han encontrado valores de densidad de longitud radicular del orden de 36 a 343 cm de raíz por cm^3 de suelo en césped (Troughton, 1957), de 7 a 55 cm cm^{-3} en gramíneas (Dittmer, 1938) y superior a 2 cm cm^{-3} en café (Nutman, 1934) y caña de azúcar (Evans, 1938).

Un factor que puede ser estudiado fácilmente mediante el uso de los minirrizotrones es el grado de suberización que han adquirido las raíces, y por tanto, su ritmo de desarrollo y envejecimiento; igualmente, es factible determinar la variación que experimentan en su diámetro, así como la superficie radicular en contacto con el suelo.

Aunque el minirrizotrón provee información sobre la distribución de raíces comparable en algunos casos a los métodos clásicos de monolito y trinchera (Böhm *et al.*, 1977), durante su reciente desarrollo se ha detectado la obtención de medidas bastante erráticas (Majdy *et al.*, 1992); esto ha planteado diversos problemas analíticos en el tratamiento de los datos,

siendo la variabilidad espacial de la DLR especialmente problemática (Hendrick y Pregitzer, 1992), con coeficientes de variación del 53% (Sanders y Brown, 1978), del 90% (Tardieu, 1988a;1988b) e incluso que superan a veces el 100% (Upchurch y Ritchie, 1983; Merrill *et al.*, 1987; Upchurch, 1987). Este fenómeno ha sido atribuido a la heterogeneidad de las propiedades del suelo y a la variabilidad en las observaciones de las raíces (Hamblin, 1985; Hughes y Wilde, 1988; Box *et al.*, 1989; Taylor *et al.*, 1990; Andren *et al.*, 1991). Para el análisis estadístico de los datos de DLR es frecuente recurrir a transformaciones de éstos, como las exponenciales (Glenn *et al.*, 1987a), usando el método propuesto por Taylor (1961), y las logarítmicas (Ball-Coelho *et al.*, 1992).

Debido a lo anteriormente expuesto, algunos autores advierten del peligro de usar estos aparatos para el estudio de la distribución radical, a menos que se instalen en número suficientemente alto, sobre todo en caso de DLR bajas ($<0.05 \text{ cm cm}^{-3}$), con las que la posibilidad de observar raíces es pequeña (Atkinson, 1980; Upchurch y Ritchie, 1983; McMichael y Taylor, 1987; Upchurch, 1987). De hecho, la mayoría de los estudios con minirrizotrones se realizan con cultivos herbáceos, que normalmente presentan valores altos de DLR, y son muy pocos los que utilizan esta técnica en especies frutales, entre ellos: Glenn *et al.* (1987a; 1987b), en manzano y melocotonero, Fernández *et al.* (1992), en olivo, y Abrisqueta *et al.* (2008), en melocotonero.

A pesar de sus limitaciones, el minirrizotrón es hoy día el mejor de los sistemas disponibles de caracterización in situ, no destructiva, del desarrollo del sistema radical en multitud de condiciones experimentales, culturales y ambientales de forma eficiente y económica (Brown y Upchurch, 1987).

Capítulo 4
Condiciones experimentales

4.1 Características de la parcela experimental

La parcela en la que se ha realizado el trabajo forma parte de la finca experimental “Tres Caminos” del CEBAS-CSIC, situada en el Campo de la Matanza, del término municipal de Santomera, Murcia: 38° 06’ 31.2” N; 1° 02’ 13.7” W, a una altura media sobre el nivel del mar de 152 m (Figura 4. 1).

La finca tiene una pendiente media del 5.49% y está convenientemente aterrizada. Posee una superficie total de 32 ha y dispone de dos embalses reguladores situados uno en la cota más alta, 167 m, y otro a 152 m (Figura 4. 1).

En la parte baja de la finca se ha seleccionado una parcela de 0.8 ha de melocotoneros, distribuidos en cuatro subparcelas, separadas por taludes de 1 m y por el camino de acceso a la finca (Figura 4. 1).

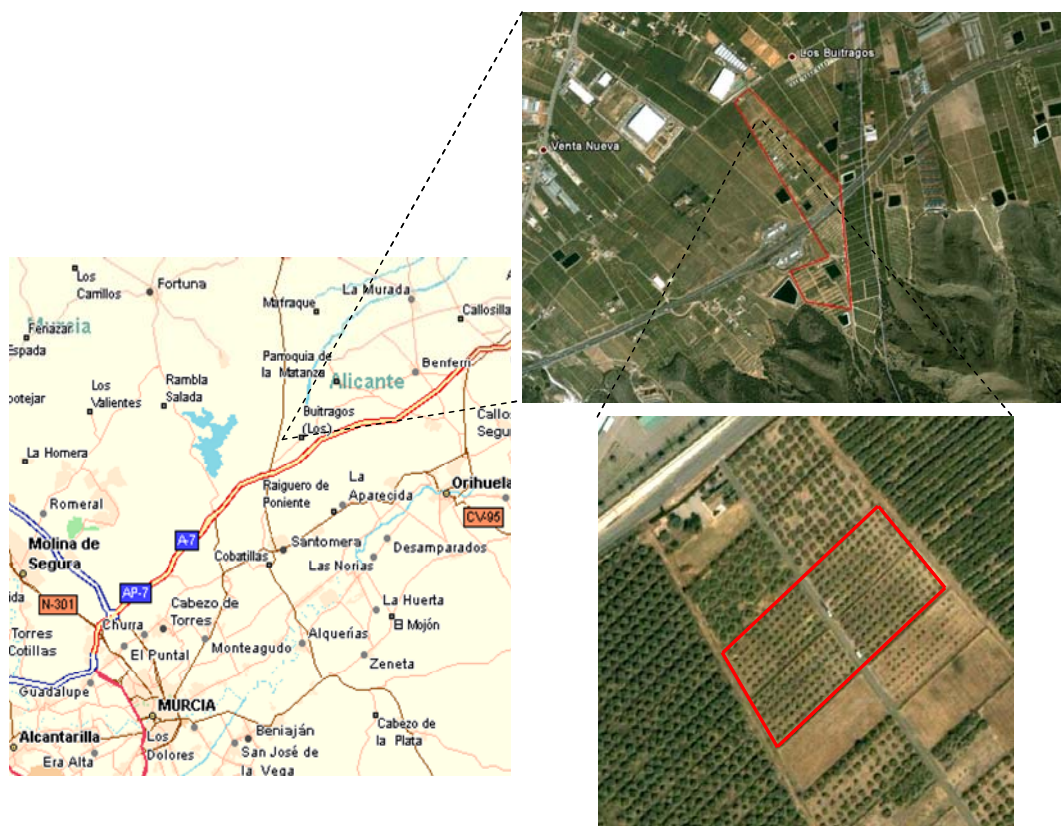


Figura 4. 1. Plano de situación y fotografías aéreas de la finca experimental del CEBAS-CSIC en Santomera (Murcia) y de la parcela experimental.

4. Condiciones experimentales

El suelo de la parcela experimental es del tipo Lithic Xeric Haploxe-roll (Soil Survey Staff, 1998), pedregoso, poco profundo y posee una textura franco arcillosa (Tabla 4. 1, Figura 4. 2)

La densidad aparente del suelo (d_a) corresponde a un valor medio del perfil de 1560 kg m^{-3} , si bien a partir de 50 cm de profundidad la d_a es ligeramente mayor ($\approx 1670 \text{ kg m}^{-3}$) (Tabla 4. 1).

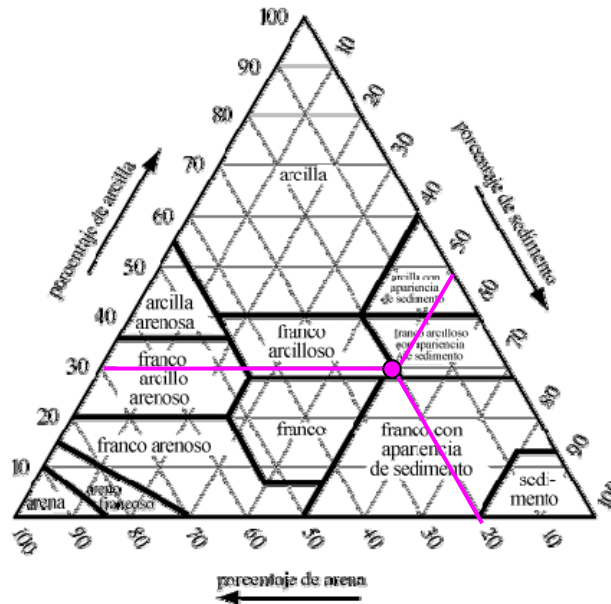


Figura 4. 2. Triángulo de texturas y valores medios del suelo de la parcela (—●—).









El contenido volumétrico de agua a capacidad de campo (θ_{VCC}) y en el punto de marchitez permanente (θ_{VPM}), que equivalen al valor de equilibrio a -0.033 y -1.5 MPa , respectivamente, fueron determinados en muestras inalteradas de suelo usando el método de la placa de presión propuesto por Richards (Richards, 1965), obteniéndose unos valores de $\theta_{VCC} = 0.29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y $\theta_{VPM} = 0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, lo que resultó en un contenido de agua útil de 140 mm m^{-1} (Tabla 4. 2).

La conductividad eléctrica del extracto 1:5 fue de 0.35 dS m^{-1} (Tabla 4. 2), por lo que no se espera ningún problema de desarrollo y producción del cultivo debido a la presencia de sales.

El análisis químico indica bajos niveles de sales solubles y materia orgánica, alto contenido de potasio asimilable, un nivel medio de sodio

soluble, elevado contenido de carbonato cálcico total y activo y capacidad de intercambio catiónico baja, lo que indica un alto poder clorosante.

Tabla 4. 1. Análisis textural del suelo (0-100 cm) de la parcela experimental.

	Profundidad (cm)	Arena fina (%)	Arena gruesa (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Densidad aparente (kg m ⁻³)
	0-10	5.8	19.4	43.9	30.9	1412
	10-20	3.9	25.4	44.4	26.3	1362
	20-30	3.2	22.7	44.5	29.6	1442
	30-40	2.4	19.7	46.9	31.0	1448
	40-50	2	18.3	52.1	27.6	1592
	50-60	2.4	17.9	51.5	28.2	1652
	60-70	2.1	16.3	53.9	27.7	1652
	70-80	1.9	14.1	52.9	31.1	1712
	80-90	1.7	12.1	56.9	29.3	1662
	90-100	1.4	12.7	54.5	31.4	1582
	Media	2.68	17.86	50.15	29.31	1560

El agua de riego, procedente del trasvase Tajo-Segura, es conducida y almacenada en un embalse ubicado a una cota de 30 m por encima de la parcela experimental, lo que permite disponer de la presión necesaria para el funcionamiento de la instalación de riego. Según el análisis (Tabla 4. 3) el agua no representa ningún riesgo sobre la estabilidad de la estructura del suelo y no generará problemas de infiltración por lo que los requerimientos de lavado son mínimos (Rhoades, 1977; Oster y Schroer, 1979). El agua presentó un valor negativo del Índice de Saturación de

4. Condiciones experimentales

Langelier (-0.2895), lo que supone un riesgo bajo de obturación por precipitaciones de CO_3Ca .

Tabla 4. 2. Análisis físico-químico del suelo de la parcela experimental de melocotonero. Datos medios del perfil 0-100 cm.

Propiedades químicas		
CE 1:5	0.35	dS m ⁻¹
pH	7.3	-
CCC	126.00	mmol kg ⁻¹
Materia orgánica oxidable	0.34	%
Carbonato cálcico total	56.00	%
Carbonato cálcico activo	13.80	%
Fósforo asimilable	0.47	mmol kg ⁻¹
Potasio asimilable	9.20	mmol kg ⁻¹
Sodio soluble 1:5	8.80	mmol kg ⁻¹
Cloruros 1:5	5.00	mmol kg ⁻¹
Sulfato	3.49	mmol kg ⁻¹
Propiedades físicas		
Densidad aparente	1560	kg m ⁻³
Capacidad de campo	0.29	%
Punto de marchitez	0.15	%
Saturación	0.44	%
Agua útil	0.14	%

Tabla 4. 3. Análisis del agua de riego.

pH	7.54	-
CE	1.74	dS m ⁻¹
Dureza	55.00	°Fr
Sólidos Disueltos	1.14	g L ⁻¹
Cl ⁻	5.50	mmol L ⁻¹
SO ₄ ⁻²	4.69	mmol L ⁻¹
CO ₃ H ⁻	3.00	mmol L ⁻¹
Na ⁺	7.17	mmol L ⁻¹
K ⁺	0.12	mmol L ⁻¹
Ca ⁺²	0.80	mmol L ⁻¹
Mg ⁺²	4.70	mmol L ⁻¹
Relación de adsorción de sodio (RAS)	3.05	-
Relación de adsorción de sodio ajustado (RAS _{adj})	3.08	-

4.2 Clima

Los datos climáticos se han obtenido de una estación agrometeorológica automática situada en la finca experimental del CEBAS-CSIC, que proporciona datos cada 15 minutos de temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento y lluvia.

La información, en tiempo real, es accesible a través de la página Web del CEBAS-CSIC.

La zona se caracteriza por un clima típicamente mediterráneo con rasgos subdesérticos y con una marcada aridez e irregularidad pluviométrica, lo que genera muchos meses secos a lo largo del año. Según Walter (1970), un mes seco es aquel que presenta un valor de la precipitación, expresado en mm, menor que el doble de su temperatura media expresada en °C. En el diagrama ombrotérmico de los años de estudio destaca un periodo de 6 meses secos (Figura 4. 3).

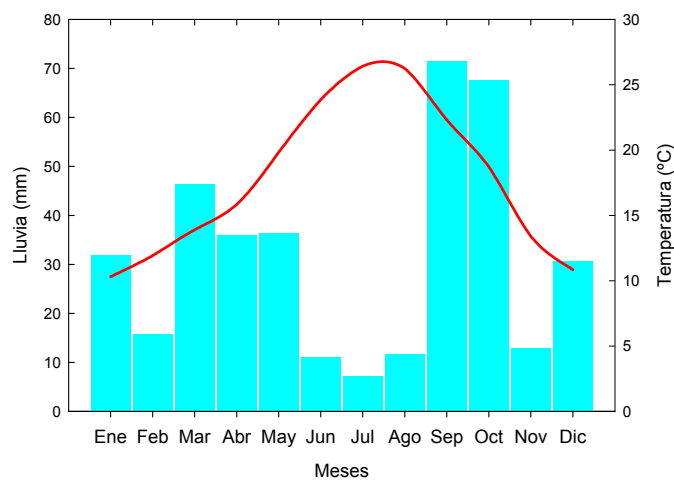


Figura 4. 3. Diagrama ombrotérmico: la temperatura media (línea roja) y precipitaciones mensuales (barras verticales) en la finca experimental del CEBAS, Murcia. Datos medios 2007-2009.

En la Tabla 4. 4 y la Figura 4. 4 se muestran los principales datos meteorológicos durante el periodo experimental. La temperatura media anual fue de 17.8 °C en el año 2007 y 18.1 °C en los años 2008 y 2009 y la humedad relativa media en torno a 61-64%. La precipitación fue de 408.6 mm en 2007; 324 mm en 2008 y 404.4 mm en 2009. Las lluvias suelen presentarse en primavera y a finales de verano, siendo estas últimas a menudo de carácter torrencial, lo que disminuye su eficiencia y acentúa el déficit hídrico (Sánchez-Toribio, 1992).

La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), calculada según la ecuación del Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), fue de 1362.2

4. Condiciones experimentales

mm en 2007, 1291.5 mm en el 2008 y 1367.4 mm en 2009, con un promedio de 1340 mm año⁻¹ durante el periodo experimental (Tabla 4. 4).

Tabla 4. 4. Valores absolutos y medios de temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa media (HR), lluvia, velocidad media del viento (a 2 m), radiación global media (Rg) y evapotranspiración de referencia media mensual (ET₀⁽¹⁾) en la finca experimental del CEBAS durante el periodo experimental.

	Temperatura (°C)					HR (%)	Lluvia		Viento	Rg	ET ₀ ⁽¹⁾
	Máx abs	Mín abs	Máx ned	Mín med	Media	Media	mm mes ⁻¹	Días	m s ⁻¹	W m ⁻²	mm mes ⁻¹
2007											
Ene	24.3	2.3	17.0	6.5	11.0	63.4	61.4	6	3.70	96.94	49.8
Feb	26.3	3.9	19.1	9.1	13.6	61.0	9.0	8	3.90	132.75	68.6
Mar	29.6	3.2	20.1	8.3	13.7	53.8	39.1	5	5.29	190.24	116.3
Abr	26.2	8.2	20.4	10.6	15.1	67.8	79.9	15	3.77	188.23	100.6
May	33.7	9.5	27.7	14.8	21.2	48.8	8.5	3	5.07	290.32	185.1
Jun	37.8	14.0	30.4	17.6	24.1	54.1	0.7	2	4.54	299.82	193.6
Jul	37.1	17.3	32.7	19.4	26.0	57.1	2.7	2	4.55	299.93	196.4
Ago	39.6	15.7	32.6	20.3	26.0	61.5	32.0	7	4.29	247.57	162.8
Sep	31.0	12.3	27.9	17.3	22.1	68.9	36.2	5	3.46	194.62	117.8
Oct	29.2	7.1	22.9	13.8	17.7	70.7	128.2	12	2.68	126.06	76.0
Nov	24.3	2.2	19.1	7.8	12.4	63.4	2.4	2	2.29	111.08	49.1
Dic	24.3	1.7	17.0	7.2	11.1	65.5	8.5	6	3.42	90.46	46.2
Anual	30.3	8.1	23.9	12.7	17.8	61.4	408.6	73	3.91	189.0	1362.2
2008											
Ene	24.3	2.8	18.1	6.6	11.1	66.1	6.2	10	0.7	102.0	48.6
Feb	23.2	3.3	17.1	7.5	11.7	77.6	29.4	5	4.8	116.6	50.0
Mar	27.7	1.5	21.8	9.3	15.0	51.1	0.2	1	8.2	217.2	124.7
Abr	29.1	7.2	23.8	10.8	17.1	49.0	3.8	4	7.8	256.5	143.9
May	28.9	10.5	23.9	13.8	18.3	64.4	94.0	14	7.3	232.1	129.5
Jun	36.7	13.2	28.7	17.1	22.6	63.4	29.8	5	7.3	309.3	174.5
Jul	38.2	18.2	32.3	20.3	26.0	63.4	18.6	4	6.9	297.5	189.4
Ago	39.2	16.8	32.7	20.8	26.4	63.0	0.2	1	6.5	271.9	176.6
Sep	34.9	13.5	28.9	18.2	22.9	65.8	54.8	7	8.8	191.6	116.8
Oct	29.1	7.0	23.4	14.2	18.4	73.2	54.2	9	7.2	135.9	77.8
Nov	22.3	1.6	17.6	7.9	11.9	65.2	34.2	10	4.7	121.1	54.4
Dic	21.0	3.4	14.7	6.6	10.0	66.7	4.8	5	5.7	91.7	44.5
Anual	39.2	1.5	24.0	13.2	18.1	64.0	324.0	65	6.7	202.6	1291.5
2009											
Ene	22.9	0.5	14.9	6.6	10.2	65.8	34.0	6	7.4	101.8	56.1
Feb	21.5	3.1	16.2	5.9	10.5	67.6	9.0	4	5.7	135.2	58.3
Mar	27.4	4.4	19.4	7.8	13.0	65.6	102.2	8	7.6	186.6	96.8
Abr	28.5	7.3	21.7	10.1	15.3	59.0	23.8	6	7.1	243.5	121.5
May	30.7	9.5	26.6	13.8	19.9	61.4	6.8	6	7.3	283.3	161.9
Jun	38.2	14.6	31.9	18.6	24.9	54.1	2.4	1	7.4	302.0	191.7
Jul	42.4	18.3	34.0	21.2	27.2	61.5	0.0	0	7.1	295.3	196.7
Ago	35.8	18.8	32.8	20.6	26.4	59.9	2.8	1	5.6	261.5	171.4
Sep	37.3	13.9	27.7	17.6	22.0	69.5	123.0	14	4.8	176.2	104.7
Oct	31.7	12.3	26.7	15.6	20.1	72.8	20.0	6	4.1	163.7	91.2
Nov	28.0	7.0	22.2	11.3	15.9	59.9	2.0	1	6.2	119.6	73.3
Dic	24.8	-0.9	16.7	7.4	11.5	67.5	78.4	10	5.7	81.6	43.8
Anual	30.8	9.1	24.2	13.0	18.1	63.7	404.4	63	6.3	195.9	1367.4

(1) Calculada según Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998).

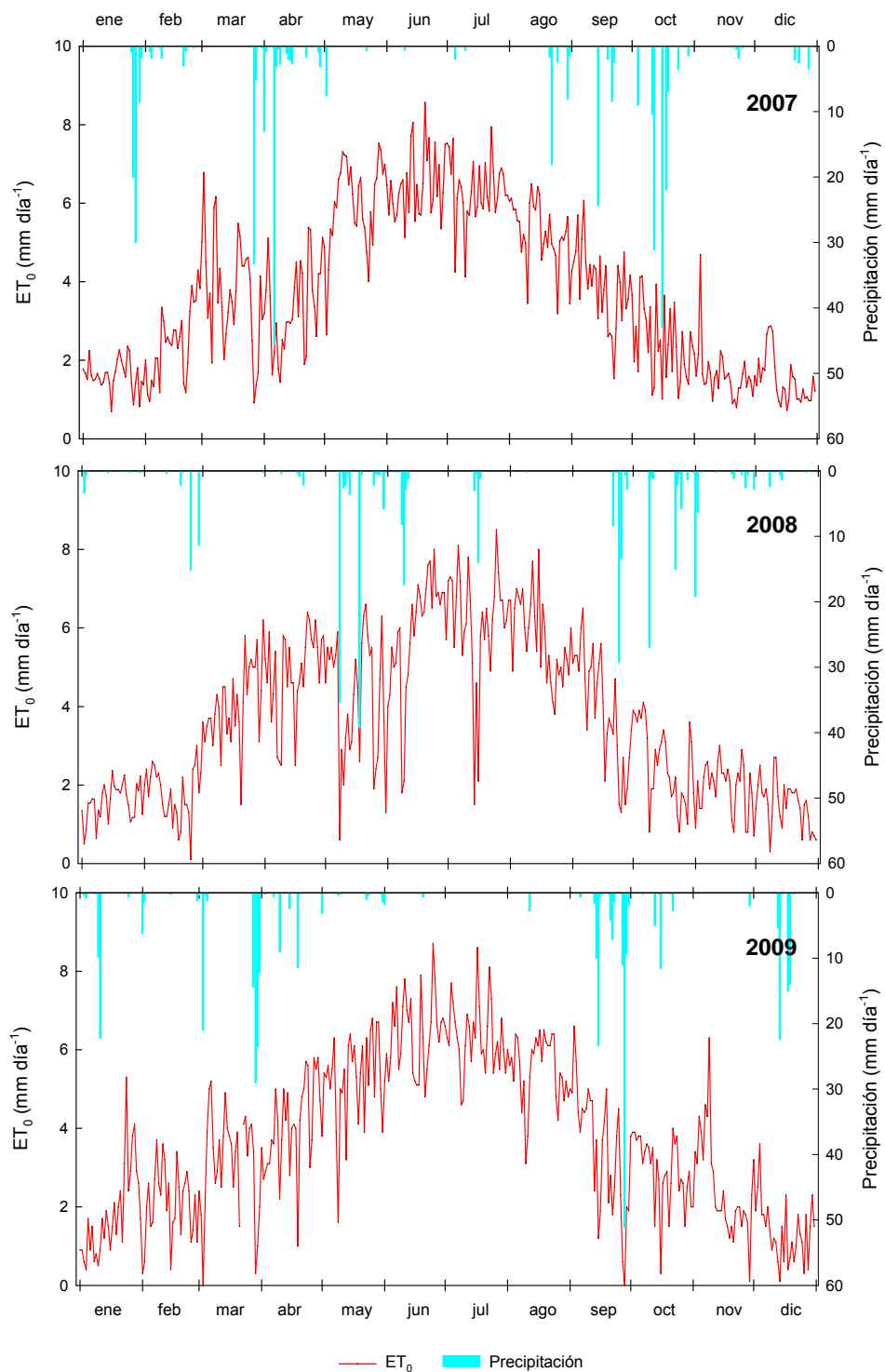


Figura 4. 4. Datos diarios de ET_0 (FAO, Penmman-Monteith) y lluvia durante el periodo experimental en la finca experimental del CEBAS.

4.3 Material vegetal y labores culturales

El material vegetal utilizado fue melocotoneros (*Prunus persica* (L.) Batsch) cv. Flordastar (variedad extratemprana), injertados sobre patrón híbrido de melocotonero x almendro GF-677, de 8 años de edad (plantación Febrero 2002), a un marco de plantación de 5x5 m (Fotografía 4. 1).



Fotografía 4. 1. Vista general de la parcela de melocotoneros Flordastar (mayo, 2008).

En la Figura 4. 5 se representan estados fenológicos del cultivo durante el periodo experimental. Las Fases I y II de crecimiento del fruto se producen de febrero a marzo, la Fase III (segunda de rápido crecimiento del fruto) durante el mes de abril y la cosecha se realiza entre finales de abril y principios de mayo. Se considera periodo de reposo al comprendido desde noviembre, caída de hojas, hasta principios de febrero, máxima floración.

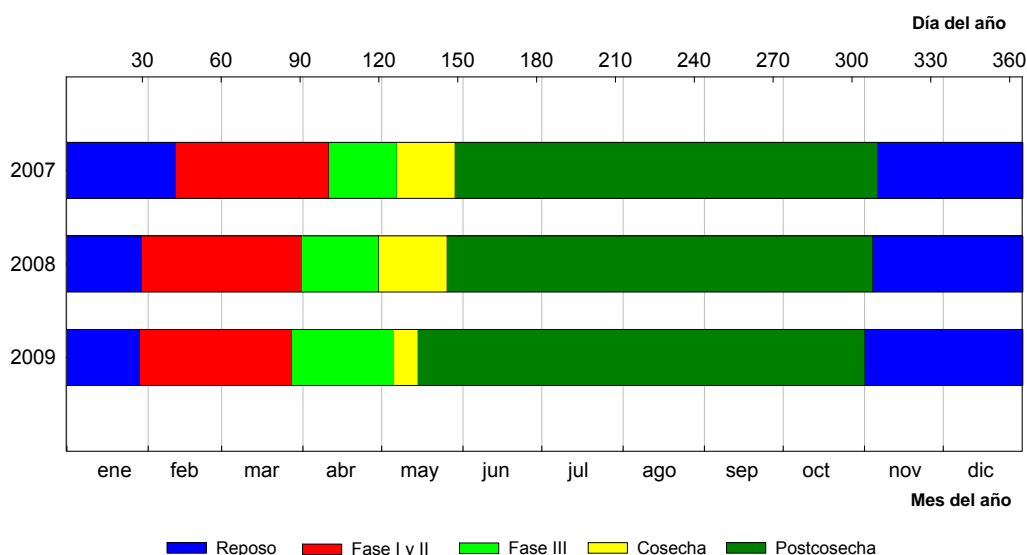


Figura 4. 5. Diagrama de los periodos fenológicos del melocotonero Flordastar durante el periodo experimental.

Las labores de cultivo fueron las habituales de los frutales de hueso en la zona e incluyeron el control de enfermedades, plagas y malas hierbas, el aclareo de frutos, y la poda, así como el manejo del riego (agua y fertilizantes)

El tratamiento fitosanitario de invierno se aplicó entre el estado B y C, para controlar hongos, larvas y huevos de cochinillas e insectos (metidation 40%, aceite mineral Volk 1% y oxiclورو de cobre 30%). En postcosecha se aplicó otro tratamiento (Lambda Cihalotrin 2.5%, Penconazol 10%, Fenbutaestan 55%, Ciproconazol 5% y Metomil 20%) dirigido contra enfermedades criptogamitas (*Sphaeroteca pannosa*, *Monilia*) y plagas (*Anarsia lineatella*, orugas minadoras, pulgones, y ácaros tetraníquidos).

El control de las malas hierbas se realizó mediante dos aplicaciones localizadas de glifosato en abril y en diciembre.

Se realizó un aclareo manual cuando el fruto ha adquirido 1 cm de diámetro (durante la primera quincena de marzo), dejando un fruto por cada 15-20 cm de ramo.

La poda se realizó anualmente en el periodo de reposo (diciembre), manteniendo una formación en vaso.

4.4 Sistema y programación del riego

El diseño agronómico del sistema de riego correspondió a un único lateral por hilera de árboles con 8 goteros autocompensantes por árbol, situados a 0.5, 1, 1.5 y 2 m, a ambos lados del tronco, con un caudal nominal de 2 L h⁻¹.

La programación del riego fue semanal y teniendo en cuenta la lluvia efectiva de la semana anterior. La gestión del riego se realizó por tiempos, empleando para ello un programador de riego tipo NTC 116 instalado en el cabezal de un sistema de riego localizado independiente con 6 sectores. El riego fue nocturno.

Las necesidades del riego se calcularon en base a la demanda climática, usando la ecuación de balance de energía de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) que estima la *Evapotranspiración del cultivo de referencia* (ET₀) (Ecuación 4. 1), la cual multiplicada por los correspondientes *coeficientes de cultivo* (K_C) propuestos por la FAO para melocotonero (Doorenbos y Pruitt, 1977; Fereres y Goldhamer, 1990) origina la *Evapotranspiración del cultivo* (ET_C) (Ecuación 4. 2), que es corregida para las condiciones locales (K_{SS}), según el porcentaje de área sombreada de acuerdo con Fereres *et al.* (1982), obteniéndose la *Evapotranspiración del cultivo en riego por goteo* (ET_{Cg}) (Ecuación 4. 3).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad 4. 1$$

$$ET_C \text{ (mm día}^{-1}\text{)} = ET_0 \text{ (mm día}^{-1}\text{)} \times K_C \quad 4. 2$$

$$ET_{Cg} \text{ (mm día}^{-1}\text{)} = ET_0 \text{ (mm día}^{-1}\text{)} \times K_C \times K_{SS} \quad 4. 3$$

En la Tabla 4. 5 se muestran los parámetros implicados en de cálculo de la evapotranspiración del cultivo.

Tabla 4. 5. Parámetros para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_C).

Parámetro	Definición	Unidades
ET_0	Evapotranspiración del cultivo de referencia	mm d ⁻¹
ET_C	Evapotranspiración del cultivo	mm d ⁻¹
ET_{Cg}	Evapotranspiración del cultivo en riego por goteo	mm d ⁻¹
K_C	Coefficiente de cultivo	-
K_{SS}	Coefficiente de corrección	-
Rn	Radiación neta	MJ m ⁻² d ⁻¹
G	Flujo de calor al suelo	MJ m ⁻² d ⁻¹
T	Temperatura del aire a 2 m de altura	°C
u_2	Velocidad del viento a 2 m de altura	m s ⁻¹
e_s	Presión de vapor a saturación	kPa
e_a	Presión de vapor actual	kPa
$e_s - e_a$	Déficit de la presión de vapor	kPa
Δ	Pendiente de la curva presión de vapor vs. temperatura	kPa °C ⁻¹
γ	Constante psicométrica	kPa °C ⁻¹

El fertilizante se aplicó al agua de riego (fertirriego) mediante una bomba de pistón (200 L h⁻¹). El programa de fertirriego (Tabla 4.3) incluyó ácido fosfórico (72%), nitrato amónico (34.5%) correctores de hierro.

Tabla 4. 6. Programa de fertilización anual, Kg totales (Kg) y gramos por árbol (g/a), aplicado a árboles adultos de melocotoneros Flordastar.

Mes	Día del Mes	Elemento	Kg	g/a
Enero				
Febrero	1 a 15			
	16 a 28	P ₂ O ₅	9.20	30.15
Marzo	1 a 15	P ₂ O ₅	9.20	30.15
	16 a 31	Fe	0.75	2.50
Abril	1 a 15	Fe	0.75	2.50
	16 a 30	N	3.75	2.50
		P ₂ O ₅	1.25	2.50
		K ₂ O	8.75	2.50
Mayo	1 a 31	N	33.38	109.43
		P ₂ O ₅	2.50	8.20
		K ₂ O	17.50	57.38
Junio	1 a 30	N	0.72	2.50
		P ₂ O ₅	3.60	2.50

4.5 Tratamientos de riego

Los tratamientos de riego aplicados fueron los siguientes:

- Control (T1) regado por encima de la ET_C ($\approx 140\%$), asegurando condiciones no limitantes de agua en el suelo, según programación tradicional FAO (Allen *et al.*, 1998).
- Riego deficitario sostenido (T2), al 50% de la ET_C todo el ciclo.
- Riego parcial de raíces, RPR, (T3), que recibió el 50% de la ET_C durante todo el ciclo vegetativo, regando alternativamente un lado u otro del árbol. Para ello se dispuso de 2 laterales de riego por hilera de árboles, en cada uno se instalaron la mitad de goteros, de manera que el total de goteros y disposición respecto al tronco fuera el mismo que en los tratamientos anteriores (Figura 4. 6). El criterio para el cambio de riego fue cada 15-30 días, asegurando un nivel de déficit hídrico en el suelo (> -40 kPa) según lecturas de tensiómetros instalados a 30 cm de profundidad en la zona húmeda del segundo gotero.

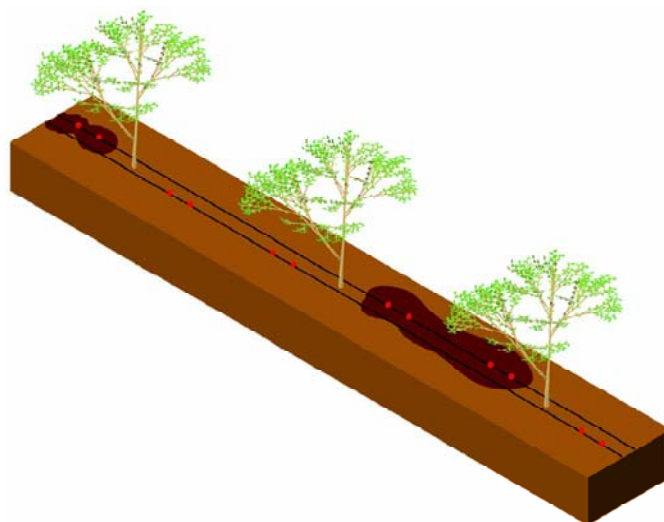



Figura 4. 7. Esquema del tratamiento deficitario RPR (T3).

- Riego deficitario controlado, RDC, (T4) regado al 25% de la ET_C durante todo el ciclo, excepto en la fase III de rápido crecimiento del fruto (periodo crítico) que se regó al 100% de la ET_C .

- Riego automático (Ta), basado en el mantenimiento del contenido de agua en el suelo dentro del rango de agua fácilmente disponible para la planta, en función de las lecturas de sondas de capacitancia, tipo FDR, instaladas junto al segundo gotero del árbol y con sensores situados a 10, 20, 30, 50 y 80 cm de profundidad. Durante el periodo experimental se establecieron diferentes umbrales para el inicio y fin del riego:
 - **2007.** Riego nocturno para completar el 100% de la ET_c (FAO, Penman-Monteith).
 - **2008.** Riego nocturno según lecturas de sondas a las 22:00 h. El riego se iniciaba al 90% de la capacidad de campo (CC) en la zona radical activa (0-50 cm) y terminaba cuando las lecturas del sensor situado a 80 cm aumentaban un 2%.
 - **2009.** Riego en tiempo real con dos períodos:
 - Crecimiento del fruto: inicio del riego al 95% de CC, en el perfil 0-50 cm, y fin del riego al 100% de CC.
 - Postcosecha: inicio al 90 y fin al 95% de CC.

En la Figura 4. 8 se muestran de forma resumida los porcentajes de la ET_c aplicados en cada tratamiento de riego durante el periodo experimental.

4. Condiciones experimentales

													
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T1	100% ET _C												
T2	50% ET _C												
T3	50% ET _C alternante a uno y otro lado del árbol												
T4	25% ET _C			95% ET _C			25% ET _C						
Ta	Riego automático con sondas de capacitancia												
	2007	Inicio a las 22:00h Fin: Restitución 100% ET _C (FAO)											
	2008	Lectura de sondas a las 22:00h											
		Inicio: 90% CC en el perfil 0-50 cm Fin: Δ θ _v 2%, respecto al valor inicial, a 80 cm											
2009	Riego en tiempo real												
		Inicio: 95% CC en el perfil 0-50 cm Fin: 100% CC en el perfil 0-50 cm					Inicio: 90% CC en el perfil 0-50 cm Fin: 95% CC en el perfil 0-50 cm						

■ Reposo
 ■ Fase I y II
 ■ Fase III
 ■ Cosecha
 ■ Postcosecha

Figura 4. 8. Porcentaje de la ET_C aplicado en cada tratamiento de riego y periodo fenológico del cultivo

Los tratamientos fueron distribuidos según un diseño experimental completamente al azar con 4 repeticiones. Cada repetición estaba formada de una hilera de 13 árboles, de los cuales 4 se consideraban como bordes (2 de cada extremo) y los 9 restantes como testigo (Figura 4. 9).

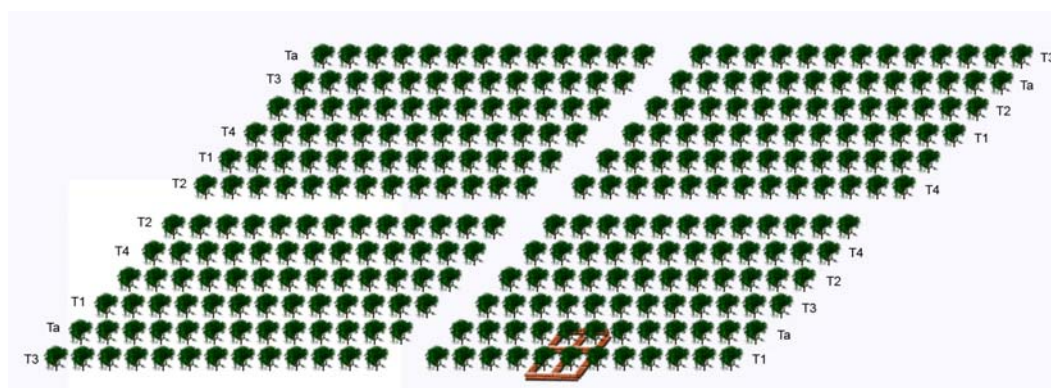


Figura 4. 9. Distribución de los tratamientos de riego en la parcela de melocotoneros Flordastar.

Capítulo 5
Determinación de las necesidades
hídricas mediante balance hídrico

5.1 Introducción

Los procedimientos de cálculo de las necesidades de riego se fundamentan en estimas de la evapotranspiración del cultivo (ET_C), que como se ha comentado en el apartado de antecedentes, se basan en variables agro-meteorológicas, en balance hídrico del suelo o en índices del estado hídrico del suelo o de la planta.

El método de balance hídrico del suelo ha sido utilizado en diversos estudios con el objetivo de cuantificar la evapotranspiración de diversos cultivos como el almendro (Fererres *et al.*, 1981a; 1981b; 1982; Sharples *et al.*, 1985; Franco, 1993; Andreu *et al.*, 1997), olivo (Moreno *et al.*, 1988), albaricoquero (Abrisqueta *et al.*, 2001) o cítricos (Castel *et al.*, 1987; García-Petillo y Castel, 2007).

El método se fundamenta en que el proceso de evapotranspiración se produce a expensas del agua almacenada en la zona radical, la cual proviene del riego o las precipitaciones, descontada la que se pierde por escorrentía y drenaje (Asare *et al.*, 1996; Cohen *et al.*, 1996).

El objetivo de este capítulo fue determinar la evapotranspiración del cultivo de melocotonero (*Prunus persica* (L.) Batsch, cv. Flordastar) utilizando el método de balance hídrico, para lo que se emplearon lisímetros de drenaje, evaluando los cambios en la cantidad de agua almacenada en el suelo con sonda de neutrones. Con estos datos se calcularon los coeficientes de cultivo locales para melocotoneros adultos en riego localizado.

5.2 Material y métodos

Los ensayos se llevaron a cabo durante 2007, 2008 y 2009 en la plantación de melocotoneros de la finca experimental del CEBAS descrita en el capítulo anterior (Apartado 4.1).

Se utilizaron los árboles del tratamiento control (T1) regados con un sistema de riego localizado con un lateral por hilera de árboles y 8 emisores por árbol con un caudal de 2 L h^{-1} . Los requerimientos de riego se es-

timaron sobre la base de los datos de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) calculada por el método de Penman-Monteith FAO-56, el coeficiente de cultivo propuesto por FAO (Allen *et al.*, 1998) y el porcentaje del área sombreada por el árbol (AS) ajustado para cada año (Fererres y Goldhamer, 1990). AS fue del 45, 78 y 80 % para 2007, 2008 y 2009, respectivamente. La programación del riego fue semanal y los árboles se regaron diariamente por la noche por encima de las necesidades hídricas ($\approx 140\%$ de la ET_C), a fin de conseguir condiciones no limitantes de agua en el suelo.

El balance hídrico fue realizado en lisímetros de drenaje. Las características de los mismos, así como la metodología empleada para la determinación de los parámetros de la ecuación de balance se describen a continuación.

5.2.1 Lisímetros de drenaje

En 2002, y aprovechando la topografía de la parcela experimental, se construyeron cuatro lisímetros de drenaje de una superficie de 25 m² (5 m de lado) y 1.5 m de profundidad, plantando en el centro de cada uno un árbol. Las paredes estaban constituidas por bloques de cemento recubiertos de una lámina bituminosa de oxiasfalto. En el fondo de cada uno, con una pendiente de un 3%, se insertó un tubo de PVC para la evacuación del agua de drenaje y se cubrió con una capa de 0.15 m de canto rodado sobre la que se colocó el mismo suelo que se había extraído, asegurando así una densidad aparente similar a la de la parcela. Los bloques de cemento sobresalen 0.15 m de la superficie para aislar el sistema y evitar la escorrentía.

La Fotografía 5. 1 muestra una imagen de los lisímetros (izquierda) y un detalle del sistema de evacuación de las aguas de drenaje (derecha).



Fotografía 5. 1. Vista general de los lisímetros (Izda.) y sistema de drenaje (Dcha.).

5.2.2 Determinación de los parámetros de balance hídrico

El balance hídrico se ha llevado a cabo despejando la evapotranspiración del cultivo (ET_C) en la ecuación de conservación de la masa descrita en el capítulo de antecedentes (Ecuación 3. 1), lo que resulta:

$$ET_C = \Delta S + P + I - D - R \quad 5. 1$$

donde: ET_C es la evapotranspiración del cultivo, ΔS es la variación del contenido de agua en el suelo entre dos fechas, P es la lluvia efectiva, I es el riego, D es el drenaje y R es la escorrentía.

Variación del contenido de agua en el suelo (ΔS)

El contenido volumétrico de agua del suelo se midió con una sonda de neutrones TROXLER, modelo 4300 (Fotografía 5. 2, Figura 5. 1), utilizando tubos de acceso de hierro galvanizado de 38 mm de diámetro interno y una longitud de 1.4 m, instalados verticalmente en el suelo de los lisímetros.

La sonda de neutrones está provista de una fuente radiactiva constituida por una mezcla de $^{241}\text{Am-Be}$, de 10mCi de actividad, doblemente encapsulada, y de un detector de neutrones termalizados de F_3B . La fuente radiactiva emite neutrones rápidos que son termalizados (frenados) por los átomos de hidrógeno del agua del suelo y detectados por el detector

5. Determinación de las necesidades hídricas del cultivo mediante balance hídrico

de F_3B , originando así una lectura que está en función del contenido de agua en el suelo.

El tiempo de integración para alcanzar el equilibrio (tiempo de lectura) fue de 30 segundos.



Fotografía 5. 2. Sonda de neutrones utilizada para la medida de la humedad del suelo.

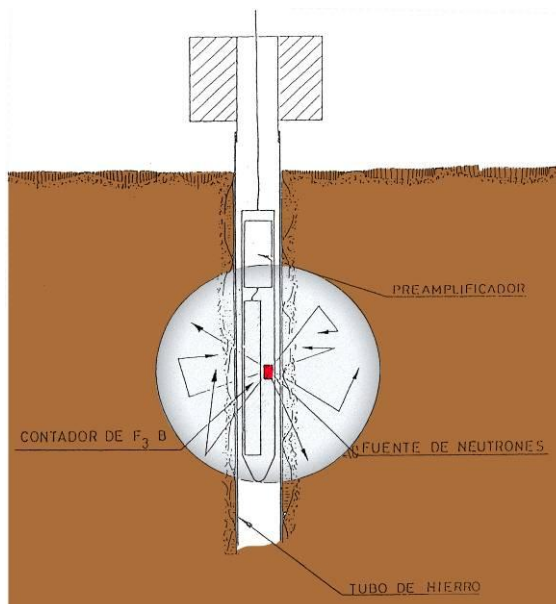


Figura 5. 1. Esquema de funcionamiento de la sonda de neutrones.

Dado que el contenido de agua del suelo medido con sonda de neutrones depende de las propiedades físicas del suelo, es necesaria una calibración del equipo. Para la obtención de la ecuación de calibrado se instaló un tubo de acceso de sonda de neutrones adicional en un punto representativo de la parcela. A partir de él, se relacionó el cociente de cuentas (N/SC) de las diferentes profundidades con el contenido volumétrico de agua (θ_v), determinado a partir de muestras inalteradas de suelo. La regresión de θ_v respecto a N/SC se ajustó al siguiente modelo lineal (Ecuación 5. 2):

$$\theta_v = 0.7597 \cdot \frac{N}{SC} - 0.0871 \quad (R^2 = 0.8192 \quad P = 0.0006) \quad 5.2$$

donde: N es la lectura de la sonda de neutrones en cada profundidad y SC la lectura estándar (aquella que se realiza cuando la fuente radiactiva se encuentra dentro de su blindaje).

Dados los errores de medida que produce la sonda de neutrones en posiciones cercanas a la superficie del suelo, la humedad en los primeros 0.10 m se determinó con la técnica de Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR), usando un equipo TEKTRONIX, modelo 1502B (Fotografía 5. 3). Para ello se instalaron, a 10 cm de cada tubo, dos varillas de acero inoxidable de 0.7 cm de diámetro y 15 cm de longitud, separadas 4 cm.

El método TDR, desarrollado por Topp *et al.* (1980, 1982a, 1982b) y Topp y Davis (1985), se basa en la determinación de la constante dieléctrica del suelo (K_a) la cual está relacionada con el contenido de agua del mismo.

El equipo consta de una unidad de emisión y detección de ondas electromagnéticas, que aplica una diferencia de potencial corta y rápida a través de un cable coaxial de 50 ohmios conectado a dos electrodos (varillas de acero inoxidable no imantable) mediante unas pinzas de cocodrilo. Cuando la señal alcanza el final de las varillas, se refleja y vuelve hacia la unidad central, donde es identificada por un cambio en la diferencia de potencial mediante un osciloscopio. El análisis manual directo de la traza que aparece en la pantalla del reflectómetro, permite obtener el valor de la constante dieléctrica (K_a) y, a partir de ella, el de θ_v ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) mediante la ecuación empírica (Ecuación 5. 3):

$$\theta_v = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \cdot K_a - 5.5 \cdot 10^{-4} \cdot K_a^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \cdot K_a^3 \quad 5. 3$$

La relación entre K_a y θ_v es relativamente independiente de la textura, la densidad aparente, la temperatura, la conductividad eléctrica de la solución del suelo (si se exceptúan los suelos de alta salinidad) y de la trayectoria de humedecimiento o desecado del suelo, siendo válida para un amplio rango de suelos (Topp *et al.* 1980; Topp y Davis, 1985).

5. Determinación de las necesidades hídricas del cultivo mediante balance hídrico

En cada tubo se realizaron medidas con sonda de neutrones desde 0.2 hasta 1.2 m, a intervalos de 0.1 m. La humedad en superficie (0.15 m) se midió con el equipo TDR.

Las lecturas se convirtieron en humedad volumétrica (θ_v) empleando las ecuaciones de calibración 5. 2 para la sonda de neutrones, y 5. 3 para el TDR. El producto de la humedad volumétrica por el espesor de cada capa, expresada en milímetros (Z), origina los contenidos de agua en el suelo en cada capa (S) y la suma de éstos el contenido de agua acumulado en el perfil (Ecuación 5. 4).

$$S = \sum_{i=1}^{n=12} \theta_v \cdot Z \quad 5. 4$$

Donde: $Z = 115$ mm para la primera capa y 100 mm para el resto.

La diferencia entre dos fechas consecutivas de medida constituye la variación del contenido de agua en el suelo (ΔS).



Fotografía 5. 3. Equipo TDR (Izda.) y detalle de las pinzas de cocodrilo (Dcha.).

En cada lisímetro se instalaron cinco tubos de acceso de sonda de neutrones, perpendicularmente a la línea portagoteros y a 0, 0.5, 1, 1.5 y 2 m del segundo gotero (situado a 1 m del tronco) (Fotografía 5. 4), identificados con las posiciones 1, 2, 3, 4 y 5. También se instalaron a 0.1 m de cada tubo de acceso las correspondientes varillas de TDR para la medida de la humedad del suelo en los primeros 0.15 m de profundidad.



Fotografía 5. 4. Disposición de los tubos de acceso de sonda de neutrones en el lisímetro.

Ponderación de los términos de la ecuación de balance hídrico

El aspecto tridimensional del flujo del agua en el suelo hace imprescindible determinar el área o volumen de suelo en el que el agua fluye o se almacena y referirlo a una superficie de referencia, que suele ser el marco de plantación (Sharples *et al.*, 1985; Vachaud *et al.*, 1985; Moreno *et al.*, 1988; Nagy, 1996; Or y Coelho, 1996; Singleton y Maudsley, 1996).

El sistema radical del árbol está confinado en el volumen de suelo de los lisímetros; pero hay que tener en cuenta que el agua aportada, debido a las características del riego por goteo y en función de las dimensiones del bulbo húmedo, no afecta de la misma forma a todo este volumen. Por tanto, se hace necesario ponderar los parámetros de la ecuación de balance: contenido de agua en el suelo y riego, a las distintas zonas del marco de plantación de acuerdo con el grado de influencia del riego.

Para delimitar las zonas a las que se asigna cada tubo de acceso de sonda de neutrones se ha realizado un análisis de la varianza con los valores de contenido de agua acumulado en el perfil durante todo el período experimental, considerando la posición relativa del tubo como único factor de variación. Los resultados indicaron la existencia de dos zonas claramente diferenciadas: una representada por los tubos en posición 1, 2 y 3 y otra por los tubos en posición 4 y 5 (Tabla 5. 1).

Un segundo análisis de la varianza, realizado dentro de cada zona, demostró la ausencia de diferencias entre las posiciones 4 y 5, mientras que en la zona representada por los tubos 1, 2 y 3 existen, a su vez, otras dos zonas bien diferenciadas: una, representada por el tubo en posición 1, y otra representada por los tubos 2 y 3 (Tabla 5. 1).

Tabla 5. 1. Valores medios de contenido de agua en el suelo (mm) en el perfil 0-1.2 m durante el periodo experimental en todos los tubos de acceso de sonda de neutrones situados en las posiciones 1-5 de los lisímetros.

Posición del tubo					Media
1	2	3	4	5	
			204.42a	204.43a	204.43A
286.20b	247.26a	228.58a			254.01B

Los valores seguidos de letras distintas son significativamente diferentes según el test de la MDS_{0.05}, considerando separadamente las posiciones (minúsculas) y las medias (mayúsculas).

Con estos resultados se han definido las siguientes zonas: zona seca, representada por los tubos en posición 4 y 5 (zona C), y zona húmeda, representada por los tubos en posición 1, 2 y 3. Dentro de esta última: zona muy húmeda, representada por los tubos en posición 1 (zona A) y zona de humedad intermedia, representada por los tubos en posición 2 y 3 (zona B) (Figura 5. 2).

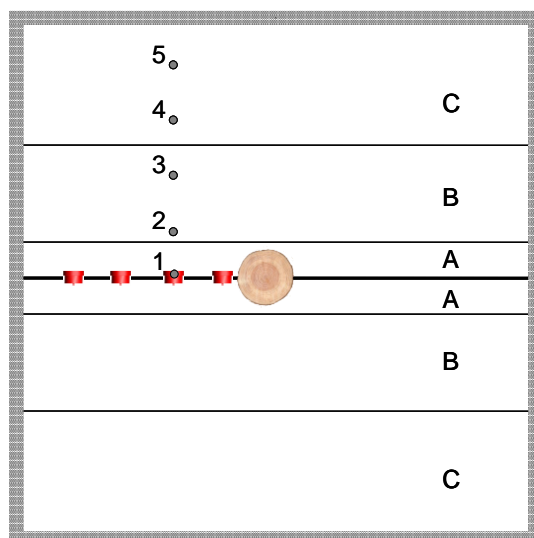


Figura 5. 2. Esquema de la posición de los tubos de acceso de sonda de neutrones (●) respecto al tronco del árbol (#) y los goteros (■). Las letras indican las distintas zonas de influencia del riego.

5. Determinación de las necesidades hídricas del cultivo mediante balance hídrico

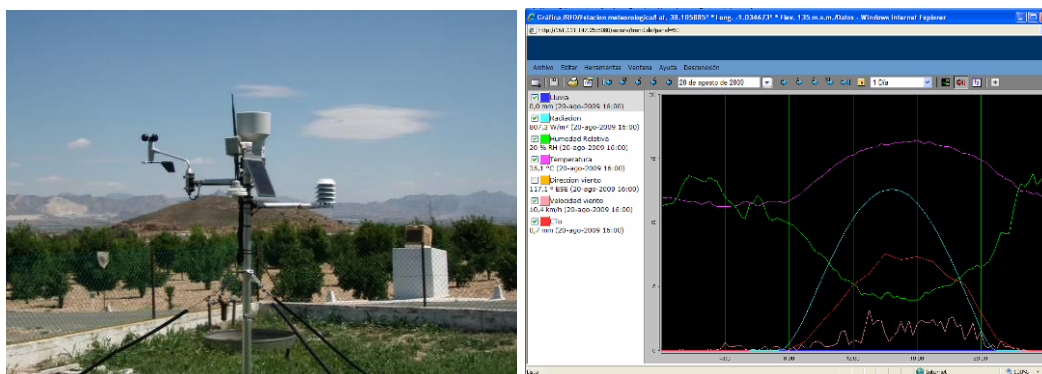
De esta forma se han asignado las siguientes superficies del marco de plantación: 2.5 m² para la zona A, 10 m² para la zona B y 12.5 m² para la zona C.

Las variaciones del contenido total de agua en el suelo en cada uno de los tubos (ΔS_1 , ΔS_2 , ΔS_3 , ΔS_4 y ΔS_5) fueron ponderadas, en función de las superficies que representan, y referidas a una variación de contenido de agua característica (ΔS^*) de todo el marco de plantación. Dicha variación ponderada viene dada por la siguiente expresión (Ecuación 5. 5):

$$\Delta S^* = \frac{12.5}{25} \left[\frac{2.5}{12.5} \Delta S_1 + \frac{10}{12.5} \frac{\Delta S_2 + \Delta S_3}{2} \right] + \frac{12.5}{25} \left[\frac{\Delta S_4 + \Delta S_5}{2} \right] \quad 5.5$$

Lluvia

Los datos de precipitación fueron registrados por la estación meteorológica automática descrita en el apartado 4.2 (Fotografía 5. 5). Toda la lluvia se consideró efectiva.



Fotografía 5. 5. Estación meteorológica automática, situada en la finca experimental del CEBAS-CSIC (Izda.) y detalle del software que muestra los datos (Dcha.).

Riego

La medida del volumen de agua de riego aportado se efectuó mediante contadores volumétricos de pulsos (Fotografía 5. 6) instalados en el cabezal de riego y conectados a un sistema de adquisición de datos con comunicación GPRS. El riego fue también referido al marco de plantación.



Fotografía 5. 6. Contadores volumétricos de pulsos.

Drenaje

El drenaje fue medido directamente a la salida de los tubos de evacuación de las aguas de drenaje de los lisímetros (Fotografía 5. 7 izquierda). El agua cae libremente sobre caudalímetros (Fotografía 5. 7 derecha) que disponen de una salida digital, con una resolución de 0.2 mm, registran datos cada 15 minutos y están conectados al sistema de adquisición de datos con comunicación GPRS.



Fotografía 5. 7. Tuberías de salida del agua de drenaje de los lisímetros (Izda.) y detalle del goteo de agua sobre el caudalímetro (Dcha.).

Escorrentía

Debido a la adecuada nivelación de la parcela y el aislamiento de los lisímetros (Fotografía 5. 1) el término escorrentía (R) se considera nulo.

La ecuación de conservación de la masa, teniendo en cuenta las ponderaciones, queda (Ecuación 5. 6):

$$ET_C = \Delta S^* + P + I^* - D \quad 5.6$$

donde: ET_C es la evapotranspiración del cultivo, ΔS^* es el variación del contenido ponderado de agua en el suelo, P es la lluvia, I^* es el riego ponderado, y D es el drenaje por debajo de 1.2 m de profundidad. Todos los términos se expresan en mm.

Coefficiente de cultivo

Los coeficientes de cultivo (K_C) para melocotonero Flordastar (Ecuación 5. 7) se calcularon como el cociente entre la evapotranspiración del cultivo (ET_C), obtenida mediante balance hídrico, y la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), calculada con la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) con los datos de la estación meteorológica instalada en la finca:

$$K_C = \frac{ET_C}{ET_0} \quad 5.7$$

5.3 Resultados y Discusión.

5.3.1 Estado hídrico del suelo.

Las variaciones del contenido de agua en el suelo (0-1.2 m de profundidad), en los tubos en posición 1 (junto al gotero) y 5 (a 2 m del gotero) durante el periodo experimental se muestran en la Figura 5. 3.

5. Determinación de las necesidades hídricas del cultivo mediante balance hídrico

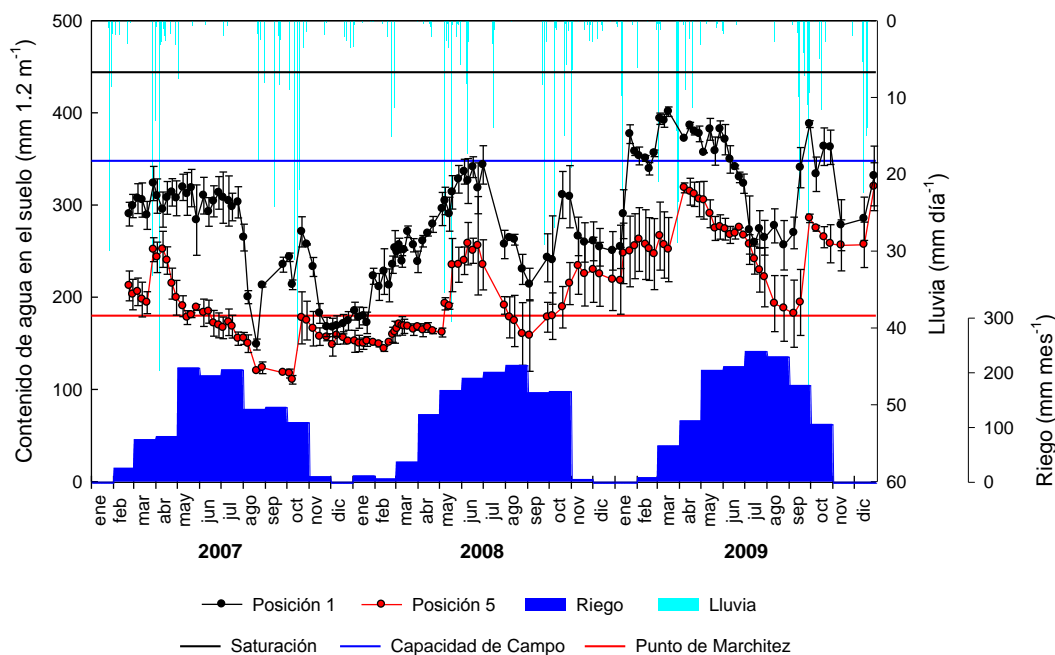


Figura 5. 3. Evolución del contenido de agua en el suelo ($\text{mm } 1.2 \text{ m}^{-1}$) en las posiciones 1 (●) y 5 (●) durante el periodo experimental. Las barras en los puntos son \pm EEM. Las barras verticales corresponden a la lluvia (eje superior) y riego (eje inferior).

Los contenidos de agua en el suelo en ambas posiciones siguen evoluciones paralelas, si bien con valores diferentes (media del periodo experimental de 286 y 206 $\text{mm } 1.2 \text{ m}^{-1}$, para las posiciones 1 y 5, respectivamente). Las disminuciones se corresponden con periodos de reposo en los que no se riega, lo que ocurre generalmente entre principios de noviembre y mediados de febrero (Figura 5. 3).

Las lluvias producen ligeras variaciones, aumentando los valores de contenido de agua en el suelo, tal y como sucede en otoño de 2007 y 2008, o en invierno de 2009, donde los valores se sitúan por encima de la capacidad de campo en todo el perfil (Figura 5. 3).

El agua aportada mediante el riego durante el periodo experimental fue de 1221, 1331 y 1474 mm, y la lluvia de 409, 324 y 404 mm para los años 2007, 2008 y 2009, respectivamente. La lluvia contribuye, en valor medio, un 22% al total de aportes hídricos; sin embargo, aunque este porcentaje sugiera una contribución considerable, la realidad es que tiene lugar fundamentalmente durante la primavera y el otoño, épocas en las que la demanda evapotranspirativa es baja.

En términos generales las lluvias más copiosas tuvieron lugar durante la primavera y el otoño (con un 32 y 40% del volumen total de lluvia anual durante el periodo experimental, respectivamente) frente a veranos e inviernos más secos (11 y 17% respectivamente).

El contenido de agua en el tubo en posición 1, se mantuvo en unos niveles medios de $305 \text{ mm } 1.2 \text{ m}^{-1}$ durante 2007, ligeramente por debajo del valor correspondiente a capacidad de campo (CC) (Figura 5. 3). A primeros de agosto los aportes de agua fueron insuficientes (debido a un fallo en el cabezal de riego) provocando una disminución considerable que afecta a todas las profundidades estudiadas (Figura 5. 3).

En 2008, el contenido de agua en el suelo parte de unos valores bastante bajos, debido a la ausencia de lluvias durante el invierno, aumentando progresivamente cuando se inicia el riego (Figura 5. 3), hasta alcanzar valores próximos a CC en julio, en todo el perfil (Figura 5. 4), para posteriormente disminuir ligeramente en verano.

En 2009 los niveles son más altos desde el principio del año debido a las lluvias del otoño anterior que recargan el perfil y así se mantienen hasta primeros de junio ($\approx 377 \text{ mm } 1.2 \text{ m}^{-1}$), fecha a partir de la cual disminuyen, aunque en menor grado que en años anteriores (Figura 5. 3 y 5. 4).

En relación a los valores del contenido de agua en el suelo en la zona más alejada del punto de goteo (posición 5), hay que destacar que los gradientes hidráulicos que se originan entre la zona húmeda y seca (sobre todo en profundidad) indujeron una conducta paralela a la de la posición 1. La recarga del perfil en el último año de ensayo provoca que los valores sean también más altos en esta posición (Figura 5. 4).

La evolución del contenido de agua en el suelo correspondiente a las posiciones de los tubos 2, 3 y 4 (datos no mostrados) mostró un comportamiento similar con valores intermedios entre la situación más húmeda (posición 1) y más seca (posición 5).

5. Determinación de las necesidades hídricas del cultivo mediante balance hídrico

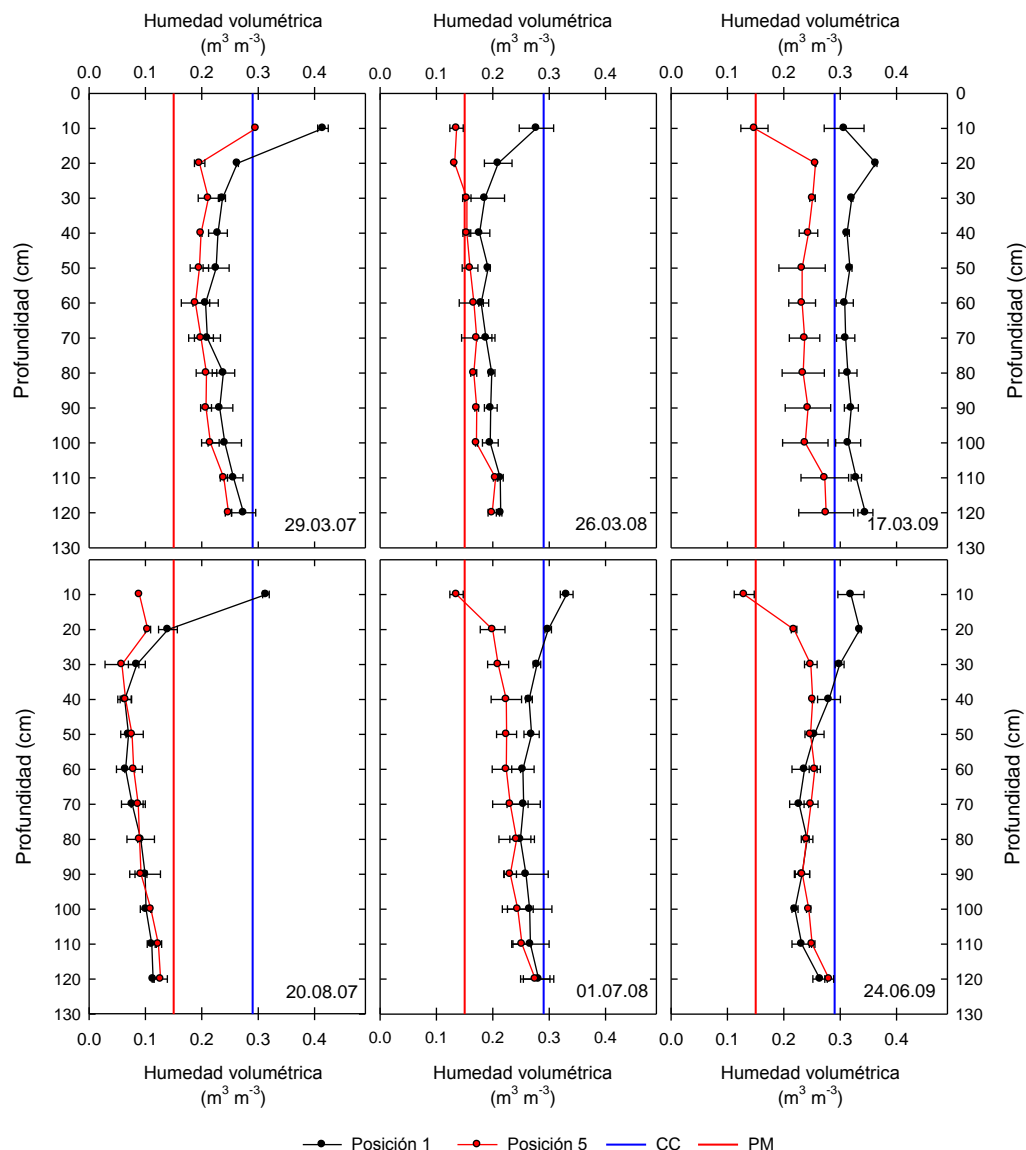


Figura 5. 4. Perfiles de humedad volumétrica en las posiciones 1 (●) y 5 (●) durante marzo (superior) y verano (inferior) del periodo experimental. Las barras en los puntos son \pm EEM.

La evolución de la variación del contenido ponderado de agua en el suelo (ΔS^*) presenta incrementos y disminuciones relativos (Figura 5. 5), determinados por los componentes del balance. Los aumentos registrados a finales de marzo de 2007 vienen dados por el periodo de lluvias, con un volumen total de 109 mm. La disminución registrada en agosto es debida al fallo en el sistema de riego (tal y como indica la barra correspondiente al riego). Después, ΔS^* aumenta rápidamente como consecuencia de los aportes hídricos de finales de este mes (22 y 55 mm de

lluvia y riego, respectivamente), y de nuevo en octubre, debido a las lluvias.

En 2008, ΔS^* se mantiene estable hasta primeros de mayo (Figura 5. 5). Las lluvias de mayo y junio (126.6 mm) aumentaron significativamente el contenido ponderado de agua en el suelo. Una avería en la sonda de neutrones obligó a suspender las medidas durante agosto, no obstante se observa un descenso de ΔS^* en la medida de final de este mes. De nuevo en otoño, las lluvias y el riego provocan un aumento ligero de ΔS^* (Figura 5. 5).

Eventos de lluvias durante marzo (24 mm) y abril (78 mm) de 2009 provocaron aumentos puntuales de ΔS^* . En verano ΔS^* se mantiene en valores ligeramente negativos, que se recuperan con las lluvias de septiembre (123 mm) (Figura 5. 5).

Las variaciones negativas del contenido ponderado de agua en el suelo indican una disminución de las reservas hídricas del suelo, pero no implica que los aportes hídricos hayan sido escasos, siempre que no se rebasen umbrales de humedad del suelo que provoquen un nivel de estrés hídrico en la planta. En este sentido cabe señalar que en los meses de agosto del periodo experimental los descensos en el contenido de agua en el suelo (Figura 5. 3) indujeron cierto grado de estrés hídrico en la planta, como indican los valores de potencial hídrico del tallo, que se comentan en el capítulo siguiente.

Los drenajes se producen cuando las entradas de agua (lluvia, riego o ambas) exceden a los consumos, lo cual sucedió fundamentalmente durante primavera y principios de verano del periodo experimental (Figura 5. 5). En el primer caso, son debidos a los episodios de lluvias, destacando los 113 mm ocurridos entre finales de marzo y mediados de abril de 2007 (Figura 5. 3), coincidiendo con riegos de 2-3 mm diarios, que provocaron unos drenajes de 108 mm, lo que supone un 42% del total durante el 2007 (Figura 5. 5). Los drenajes registrados en verano de todos los años son debidos de forma casi exclusiva a los riegos, que en ese periodo fueron de 7-8 mm diarios.

5. Determinación de las necesidades hídricas del cultivo mediante balance hídrico

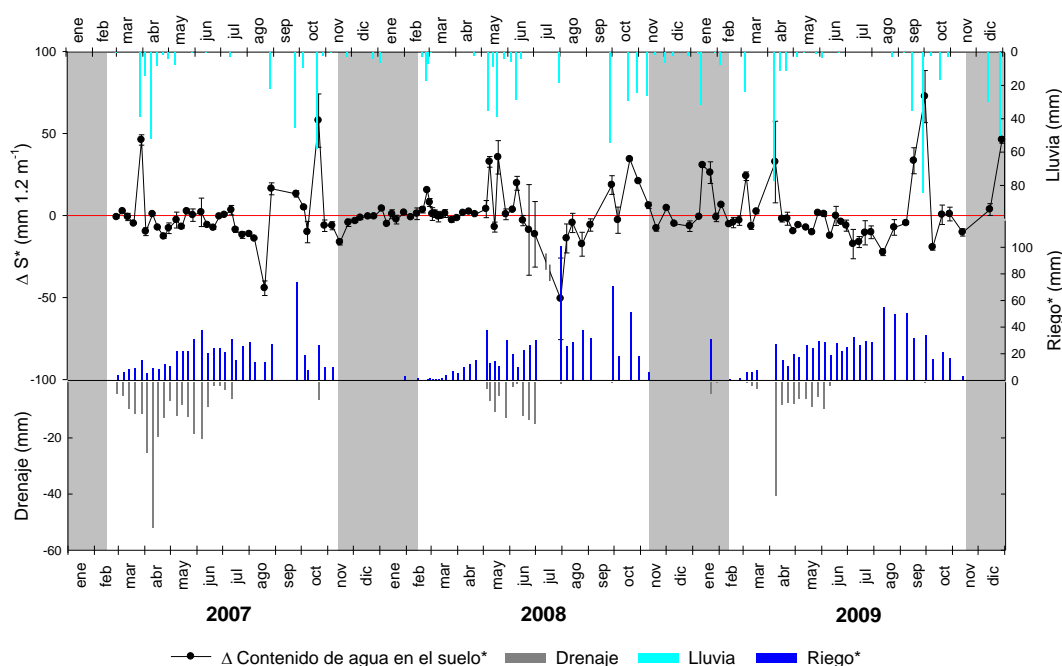


Figura 5. 5. Evolución de la variación del contenido ponderado de agua en el suelo (ΔS^*) a 1.2 m (\bullet), lluvia (barras verticales azul claro), riego ponderado (barras verticales azul oscuro) y drenaje (barras grises) durante el periodo experimental. Las barras en los puntos son \pm EEM. Las bandas coloreadas verticales son los periodos de reposo sin riego.

Globalmente, la cantidad total de agua drenada durante el periodo experimental fue un 7.4% respecto al agua total añadida (riego + lluvia).

5.3.2 Evapotranspiración del cultivo (ET_C).

La evolución de la evapotranspiración real del cultivo de melocotono Flordastar (ET_C), calculados según la Ecuación 5. 6, siguió un comportamiento similar durante los tres años de ensayo (Figura 5. 6).

Los riegos se iniciaron después de la máxima floración (mediados de febrero), sin embargo los valores de la ET_C son prácticamente despreciables ($ET_C < 1 \text{ mm día}^{-1}$) y con una ligera inflexión, no aumentan hasta después del aclareo, que tiene lugar generalmente a principios de marzo. Este aumento se mantiene hasta la cosecha (principios de mayo), pasada la cual se observa una disminución. Este primer máximo sucede más tarde en 2009 que en 2007 y 2008, debido a que tanto el aclareo como la recolección se realizaron más tarde en 2009 (Figura 5. 6).

Desde primeros de junio los niveles de ET_C vuelven a aumentar hasta alcanzar un valor máximo anual en verano (4.9 mm día⁻¹, en 2007; 5.6 mm día⁻¹, en 2008; 6.2 mm día⁻¹, en 2009). A partir de esta fecha los valores de ET_C disminuyen hasta final de año (Figura 5. 6).

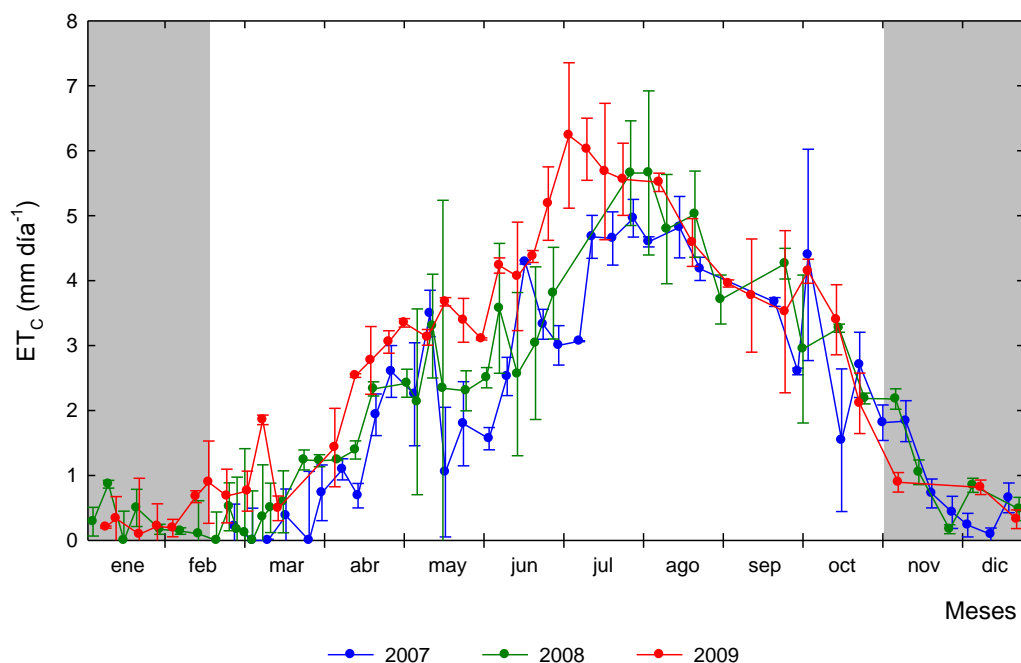


Figura 5. 6. Evolución de la evapotranspiración del cultivo (ET_C) de melocotonero Flor-dastar durante 2007 (●), 2008 (●) y 2009 (●). Las barras en los puntos son \pm EEM. Las bandas coloreadas verticales son los periodos de reposo sin riego.

La disminución de la ET_C que tiene lugar después de la cosecha, y de una forma más ligera tras el aclareo, parece ser debida a un ajuste del árbol en respuesta a la eliminación de los frutos, aunque esta disminución es temporal. Algunos autores relacionan elevados consumos de agua en melocotonero (ET_C) con cargas de frutos altas (Chalmers *et al.*, 1983), por lo que sería razonable esperar una disminución de la ET_C después de que la cosecha haya sido retirada.

Ayars *et al.* (2003) indican que los cambios en el área foliar de melocotoneros no son los responsables de las variaciones en el consumo de agua observadas después de la cosecha, por lo que son otros factores fisiológicos los que están mediando en esta respuesta.

En este sentido, los mecanismos de retroalimentación que ejercen los frutos por los fotoasimilados pueden estar implicados, ya que se ha comprobado que el crecimiento activo de frutos ejerce un efecto positivo sobre el intercambio gaseoso a nivel foliar, tal y como se ha encontrado en diversas especies de *Prunus*: melocotonero (Ben-Mimoun *et al.*, 1996), guindo (Laine y Flore, 1993) y albaricoquero (Galego, 1998).

Los valores medios del periodo experimental (3 años) correspondientes a la evapotranspiración real del cultivo de melocotonero Flordastar (ET_C) y del cultivo de referencia (ET_o) siguen una tendencia similar (Figura 5. 7), con valores mínimos en invierno y máximos en los meses de verano. En este sentido cabe destacar que el valor máximo de ET_o (7.65 mm día⁻¹) se sitúa a finales de junio, mientras que el de ET_C se produce a principios de agosto (5.4 mm día⁻¹), observándose una diferencia entre ambos valores máximos de unos 37 días (Figura 5. 7), desfase similar al encontrado en California por Ayars *et al.* (2003) para melocotoneros tardíos de la variedad O´Henry.

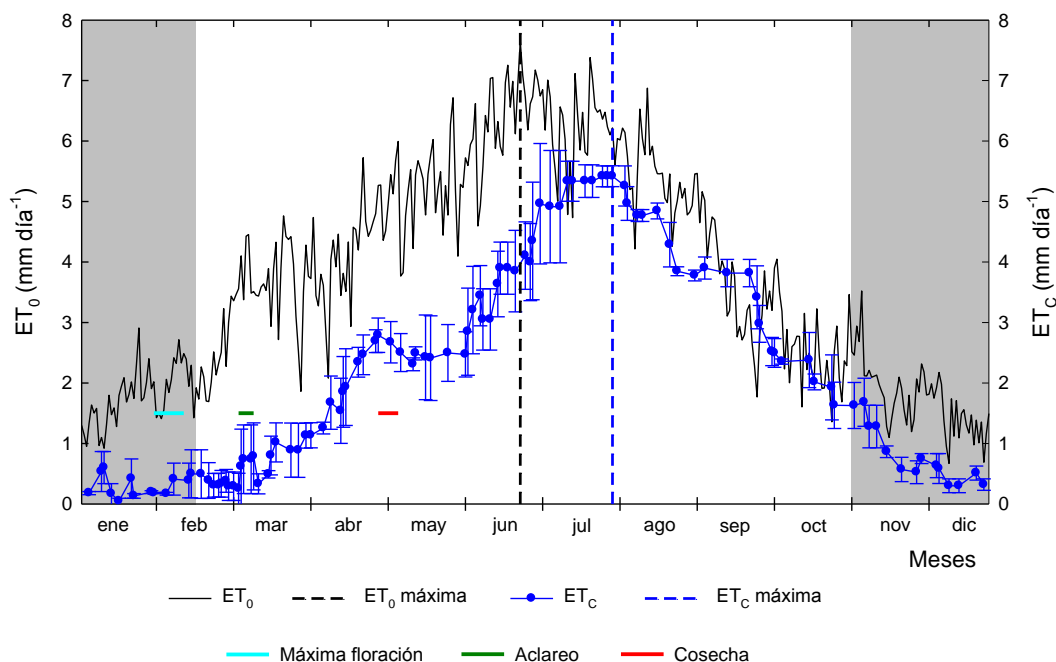


Figura 5. 7. Evolución anual de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o , línea continua) y la evapotranspiración del cultivo de melocotonero Flordastar (ET_C , ●). Los valores corresponden a la media de 3 años. Las barras en los puntos son \pm EEM. Las bandas horizontales representan la máxima floración (—), aclareo (—) y cosecha (—). Las líneas punteadas verticales indican los valores máximos de ET_o y ET_C . Las bandas coloreadas verticales son los periodos de reposo sin riego.

El agua total consumida por el cultivo durante el periodo experimental se recoge en la Tabla 5.2, con un valor medio de de ET_C anual de 838 mm.

Los valores anuales de ET_o (Tabla 5. 2) indican que el clima fue muy estable en los tres años estudiados (1369 ± 13 mm año⁻¹); sin embargo, la evapotranspiración real del cultivo (ET_C) aumentó ligeramente durante el periodo experimental, con tasas diferentes: de 2007 a 2008 el aumento fue de un 20%, mientras que de 2008 a 2009 fue de un 11% (Tabla 5. 2). Este aumento viene dado por el crecimiento de los árboles, el cual fue mayor entre 2007 y 2008 (44 y 78% de área sombreada (AS), respectivamente), que el registrado entre los dos últimos años (80% de AS en 2009). Este hecho, además, justifica el aumento en los volúmenes de riego aplicados, que fueron incrementándose ligeramente cada año.

Tabla 5. 2. Valores anuales de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y la evapotranspiración del cultivo de melocotonero Flordastar (ET_C) durante el periodo experimental.

Año	ET_o	ET_C	K_C Global
2007	1366.65	712.62	0.52
2008	1347.80	852.49	0.63
2009	1391.30	947.64	0.68

5.3.3 Coeficiente de cultivo (K_C).

Los valores de coeficiente de cultivo (K_C) de melocotonero Flordastar se determinaron para cada año del periodo experimental utilizando la Ecuación 5. 7. Aunque K_C no se calculó en periodos de lluvias copiosas, porque ET_o tiende a valores mínimos y origina valores ficticios de K_C , se interpolaron algunos valores para dar continuidad a los cálculos. El análisis de la varianza indicó la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre los 3 años (datos no mostrados), por lo que se considerarán los valores medios. Dichos valores se muestran en la Figura 5. 8, comparativamente con los del coeficiente de cultivo único que propone FAO-56 para frutales caducifolios (Allen *et al.*, 1998).

La evolución de K_C (Figura 5. 8) es paralela a la de ET_C (Figura 5. 7), pudiéndose distinguir diferentes fases relacionadas con la fenología del cultivo. Hasta mediados de marzo los valores de coeficiente de cultivo fueron prácticamente nulos, denotando unas muy bajas necesidades hídricas al principio de la estación (Figura 5. 8).

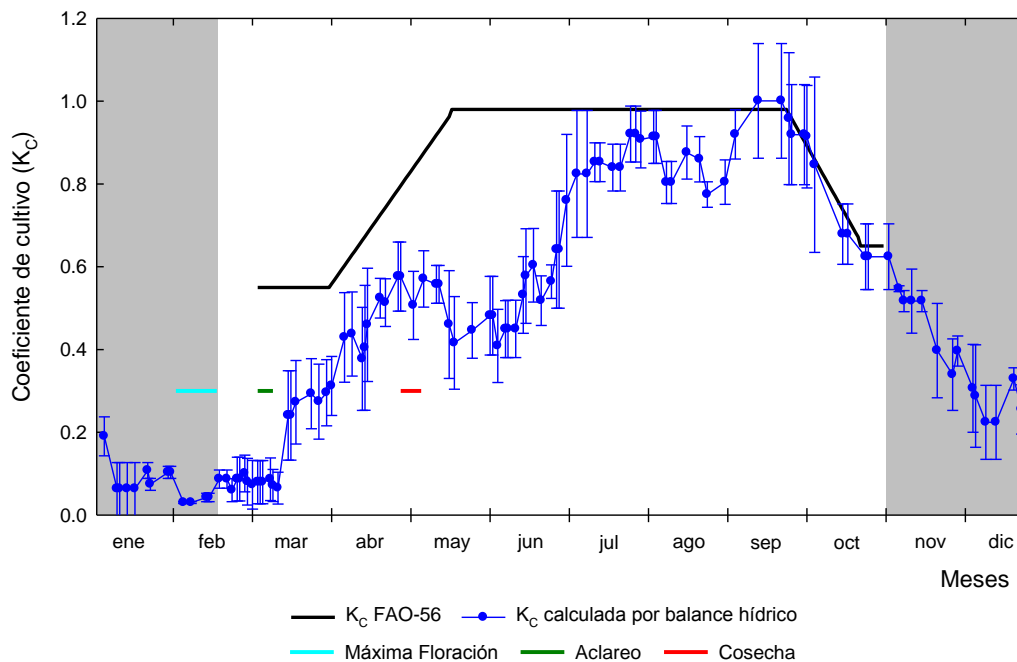


Figura 5. 8. Valores de coeficiente de cultivo (K_C) para melocotonero Flordastar obtenidos mediante balance hídrico (●) y los que proporciona FAO-56 (—). Los puntos corresponden a la media de 3 años. Las barras en los puntos son \pm EEM. Las bandas horizontales representan la máxima floración (—), aclareo (—) y cosecha (—). Las bandas coloreadas verticales son los periodos de reposo sin riego.

Desde mediados de marzo, coincidiendo con el aclareo, hasta la recolección (principios de mayo) el valor de K_C aumenta linealmente con el día del año (DA), pasando de 0.2 a 0.6. A continuación se produce una ligera disminución a 0.4, durante un corto periodo después de la cosecha. A principios de junio se produce un aumento importante del coeficiente de cultivo hasta alcanzar un valor máximo a mediados de julio (≈ 0.9), el cual se mantiene más o menos constante hasta final de septiembre. Desde este momento se inicia otra fase en la que K_C disminuye hasta final del año, si bien a primeros de noviembre se suprime el riego porque comienza la defoliación y el consumo tiende a cero (Figura 5. 8).

La mayoría de los estudios confirman una reducción del coeficiente de cultivo para melocotonero respecto al proporcionado por FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) cuando se realizan estudios de balance hídrico a escala local, tal y como indican Ayars *et al.* (2003) trabajando en lisímetro de pesada o Paço *et al.* (2006) usando la técnica de covarianza de torbellinos.

A efectos prácticos se ha confeccionado la Tabla 5. 3 que recoge los valores de K_C para melocotonero Flordastar ajustados a una ecuación lineal en función del día del año (DA) para las distintas fases del cultivo descritas anteriormente (Figura 5. 8). Cabe destacar que al inicio de la estación de riegos se emplea un coeficiente bajo (0.1), que tras la cosecha la ecuación lineal es decreciente y en el verano el K_C es de 0.9.

Tabla 5. 3. Parámetros de la regresión lineal entre el coeficiente de cultivo (K_C) y el día del año (DA) para los principales periodos fenológicos del melocotonero Flordastar ($K_C = a + b \cdot DA$).

Período	Fecha	DA	a	b	r (P)
Cuajado	Mitad febrero – Mitad marzo	45-75	0.0667	-	-
Crecimiento fruto	Mitad marzo – Principios mayo	75-125	-0.3691	0.0077	0.9596***
	Principios mayo - Principios junio	125-156	0.9436	-0.0032	0.6420**
Postcosecha	Principios junio – Mitad Julio	156-196	-1.5091	0.0120	0.9486***
	Mitad julio - Fin septiembre	196-273	0.8794	-	-
	Fin septiembre – Principios noviembre	273-309	3.1246	-0.0081	0.9772***

r: coeficiente de correlación (P: nivel de significación ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$)

La Figura 5. 9 muestra los valores de ET_C calculados multiplicando la ET_o media del periodo experimental por K_C de FAO-56 ($ET_C (FAO-56)$) y por K_C obtenido mediante el balance hídrico ($ET_C (BH)$). Durante la temporada de riegos, se observa un primer periodo, hasta el mes de julio, en el que los valores de $ET_C (BH)$ son menores que los de $ET_C (FAO-56)$ y un segundo periodo donde los dos valores son similares o incluso $ET_C (FAO-56)$ es menor que $ET_C (BH)$ (Figura 5. 9). Un comportamiento similar ha sido registrado por Ayars *et al.* (2003) en un estudio de 4 años en melocotonero, donde el K_C , calculado por balance hídrico en lisímetro de pesada, fue menor que el sugerido por FAO-56 al principio de la estación.

5. Determinación de las necesidades hídricas del cultivo mediante balance hídrico

El valor de ET_C (BH) fue de 746.3 mm y de 943.8 mm para la ET_C (FAO-56) para la temporada de riegos. Esta disminución, cuando se utiliza el balance hídrico para el cálculo de la ET_C , se traduce en un ahorro medio anual de agua de riego del 16%.

En este mismo sentido, se han obtenido ahorros del 8% en albari-
coqueros Búlida (Abrisqueta *et al.*, 2001) y del 5% en melocotoneros tard-
íos (Ayars *et al.*, 2003), cuando se emplean coeficientes de cultivo calcu-
lados para las condiciones locales por balance hídrico.

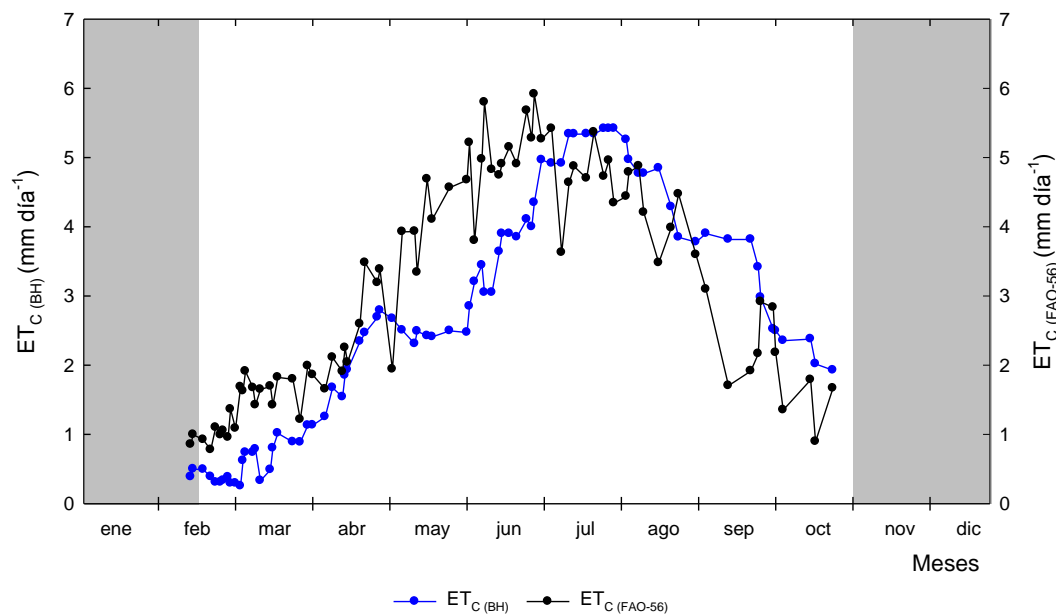


Figura 5. 9. Evolución anual de la evapotranspiración del cultivo (ET_C) de melocotonero Flordastar calculada por balance hídrico (●, ET_C (BH)) y la obtenida mediante el método FAO-56 (●, ET_C (FAO-56)). Los valores corresponden a la media de 3 años.

Capítulo 6
Respuesta agronómica y fisiológica al
riego deficitario

6.1 Introducción

La disminución de los recursos hídricos disponibles junto a su inadecuado manejo ha convertido al agua en el más preciado de los recursos naturales, no sólo en España sino en muchas en zonas áridas y semiáridas del mundo. Al déficit estructural de agua se añade la presión del desarrollo turístico y residencial y la competencia por otros usos. Siendo la agricultura el principal consumidor de agua (Libro Blanco del Agua en España, 2000) es prioritario mejorar la eficiencia del uso del agua en la agricultura de regadío.

El riego juega un papel cada vez más importante en la estabilización de la producción de frutales en particular y de alimentos en general (English y Raja, 1996). La sensibilidad del melocotonero a la sequía obliga a su cultivo en condiciones de regadío, para la obtención de producciones rentables. Por ello, en regiones con limitados recursos hídricos, es necesario desarrollar nuevas estrategias que permitan reducir los consumos de agua para optimizar el uso del recurso. Entre ellas caben destacar las orientadas a disminuir los aportes de agua con mínimo impacto en la producción, como las estrategias de riego deficitario controlado (Chalmers *et al.*, 1981; Goldhamer, 1989; Ruiz-Sánchez y Girona, 1995; Girona *et al.*, 1993, 2005) o el riego parcial de raíces (Dry *et al.*, 1996).

Otras estrategias incluyen la mejora de los sistemas de aplicación de agua, a través de la programación de los riegos. En este sentido, el desarrollo de nuevos equipos ha ayudado a la toma de decisiones en el manejo del riego en base al control en continuo de indicadores del estado hídrico de la planta (Jones, 2004; García-Orellana *et al.*, 2007; Conejero *et al.*, 2007) o del suelo (Dane y Topp, 2002). Entre los equipos de monitorización del agua en el suelo destacan los basados en técnicas electromagnéticas, que permiten una medida rápida, no destructiva y fácilmente automatizable (Topp y Davies, 1985; Dean *et al.*, 1987; Paltineanu y Starr, 1997). Las sondas de capacitancia permiten obtener información de la dinámica del agua en el suelo ya que miden en continuo y tiempo real las

variaciones del contenido de agua en el perfil del suelo (Starr y Paltineanu, 1998; Goldhamer *et al.*, 1999).

Por estas razones, el objetivo de este capítulo se centró en estudiar la respuesta del melocotonero Flordastar a distintas estrategias de riego deficitario: sostenido (RDS), controlado (RDC) y parcial de raíces (RPR), así como comparar la programación del riego automático (Ta), con sondas de capacitancia, con la tradicional, basada en el cálculo de la ET_C . Para ello, durante tres años se estudiaron las relaciones hídricas, el crecimiento vegetativo y del fruto, la producción y la calidad de la cosecha en los distintos tratamientos de riego ensayados.

6.2 Material y métodos

Los ensayos se realizaron en la parcela experimental de melocotoneros cuyas características se detallan en el capítulo 4. La descripción de los tratamientos de riego se muestra en la Figura 4. 8.

Durante las campañas 2006/07, 2007/08 y 2008/09 se realizaron medidas del estado hídrico del suelo y planta y del crecimiento vegetativo y productivo siguiendo la metodología que se describe a continuación.

6.2.1 Estado hídrico del suelo

El contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v) se midió utilizando una sonda de neutrones (apartado 5. 2. 2), para lo cual se instalaron, a 15 cm del segundo gotero, 20 tubos de acceso (1 en cada repetición y tratamiento) de 1.2 m de longitud (Fotografía 6. 1). Las medidas se realizaron cada 7-10 días, desde 20 hasta 80 cm de profundidad, a intervalos de 10 cm. La humedad en los primeros 10 cm se determinó usando un equipo TDR (apartado 5. 2. 2). Los resultados se expresaron como contenido de agua acumulado en el perfil (Ecuación 5. 4). Los valores fueron ponderados a la superficie humectada en cada tratamiento (0.25, 0.15, 0.17 y 0.15 para T1, T2, T3 y T4, respectivamente).

El estado energético del agua en el suelo se evaluó con medidas del potencial mátrico con tensiómetros tipo WaterMark®, que cubren el rango entre 0 y -200 kPa. Para ello, se instalaron 2 unidades, a 20 y 40 cm de profundidad, a 20 cm del emisor a cada lado del árbol en tres repeticiones del tratamiento de riego parcial de raíces (Fotografía 6. 1). Los tensiómetros, con sus correspondientes transductores, estaban conectados a un sistema automático de adquisición de datos (MicroIstis®), programado para tomar datos de tensión cada 15 minutos. Los datos almacenados eran enviados al laboratorio vía GSM.



Fotografía 6. 1. Disposición del tubo de acceso de sonda de neutrones, sondas Watermark® (tubos finos azules), sondas capacitivas Cprobe™ (tubos blancos de PVC) y caudalímetro.

Para la medida en continuo del contenido de agua en el suelo se usaron sondas capacitivas, tipo FDR (Cprobe™) (Figura 6. 1). Para ello se instalaron, en 2 repeticiones del tratamiento control y el de riego automático, 1 tubo de acceso de PVC, de 51.4 mm de diámetro interior y 135 cm de longitud, a 10 cm del segundo gotero (Fotografía 6. 1). Cada sonda consta de 5 sensores capacitivos ubicados a 10, 20, 30, 50 y 80 cm de profundidad. Previamente a su instalación las lecturas de cada sensor fueron normalizadas tomando lecturas en agua y aire según la ecuación 6. 1, definida en voltaje normalizado (VN):

$$VN = \frac{V_a - V_s}{V_a - V_w} \quad 6.1$$

donde, V_a es la lectura del sensor dentro del tubo de PVC expuesto al aire, V_s es la lectura en el suelo y V_w es la lectura en agua de riego.

Para la obtención de las curvas de calibración, se relacionaron las unidades de voltaje normalizado (VN) de la sonda con los valores de humedad volumétrica (θ_v) determinados por gravimetría. La regresión, para el rango de humedad de 0.1 a 0.4 $m^3 m^{-3}$, presentó la relación lineal (Ecuación 6. 2):

$$\theta = 0.44 \cdot VN + 12.0 \quad R^2 = 0.98 \quad 6.2$$

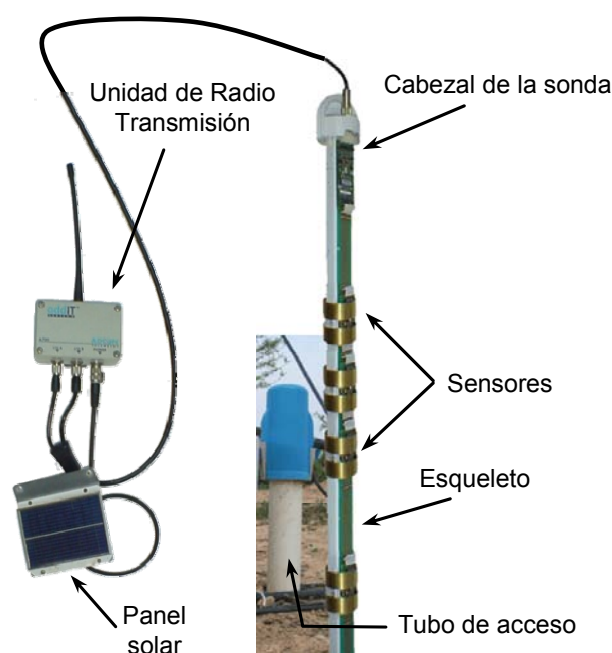


Figura 6. 1. Detalle de los componentes de una sonda capacitiva tipo FDR.

El sistema se completa con un caudalímetro de pulsos que se instaló debajo del gotero para registrar el tiempo y la dosis de riego (Fotografía 6. 1). Todos los sensores estaban conectados a un sistema de adquisición de datos dotado de un control telemático que registra medidas cada 5 min y promedia cada 15 min. La operación de apertura y cierre del

riego en el tratamiento de riego automático (Ta) se realizaba a través del propio sistema telemático mediante electroválvulas tipo “latch” de 9 Vcc.

6.2.2 Estado hídrico de la planta

El estado hídrico de la planta fue evaluado a partir de medidas semanales del potencial de xilema y del intercambio gaseoso.

El potencial hídrico de xilema o de tallo (Ψ_{tallo}) se determinó utilizando una cámara de presión (Soil Moisture Equipment Co., modelo 3000) (Fotografía 6. 2). Las medidas se realizaron a mediodía solar en hojas sanas y adultas (cuatro hojas por cada tratamiento), cercanas al tronco y en la zona sombreada (Norte). Las hojas fueron previamente cubiertas con papel de aluminio al menos dos horas antes de la medida (McCutchan y Shackel, 1992, Shackel *et al.*, 1997).



Fotografía 6. 2. Cámara de presión (Izda.) y detalle de una hoja tapada en el árbol (Dcha.).

En cuanto al intercambio gaseoso, la tasa de fotosíntesis neta (F_n) y la conductancia estomática (g_i) se determinaron sobre hojas soleadas (dos hojas por árbol en cada repetición y tratamiento) utilizando un medidor portátil de intercambio gaseoso (LICOR LI-6400, LICOR Inc. Lincoln, Nebraska, USA) (Fotografía 6. 3).



Fotografía 6. 3. Equipo de medida de intercambio gaseoso LICOR LI 6400 (Izda.) y medida sobre hoja (Dcha.).

6.2.3 Crecimiento vegetativo

Dinámica radical

La dinámica del sistema radical se ha estudiado en los tratamientos T1, T2 (RDS) y T3 (RPR). Para ello se ha empleado un sistema de tubos transparentes (minirrizotrones) en los que se introduce un escáner circular para tomar imágenes de las raíces que están en contacto con los tubos, que posteriormente se analizan con un programa informático específico.

Descripción e instalación de los minirrizotrones

Los minirrizotrones consisten en tubos de Plexiglás de 1.80 m de longitud, 6.2 cm de diámetro interior, 4 mm de espesor y 7 cm de diámetro exterior. Los tubos se enterraron en el suelo a 1 m del tronco de los árboles, junto al segundo emisor, con una inclinación de 45° (con lo que introduciendo 1.4 m se alcanza 1 m de profundidad) (Figura 6. 2). El hecho, observado por diversos autores (Levin *et al.*, 1979; Ruggiero y Andiloro, 1984; van Zyl, 1988; Faust, 1989; Chalmers, 1990), de que en riego localizado el sistema radical quede prácticamente limitado a la zona humectada del suelo, justifica la ubicación de los minirrizotrones únicamente en dicha zona.

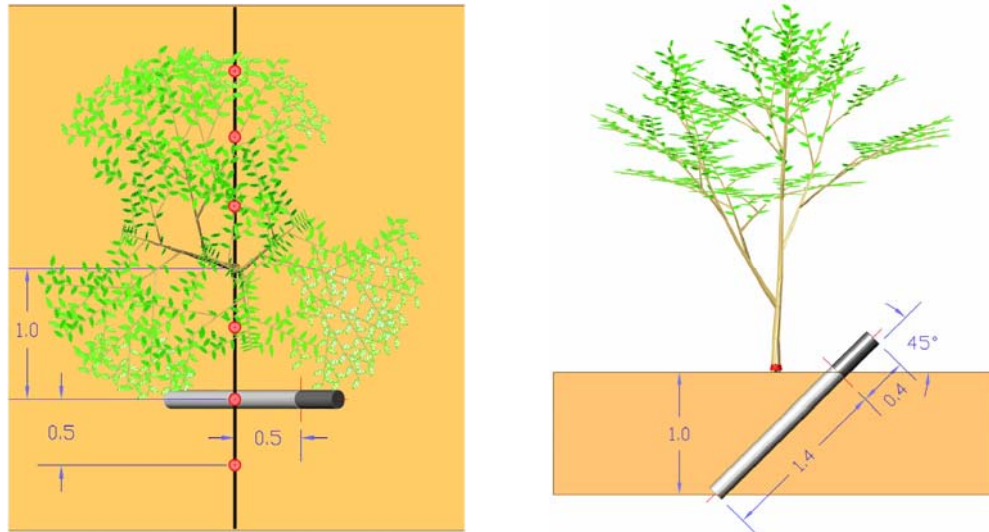


Figura 6. 2. Esquema de la disposición del minirrizotróon respecto al tronco del árbol y a la superficie del suelo (● y ■: goteros).

Para la instalación se empleó un equipo perforador (Fotografía 6. 4) a cuyo motor se fijó una barra de acero y, en el extremo opuesto se acopló una barrena dentada con un diámetro 1 cm superior al del minirrizotróon. Con el fin de facilitar el trabajo se aplicó agua a través de la barrena (Fotografía 6. 4).

Tras cepillar las paredes del orificio se introdujo cuidadosamente el minirrizotróon. La porción enterrada está sellada en su extremo y los 40 cm que quedan sobre la superficie se cubrieron con una lámina de plástico de color negro en su cara interna, para impedir la entrada de luz, y de color blanco por fuera para evitar el calentamiento excesivo del tubo (Fotografía 6. 5). Con estas medidas se pretenden evitar posibles alteraciones en el crecimiento de las raíces en las capas más superficiales del suelo (Levan *et al.*, 1987; McMichael y Taylor, 1987). El tubo se cerró con un tapón para evitar la entrada de lluvia, hojas o polvo.

Se han instalado minirrizotrones en tres repeticiones de cada tratamiento: tres tubos en los tratamientos T1 y T2, y seis tubos (uno a cada lado del árbol) en el tratamiento T3 (RPR) (Fotografía 6. 4 derecha).



Fotografía 6. 4. Equipo perforador para la instalación de minirrizotrones (Izda.) y disposición de los minirrizotrones en el tratamiento RPR (Dcha.).

Descripción del escáner circular

El cabezal lineal de exploración o escáner (CI-600, CID Bio-Science, Inc. Vancouver, Canadá) mide 35 cm de largo y 6.2 cm de diámetro y dispone de ruedas que facilitan su desplazamiento (Fotografía 6. 5). Para obtener una imagen completa se inserta en el minirrizotrón y se inicia el programa de exploración en el ordenador portátil (Fotografía 6. 5). El escáner gira automáticamente 360° creando una imagen de 21.59 x 19.56 cm, con una resolución de 600 píxeles.

El escáner se desplaza manualmente mediante una varilla que dispone de 8 muescas separadas 20 cm. La lente del escáner mide 23 cm, por lo que las imágenes se solapan 3 cm. La primera porción del minirrizotrón (40 cm, pintada en blanco) se utiliza para calibrar el escáner, actividad que se realiza cada vez que se inicia una sesión de medidas. Las siguientes porciones corresponden al tubo enterrado. La relación entre la profundidad y la proyección verticales respecto a la superficie del suelo se muestra en la Tabla 6. 1.

Tabla 6. 1. Relación entre la posición relativa de cada sección del minirrizotrón, profundidad media y distancia horizontal al gotero

Imagen	Sección del minirrizotrón (cm)	Profundidad media (cm)	Distancia horizontal al gotero (cm)
1	0 - 15	5	-45
2	15 - 35	17.5	-33
3	35 - 55	32.5	-19
4	55 - 75	47.5	-5
5	75 - 95	62.5	9
6	95 - 115	77.5	23
7	115 - 135	92.5	37



Fotografía 6. 5. Detalle del escáner circular y minirrizotrófono (Dcha.) y equipo completo para la medida de dinámica de raíces en campo (Izda.).

Parámetros radicales

Las imágenes son almacenadas en un ordenador portátil y posteriormente analizadas con un programa informático específico para el estudio de raíces (WinRHIZO Tron®, Regent Instruments Inc., Canadá). Este software obtiene parámetros radicales como color, longitud, área, volumen y número total de raíces, diferenciando las raíces vivas, las que han muerto y las que han desaparecido. Además, se pueden clasificar en función de distintos diámetros de raíz, según la clasificación de Böhm (1979): Muy finas <0.5 mm, Finas 0.5-2 mm, Pequeñas 2-5 mm, Medias 5-10 mm, Grandes 10-20 mm, Muy grandes >20 mm.

En este trabajo se considerarán los parámetros correspondientes a longitud total, número total de raíces y densidad de longitud radical (DLR), correspondientes a las raíces totales y a las de nuevo crecimiento, identificables por su color blanquecino.

La DLR se define como la longitud total de raíces, en centímetros, en cada centímetro cúbico de suelo. Existen dos métodos para realizar el cálculo de la DLR. El primero, basado en el número total de raíces conte-

nidas en el área observada del minirrizotrón (DLR_p), se calcula mediante la ecuación de Upchurch y Ritchie (1983):

$$DLR_p = \frac{N \cdot d}{A \cdot d} \quad 6.3$$

donde:

- DLR_p : Densidad de longitud de raíces, según el número de raíces (cm de raíz / cm³ de suelo).
- N : Número total de raíces observadas en cada sección del tubo. Valor obtenido con el programa WinRHIZO-Tron®.
- A : Área del marco de observación del minirrizotrón (439.82 cm²), corresponde al área de la pared exterior del tubo en el intervalo considerado.
- d : Diámetro exterior del tubo (7 cm), incluido en la fórmula para que sea dimensionalmente correcta.

El segundo método está basado en la longitud total de raíces contenidas en el área observada del minirrizotrón (DLR_L) y se calcula mediante la ecuación de Johnson *et al.* (2001):

$$DLR_L = \frac{L}{A \cdot PC} \quad 6.4$$

donde:

- DLR_L : Densidad de longitud de raíces, según la longitud de raíces (cm de raíz cm⁻³ de suelo)
- L : Longitud total de raíz observada en el marco del minirrizotrón (cm). Valor obtenido con el programa WinRHIZO-Tron®.
- A : Área del marco observada en el minirrizotrón (439.82 cm²).
- PC : Profundidad de campo que posee el escáner dentro del minirrizotrón (0.65 cm).

Distribución radical

Para el estudio de la distribución radical en los tratamientos T1, T2 y Ta se tomaron muestras de suelo en julio de 2007, utilizando una barrena de 452 cm³. La toma de muestra se distribuyó en una malla a 0, 30, 60, 100, 160 y 250 cm del segundo gotero, a un lado y otro del árbol, hasta una profundidad de 90 cm y a intervalos de 15 cm (Figura 6. 3). Se tomaron 2 repeticiones de cada tratamiento (4 repeticiones si se considera sólo un lado del árbol).

Las muestras de suelo se mantuvieron en cámara frigorífica a 3 °C hasta su procesamiento. De cada muestra de suelo se tomó una submuestra para la determinación de la humedad gravimétrica, que fueron pesados antes y después de introducirlos en la estufa a 105 °C hasta peso constante. Los datos fueron transformados en humedad volumétrica multiplicando por la densidad aparente.

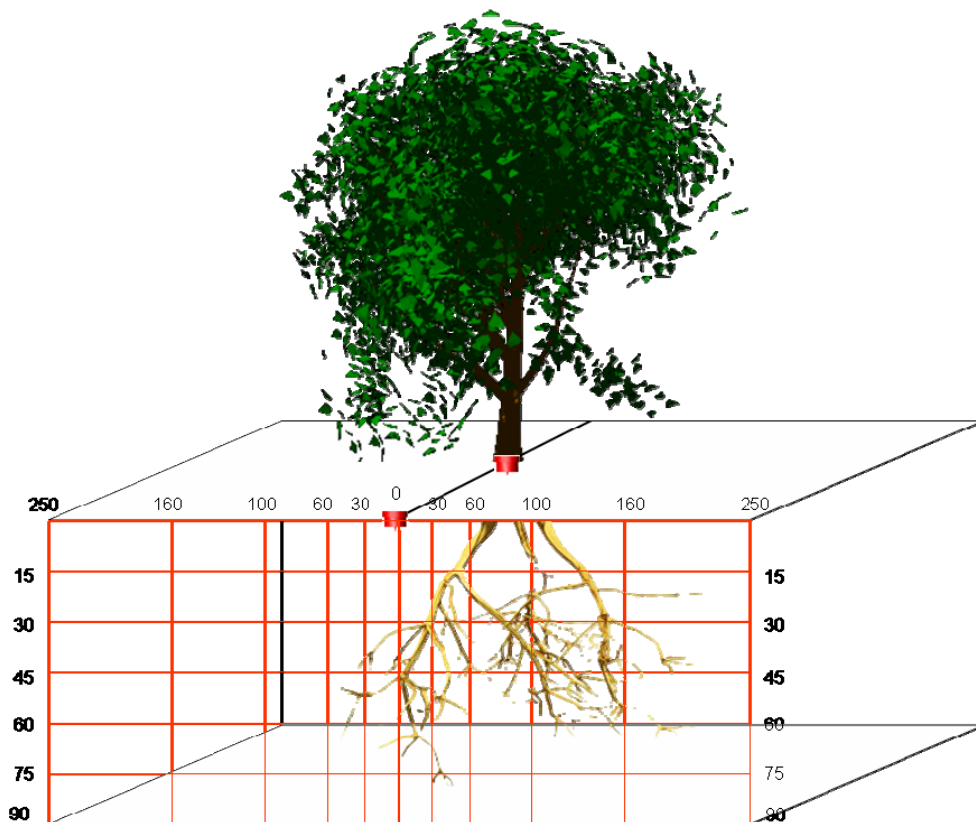


Figura 6. 3. Malla de muestreo para el estudio de la distribución de raíces. Las intersecciones de las líneas rojas representan los puntos de muestreo en el perfil 0-0.9 m.

Para separar las raíces del suelo, las muestras se introdujeron en recipientes con agua (12 L) y hexametáfosfato sódico (≈ 40 g), lo que provoca la floculación de las arcillas, manteniéndose 24 h con agitación ocasional. Después se procedió al lavado y tamizado (0.5 mm) de las raíces, que fueron evaluadas con un escáner (LA 1600+, Regent Instruments Inc., Canadá) con una resolución de 200 ppp.

Las imágenes resultantes fueron analizadas con el software WinRhizo Pro®, para obtener datos de longitud total y por diámetros, clasificados en tres categorías (< 0.5 , $0.5-2$ y > 2 mm), dado el bajo porcentaje encontrado en raíces > 2 mm. Todos los datos fueron expresados como densidad de longitud de raíces (DLR) ($\text{cm de raíz cm}^{-3}$ de suelo).

Ramos y tronco

Para la medida del crecimiento de ramos se marcaron, al inicio de la estación, ramos de unos 20-30 cm de longitud y 1-2 cm de diámetro, orientadas según los cuatro puntos cardinales, en un árbol por repetición de cada tratamiento.

Una vez iniciada la brotación, se midió la longitud de la rama principal y de todos los brotes laterales con una periodicidad de 15-30 días. Las medidas de diámetro del ramo se realizaron con un calibre digital (CRAFSTMAN) y las de longitud con un flexómetro (Fotografía 6. 6).



Fotografía 6. 6. Medida del diámetro (Dcha.) y crecimiento de ramos (Izda.).

El diámetro del tronco, se midió anualmente en los 10 árboles testigo de cada repetición en todos los tratamientos durante el periodo de reposo (enero), con un pie de rey, 30 cm por encima del injerto (Fotografía 6. 7). En 2008 se realizó una medida también en junio.



Fotografía 6. 7. Medida del diámetro del tronco.

Tamaño de copa

El tamaño de la copa del árbol se evaluó en base a medidas del volumen y de la superficie sombreada en todos los tratamientos.

El **volumen de la copa** se estimó a partir de medidas de la altura del árbol y el diámetro de la copa (en dos direcciones perpendiculares), realizadas con jalones, en verano de cada año del periodo experimental. Las medidas se realizaron en 20 árboles (5 por repetición) de todos los tratamientos. Las fórmulas aplicadas fueron las propuestas por Hutchinson (1977), considerando que el árbol tiene la forma de una pirámide (Ecuación 6. 5):

$$Volumen = \left(\frac{anchura^2 \cdot altura}{2} \right) \quad 6.5$$

y la propuesta por Westwood (1988), que considera el árbol de forma cilíndrica (Ecuación 6. 6):

$$Volumen = \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \alpha \cdot H \right) \quad 6.6$$

donde, $\alpha = 0.667$.

La estimación de la **superficie sombreada** por el árbol se realizó, en agosto de cada año, con la evaluación del número de cuadrados sombreados en una tela (2.5 m x 2.5 m) que cubría $\frac{1}{4}$ del marco de plantación y cuyos cuadrados elementales eran de 624 cm² (Fotografía 6. 8). La tela se colocó bajo el árbol, en el cuadrante norte, realizándose las medidas entre las 11:00 y 13:00 hora solar. La medida se realizó en 2 árboles por repetición de cada tratamiento. La evaluación del número de cuadrados se realizó manualmente en 2007 y con el análisis de imágenes de fotografías en 2008 y 2009.



Fotografía 6. 8. Medida de la superficie sombreada.

Poda

En diciembre de cada año se realizaron las labores de poda de fructificación y mantenimiento de los árboles en todos los tratamientos. Las ramas eliminadas de los cinco árboles centrales de cada repetición y tratamiento se pesaron en campo. Adicionalmente, y a partir de una submuestra, se determinó su peso seco a 65 °C en estufa con flujo de aire forzado.

6.2.4 Fructificación y crecimiento del fruto

Requerimientos de calor (GDH)

La acumulación de calor diario necesario para completar cada período fenológico se ha empleado como medida del tiempo fenológico (Richardson *et al.*, 1975). Los requerimientos de calor, expresados como GDH o GDD (del inglés, Growing Degree Hours o Days), corresponden al número de GDH entre la ruptura de yemas y la fecha en la que el 50% de las flores-frutos están en un determinado estado. Para la variedad Flordastar la ruptura tiene lugar cuando se acumulan 225 UF (unidades frío) (Sherman *et al.*, 1988), calculadas según el método de Richardson *et al.* (1974) y aplicado en la Región de Murcia por Egea *et al.* (2003).

La acumulación de calor (GDH) se calculó según las ecuaciones propuestas por Anderson *et al.* (1986) para las temperaturas menores (ecuación 6. 7) o mayores (ecuación 6. 8) que la óptima:

$$GDH(k) = \sum_{i=r}^k \sum_{h=1}^{24} \frac{T_u - T_b}{2} \left[1 + \cos \left(\pi + \pi \frac{T_h(i) - T_b}{T_u - T_b} \right) \right] \text{ cuando } T_b \leq T_h \leq T_u \quad 6.7$$

y

$$GDH(k) = \sum_{i=r}^k \sum_{h=1}^{24} \frac{T_u - T_b}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \frac{T_h(i) - T_u}{T_c - T_u} \right) \right] \text{ cuando } T_u \leq T_h \leq T_c \quad 6.8$$

donde, k es un día determinado, r es el día de la ruptura de yemas, T_h es la temperatura media horaria a la hora h y día i , T_u es la temperatura óptima (25 °C), T_b es la temperatura base (4 °C) y T_c es la temperatura crítica (36 °C).

Fructificación

Coincidiendo con el momento de máxima floración (Tabla 6. 2) se marcaron cuatro ramas, de 2 cm de diámetro y \approx 1 m de longitud, en un

árbol de cada repetición y tratamiento en las que se contó el número de flores y yemas florales existentes. Tras el cuajado se evaluó el número de frutos (% de fructificación) antes y después del aclareo (Tabla 6. 2).

Tabla 6. 2. Fechas de las principales labores culturales en la parcela de melocotonero Flordastar durante el periodo experimental.

Año	Inicio Riego	Máxima floración	Aclareo	Recolección	Fin Riego	Poda
2007	16-feb	12-feb	6-mar	7-may	6-nov	15-16-dic
2008	12-feb	30-ene	4-11-mar	30-abr	4-nov	17-18-dic
2009	24-feb	29-ene	14-19 mar	6-may	1-nov	23-nov-

Crecimiento del fruto

La dinámica de crecimiento del fruto se determinó midiendo el diámetro ecuatorial de 100 melocotones elegidos al azar alrededor del árbol, en cinco árboles de cada repetición y tratamiento, usando un calibre digital (CRAFSTMAN) (Fotografía Fotografía 6. 9). Las medidas se realizaron desde el aclareo (principios de marzo) hasta la recolección (mayo) con periodicidad semanal.



Fotografía 6. 9. Medida del diámetro del fruto.

6.2.5 Producción y calidad de la cosecha

La recolección se realizó a principios de mayo de cada año, en uno o dos cortes (Tabla 6. 2) y fue evaluada pesando el total de frutos cosechados en los cinco árboles testigo de cada repetición y tratamiento (Fotografía 6. 10).

El peso medio del fruto se determinó pesando y contando el número de frutos contenidos en al menos cinco cajas de cada repetición.

La calidad de la producción se evaluó en campo mediante la distribución de calibres, según la clasificación comercial propuesta por la norma de comercialización de melocotones y nectarinas en fresco (Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 1999). Dado que, según la citada norma, el calibre mínimo admitido en la categoría Extra es de 56 mm de diámetro, se empleó un calibrador (Fotografía 6. 10) preparado para clasificar en 5 categorías según el diámetro máximo:

Tabla 6. 3. Calibre de melocotones según las normas de comercialización del Diario Oficial de las Comunidades Europeas.

Indicación del calibre (código)	Diámetro ecuatorial
AA	> 73 mm
A	67 - 73 mm
B	61 - 67 mm
C	56 - 61 mm
D	< 56 mm

El porcentaje de distribución de cada calibre se estableció pesando el total de frutos de cada tamaño.

En muestras de 20 frutos tomadas de cada repetición y tratamiento en las distintas fechas de recolección, se realizaron en laboratorio medidas de las características físicas correspondientes a los diámetros ecuatorial, longitudinal y polar (longitud entre el pedúnculo y el ápice del fruto), usando un calibre digital (CRAFSTMAN), y peso fresco unitario, con una balanza digital (Sartorius Serie AW, Sartorius Mechatronics, Alemania) con una precisión de 0.01 g (Fotografía 6. 11).

6. Respuesta agronómica y fisiológica al riego deficitario



Fotografía 6. 10. Vista general de la parcela durante la recolección (Izda.) y calibrador para la distribución de calibres (Dcha.).

El estudio se completó con la medida del contenido de sólidos solubles con un refractómetro (ATAGO N1) (Fotografía 6. 11) a 20 °C, expresando su concentración en grados Brix.



Fotografía 6. 11. Evaluación del peso fresco del fruto (Izda.) y refractómetro para la medida de los sólidos solubles (Dcha.).

6.3 Resultados y Discusión

6.3.1 Relaciones hídricas

En la Figura 6. 4 se muestra el agua aplicada en los distintos tratamientos de riego durante los 3 ciclos del cultivo (2006/07, 2007/08 y 2008/09). En ella se representan los valores de la evapotranspiración del cultivo (ET_c), con respecto a los cuales se programan las reducciones del riego (Figura 4. 7). De forma general, la temporada de riegos finaliza a principios de noviembre y se inicia a principios de febrero de cada año.

Igualmente, para explicar los efectos de los tratamientos de riego sobre el estado hídrico del suelo y la planta, en la Tabla 6. 4 se muestran los volúmenes de agua aplicados durante los principales periodos fenológicos en los que se ha dividido el ciclo de cultivo: postcosecha y fases I, II y III de crecimiento del fruto, a lo largo del periodo experimental.

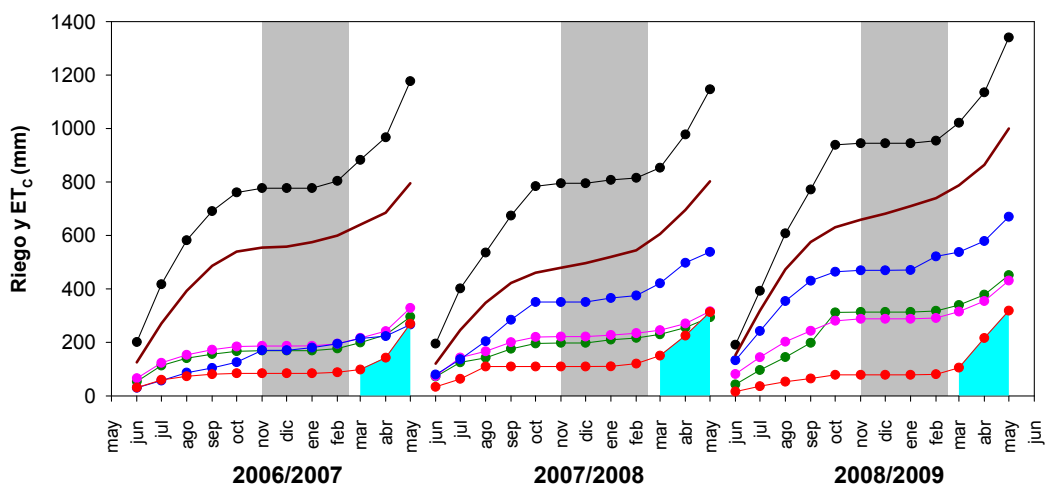


Figura 6. 4. Riego acumulado en los tratamientos T1 (●), T2 (●), T3 (●), T4 (●) y Ta (●) y evapotranspiración del cultivo (ET_c) acumulada (—) durante los ciclos de cultivo 2006/2007, 2007/2008 y 2008/2009 en melocotonero Flordastar. Las bandas azules corresponden al período de riego al 100% en el tratamiento T4. Las bandas grises corresponden al periodo de reposo sin riego.

El tratamiento control (T1) fue programado para asegurar condiciones no limitantes de agua, por lo que los árboles de este tratamiento fue-

ron regados en exceso, con un promedio del 140% de la ET_C para los tres ciclos de cultivo (Figura 6. 4 y Tabla 6. 4).

Los volúmenes de agua aplicados en el tratamiento de riego deficitario sostenido, RDS, (T2), y de riego parcial de raíces, RPR, (T3) fueron similares, con ahorros del 61, 62 y 56% respecto a la ET_C para los ciclos 2006/07, 2007/08 y 2008/09, respectivamente (Figura 6. 4), ligeramente por encima del 50% programado teóricamente en ambos tratamientos (Figura 4. 7).

Tabla 6. 4. Riego aplicado en los distintos tratamientos de riego, lluvia, ET_0 y ET_C (mm) en cada periodo fenológico del melocotonero Flordastar en los ciclos de cultivo 2006/07, 2007/08 y 2008/09.

Ciclo	Tratamiento	Periodo fenológico			Total
		Postcosecha	Fase I y II fruto	Fase III fruto	
2006/07	T1	779.18	112.68	285.29	1177.14
	T2	170.01	32.38	93.29	295.68
	T3	187.70	31.59	109.49	328.77
	T4	84.57	17.79	167.44	269.80
	Ta	185.82	28.64	52.07	266.53
	Lluvia	177.40	57.10	74.6	309.10
	ET_0	941.49	175.49	269.96	1386.95
	ET_C	587.22	60.20	148.16	795.58
2007/08	T1	810.29	103.11	233.15	1146.55
	T2	212.39	29.80	52.12	249.30
	T3	228.71	28.91	58.88	316.50
	T4	112.71	73.82	126.63	313.17
	Ta	370.62	87.32	80.44	538.38
	Lluvia	214.70	30.00	97.4	342.10
	ET_0	886.60	221.50	212.90	1321.00
	ET_C	531.31	112.13	159.01	802.45
2008/09	T1	947.17	46.87	345.57	1340.54
	T2	316.13	16.69	118.65	454.47
	T3	289.45	16.44	125.40	431.29
	T4	81.11	9.30	228.36	318.77
	Ta	474.30	10.62	184.98	669.89
	Lluvia	238.60	24.20	107.40	370.20
	ET_0	958.40	76.10	323.60	1358.40
	ET_C	736.38	36.74	227.20	1000.31

En el tratamiento de riego deficitario controlado, RDC, (T4), el riego aplicado fue similar en los ciclos 2007/08 y 2008/09, con unos 316 mm, y algo más bajos en el primer ciclo (270 mm), si bien la reducción respecto de la ET_C fue similar en los 3 ciclos (riego al 35% de la ET_C) (Figura 6. 4 y

Tabla 6. 4), siendo el tratamiento que recibió menos riego, ya que sólo completaba la ET_C en la fase III de crecimiento del fruto mientras que durante el resto del ciclo el riego era al 25% de la ET_C .

La programación del riego basada en el mantenimiento de un determinado nivel de contenido de agua en el suelo (tratamiento Ta) supuso una reducción del 54% respecto a la ET_C para el ciclo 2006/07, debiendo señalar que los criterios de programación automática fueron aplicados a partir del inicio del riego en el año 2007. Para los ciclos 2007/08 y 2008/09 la reducción fue del 33% (Figura 6. 4 y Tabla 6. 4).

Agua-Suelo-Planta

La evolución del contenido ponderado de agua en el suelo en el perfil 0-0.5 m de profundidad, en los tratamientos control (T1), RDS (T2) y RDC (T4) durante los 3 ciclos del periodo experimental se muestra en la Figura 6. 5.

El contenido de agua en el suelo en el tratamiento **control** se mantuvo en valores muy altos, próximos a saturación, durante los periodos de riego, disminuyendo durante los periodos sin riego (Figura 6. 5). Hay que señalar que una avería de la sonda de neutrones impidió las medidas entre el 26 de julio y el 11 de octubre de 2006.

De acuerdo con los datos de los perfiles hídricos (Figura 6. 6), se puede observar que la humedad en el suelo en el tratamiento control fue superior al valor de capacidad de campo en todo el perfil (0-0.8 m), incluso en profundidad y de forma invariable durante el periodo experimental, tanto en verano (dos días representativos del periodo postcosecha) como durante el crecimiento del fruto, en primavera. Estos hechos indican la ausencia de una situación de déficit hídrico en el suelo durante el periodo experimental, asegurando un adecuado suministro hídrico a los árboles de este tratamiento.

6. Respuesta agronómica y fisiológica al riego deficitario

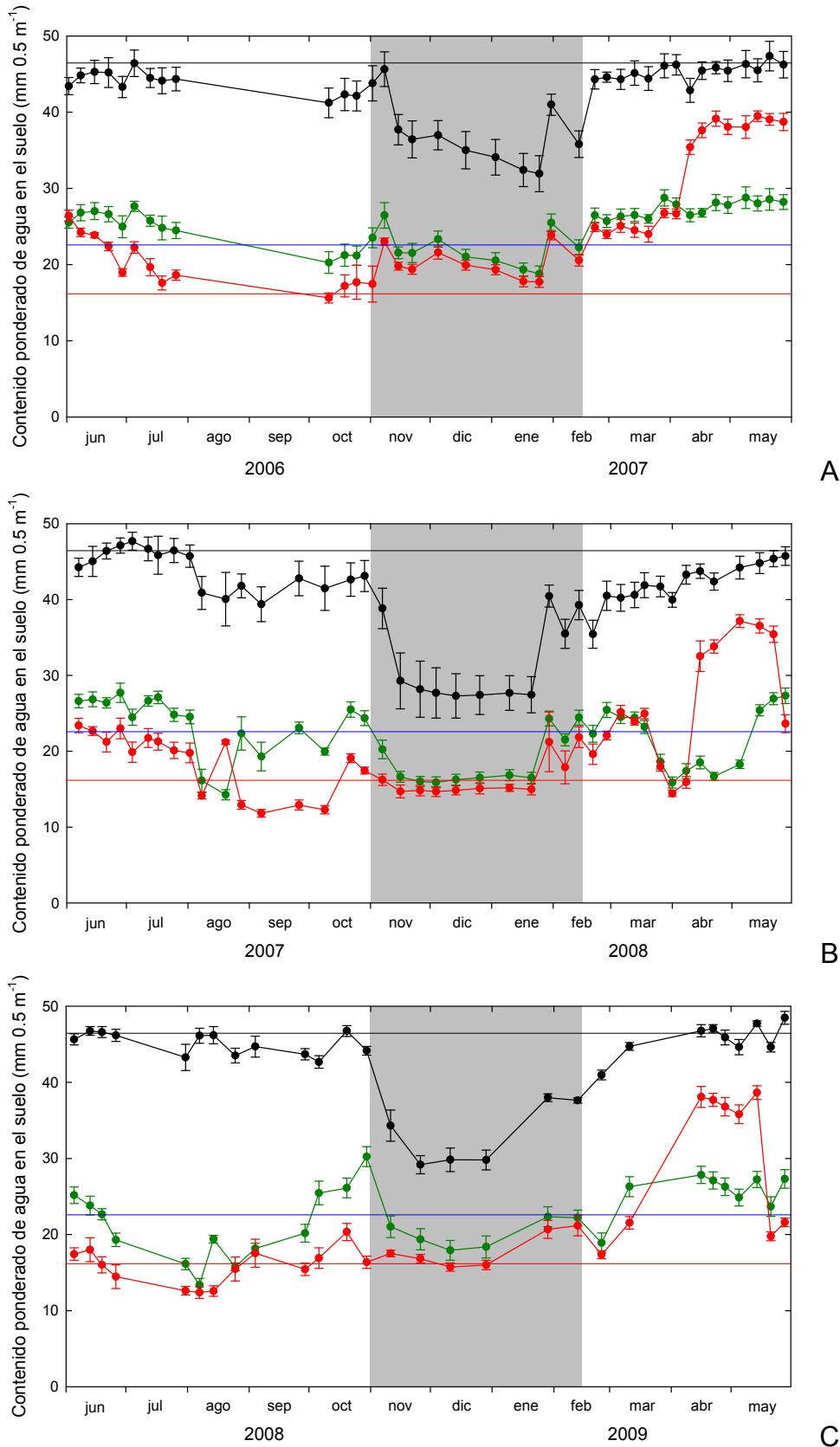


Figura 6. 5. Contenido ponderado de agua en el suelo (mm 0.5 m⁻¹) en los tratamientos T1 (●), T2 (●) y T4 (●) durante 2006/07 (A), 2007/08 (B) y 2008/09 (C). Las líneas horizontales indican saturación (—), capacidad de campo (—) y punto de marchitez permanente (—). Las bandas coloreadas verticales son los periodos sin riego. Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son ± EEM.

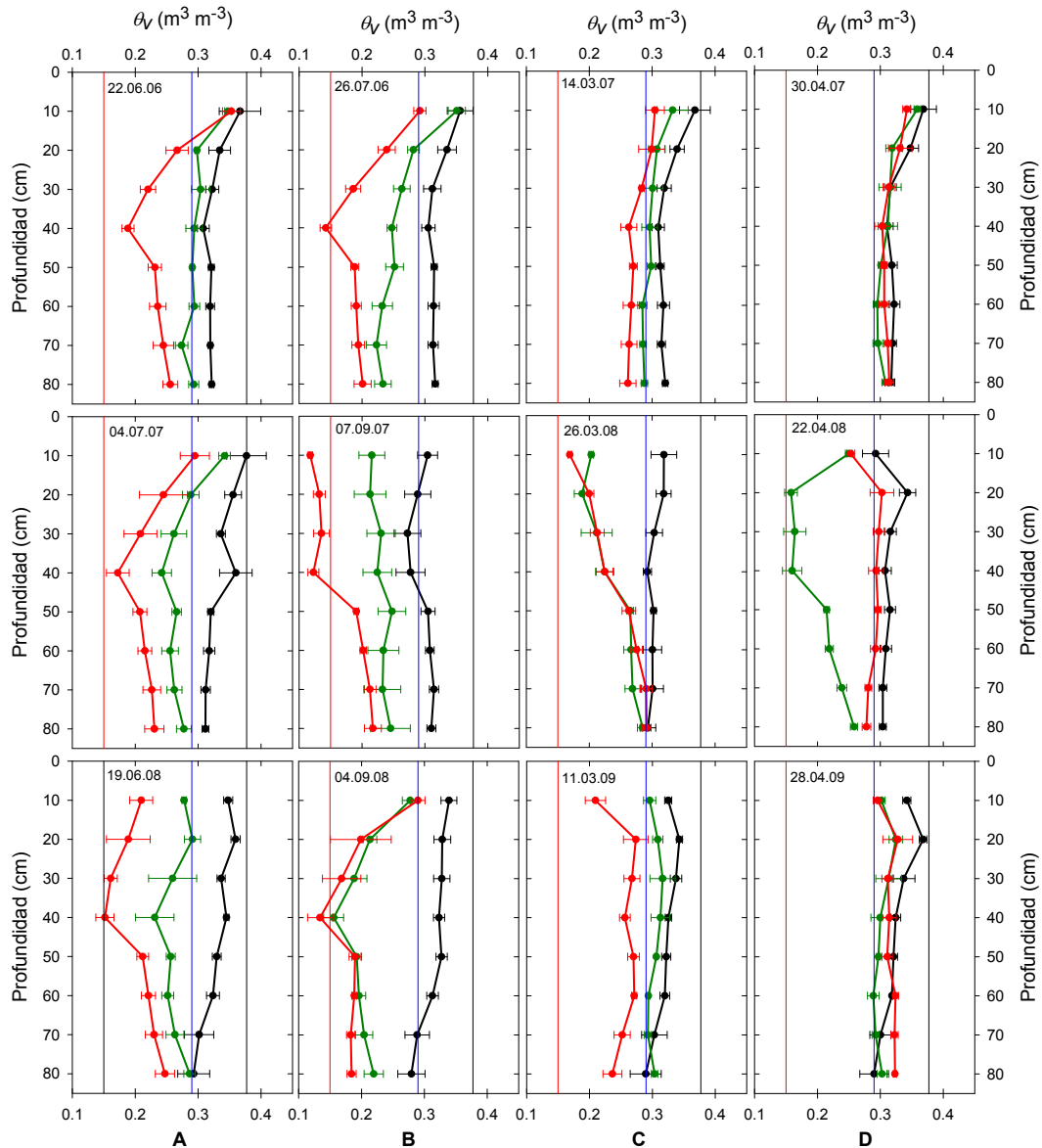


Figura 6. 6. Perfiles de humedad volumétrica (θ_v) en los tratamientos de riego T1 (●), T2 (●) y T4 (●) en fechas representativas del ciclo de cultivo: postcosecha (A y B), fase I y II (C) y fase III (D) de 2006/07 (arriba), 2007/08 (centro) y 2008/09 (abajo). Las líneas verticales indican saturación (—), capacidad de campo (—) y punto de marchitez permanente (—). Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM.

Los valores correspondientes al potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) confirmaron estos hechos, mostrando valores altos los árboles del tratamiento control durante todo el periodo experimental (Figura 6. 7). Aunque el potencial de tallo es más estable que el potencial de hoja (McCutchan y Shackel, 1992), se observó un ligero descenso de Ψ_{tallo} durante el verano, con respecto a los valores de primavera y otoño, en respuesta a las condiciones de alta demanda evapotranspirativa (Figura 6. 7).

6. Respuesta agronómica y fisiológica al riego deficitario

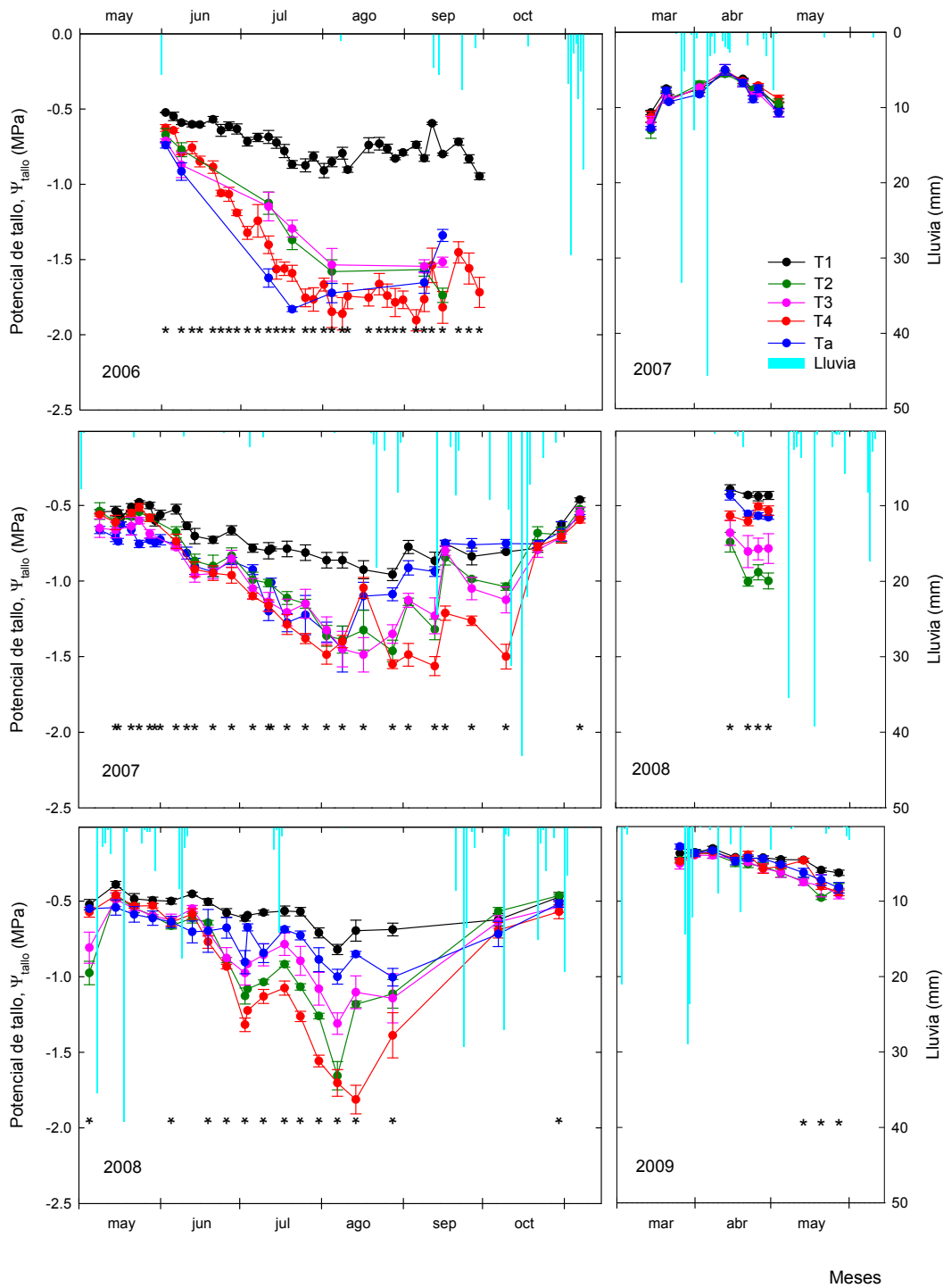


Figura 6. 7. Potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) en los tratamientos T1 (●), T2 (●), T3 (●), T4 (●) y Ta (●) durante 2006/07 (A), 2007/08 (B) y 2008/09 (C). Las barras verticales azules corresponden a la lluvia. Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM. Los asteriscos indican la existencia de diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$).

Es de destacar, que durante la postcosecha de 2007 Ψ_{tallo} en los árboles del tratamiento control disminuyó ligeramente por debajo de -0.85

MPa (Figura 6. 7), valor considerado como un indicador de inicio de estrés hídrico en melocotonero (Shackel *et al.*, 1997), debido a un fallo en el cabezal de riego que aportó cantidades insuficientes de agua en este tratamiento, como ya se ha indicado en el capítulo anterior (apartado 5.3.1).

La evolución del contenido de agua en el suelo en el tratamiento de **riego deficitario sostenido**, RDS, (T2) fue paralela a la del tratamiento control, si bien con valores medios en torno al 40-50% menores que los correspondientes al tratamiento control (Figura 6. 5). En general, cada ciclo se inicia con valores altos, ligeramente superiores a la capacidad de campo, por las lluvias del invierno, con una disminución en verano, donde se observan los valores más bajos de todo el ciclo, así como en los periodos sin riego.

Durante la primavera, los niveles de agua en el suelo se mantuvieron altos (Figura 6. 5), debido a la incidencia de las lluvias y a las condiciones de baja demanda evaporativa de la atmósfera (Figura 4. 4). No obstante, hay que destacar que durante los meses de marzo y abril de 2008 se observan niveles bajos del contenido de agua en el suelo en este tratamiento (Figura 6. 5), coincidiendo con las fases de crecimiento del fruto. En la zona radicalmente activa del suelo (0 - 0.5 m de profundidad), los niveles de humedad fueron menores que en el resto de las profundidades, especialmente en la fase III (Figura 6. 6). Durante esta fase crítica los árboles agotaron las reservas hídricas del suelo, debido a la ausencia de lluvias (Figura 6. 7) y al riego claramente insuficiente (52 mm, Tabla 6. 4).

En agosto de cada año se sobrepasan los valores de punto de marchitez permanente (Figura 6. 5), debido a las condiciones de alta demanda evaporativa de la atmósfera, que durante ese mes alcanzan 6-7 mm día⁻¹ de ET₀ (Figura 4. 4). Los perfiles hídricos en este periodo post-cosecha se mantienen en general entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente (Figura 6. 6).

El potencial hídrico del tallo en los árboles del tratamiento de riego deficitario sostenido muestra los valores más bajos durante el verano de

los tres ciclos, con una recuperación ligera con las lluvias, que suceden de forma puntual en estos meses (Figura 6. 7). Es de destacar cómo el agotamiento de agua en el suelo en la primavera de 2008 afecta a los niveles de Ψ_{tallo} , disminuyendo durante la fase III de crecimiento del fruto, con valores en torno a -0.97 MPa a finales del abril. Ψ_{tallo} se recuperó con las lluvias otoño (Figura 6. 7).

El contenido ponderado de agua en el suelo en el tratamiento de **riego parcial de raíces**, RPR (T3) se muestra en la Figura 6. 8 de forma separada cada lado del árbol. De manera general, durante los tres ciclos de cultivo, se observa la alternancia del riego, que provoca valores altos, en torno a capacidad de campo, en el lado que se riega, mientras el que no se riega se acerca al punto de marchitez permanente, especialmente en la fase de postcosecha (Figura 6. 8).

Este hecho queda reflejado en los perfiles de la Figura 6. 9, donde se puede observar que la humedad volumétrica es alta en la zona que se riega, con valores en torno a capacidad de campo en todo el perfil. En el lado que no se riega los niveles son más bajos, si bien sólo afecta a los primeros 40 cm, no observándose diferencias significativas entre los perfiles de ambos lados por debajo de esta profundidad (Figura 6. 9). Los valores altos de humedad del suelo en profundidad, incluso en el lado que no se riega, indican que las reservas de agua en esa profundidad no son consumidas por la planta, situándose la zona radicalmente activa en el perfil 0-50 cm.

En el periodo sin riego de los ciclos 2007/08 y 2008/09 el contenido de agua en el suelo se aproximó al punto de marchitez permanente a ambos lados del árbol, mientras que en el del ciclo 2006/07 se mantiene ligeramente más alto, debido a la mayor incidencia de las lluvias en este periodo (Figura 6. 8).

6. Respuesta agronómica y fisiológica al riego deficitario

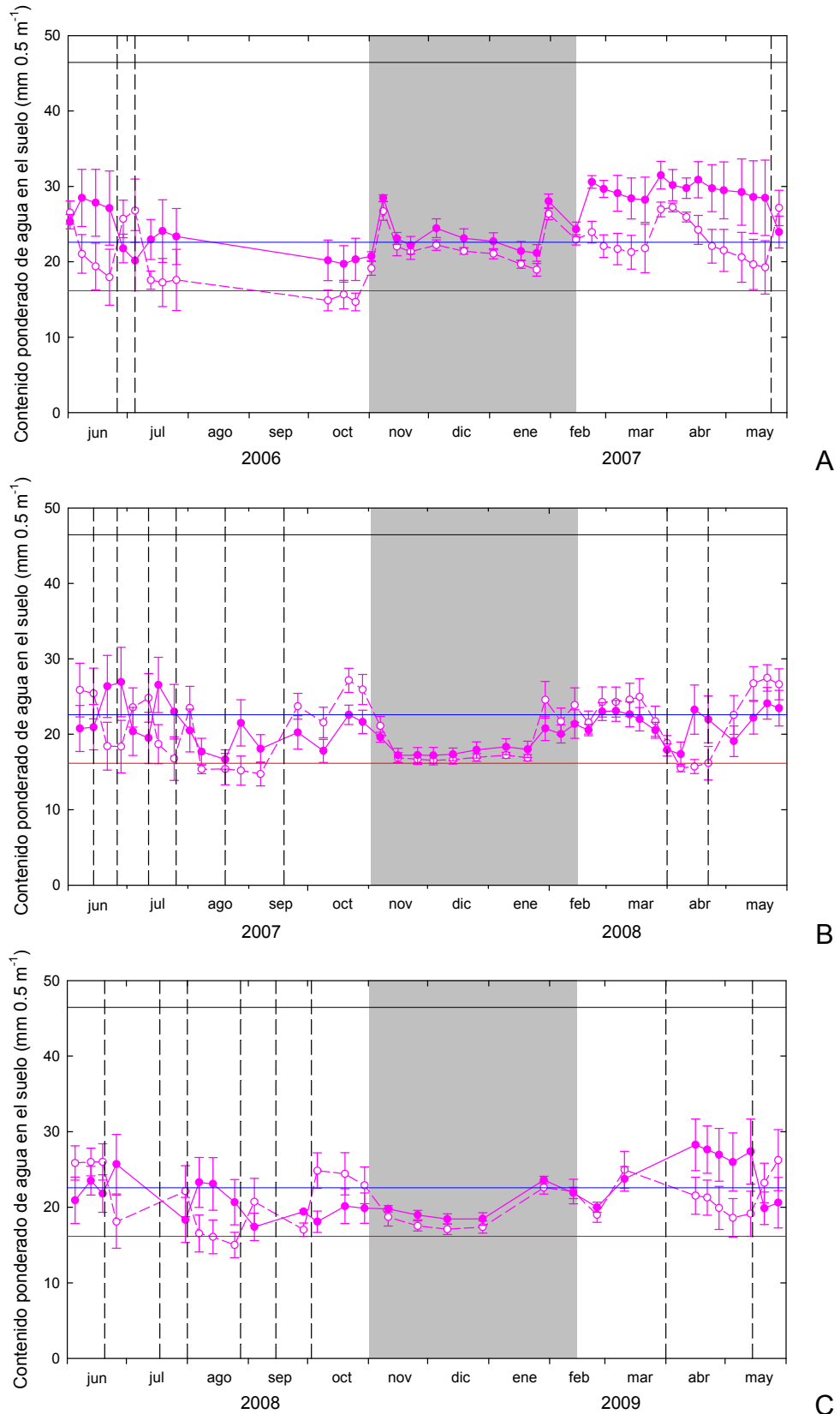


Figura 6. 8. Contenido ponderado de agua en el suelo (mm 0.5 m⁻¹) en el tratamiento T3 izquierda (○), y T3 derecha (●) durante 2006/07 (A), 2007/08 (B) y 2008/09 (C). Las líneas horizontales indican saturación (—), capacidad de campo (—) y punto de marchitez permanente (—). Las líneas verticales punteadas indican cambio de lado del riego. Las bandas coloreadas verticales son los periodos sin riego. Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son ± EEM.

6. Respuesta agronómica y fisiológica al riego deficitario

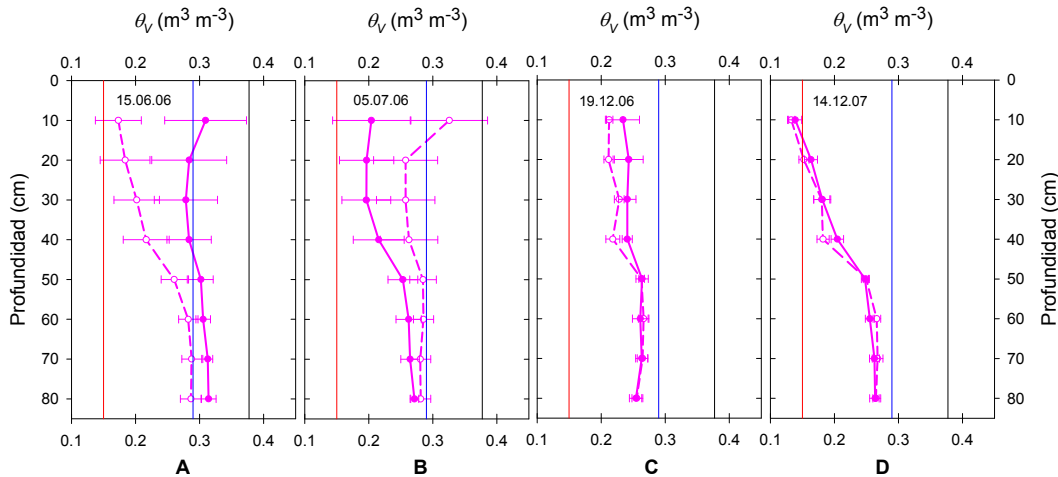


Figura 6. 9. Perfiles de humedad volumétrica (θ_v) en el tratamiento de riego T3 izquierda (○) y T3 derecha (●) en fechas representativas del período de riego en la derecha (A) e izquierda (B) y en los periodos de no riego de 2006/07 (C) y 2008/09 (D). Las líneas verticales indican saturación (—), capacidad de campo (—) y punto de marchitez permanente (—). Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM

En líneas generales la evolución del contenido de agua en el suelo y la del potencial hídrico del tallo fue similar a la del tratamiento de riego deficitario sostenido (T2), con valores de Ψ_{tallo} bajos durante la postcosecha y altos en la primavera, excepto en la de 2008 (Figura 6. 7), tal y como cabía esperar, dado que los volúmenes totales de agua aplicada fueron muy parecidos en ambos tratamientos durante los tres ciclos de cultivo (Tabla 6. 4). Sin embargo, los valores de potencial y agua en el suelo fueron ligeramente más altos en T3 que en T2, lo que puede ser explicado por el hecho de que la dosis de riego recibida en la zona que se riega es superior en T3.

En este sentido, Goldhamer *et al.* (2002), en melocotonero tardío, y de Souza *et al.* (2003), en viña, encuentran valores más altos de Ψ_{tallo} en condiciones de riego parcial de raíces comparados con riego deficitario controlado (50 % de la ET_C) aplicado a ambos lados del árbol.

El contenido de agua en el suelo en los árboles sometidos a **riego deficitario controlado**, RDC (T4), disminuye de manera general al inicio del ciclo, con el riego al 25% de la ET_C , lo que provoca caídas hasta niveles cercanos o inferiores al punto de marchitez permanente, que se mantienen así durante el periodo sin riego, mostrando los valores más bajos

en comparación con el resto de tratamientos durante el periodo experimental (Figura 6. 5). Este hecho queda reflejado en los perfiles hídricos correspondientes a la postcosecha (Figura 6. 6), donde se muestra como la humedad del suelo en los primeros 50 cm de profundidad (zona radicalmente activa) está próxima a los valores de punto de marchitez permanente en los 3 ciclos de cultivo estudiados.

Con el inicio del riego (al 25% de la ET_C), a mediados de febrero, el contenido de agua en el suelo aumenta de manera general y con el inicio de la fase III, cuando el riego restituye el 100% de la ET_C se produce un aumento importante, con valores cercanos a los del tratamiento control y por encima de los de capacidad de campo (Figura 6. 5). Los perfiles hídricos correspondientes a esta fase muestran unos valores de humedad volumétrica homogéneos y próximos al tratamiento control, incluso superiores en profundidad (Figura 6. 6), debido a que durante la fase III del ciclo 2009 se aplicó riego en exceso de la ET_C (Tabla 6. 4).

El potencial hídrico del tallo en los árboles del tratamiento T4 disminuyó desde el inicio de la postcosecha de forma gradual hasta alcanzar valores mínimos en agosto (Figura 6. 7), indicadores de un nivel de estrés hídrico severo en planta, mayor que el resto de los tratamientos, dado que están sometidos a una mayor reducción del riego (Tabla 6. 4). Los niveles más bajos de Ψ_{tallo} se observaron en el verano de 2006, con valores ≈ -1.8 MPa y de forma consistente durante el mes de agosto, mientras que en 2007 los niveles mínimos no superaron los -1.55 MPa. El estrés hídrico en la postcosecha de 2008 fue menor que en la de 2006, si bien se alcanzaron valores de Ψ_{tallo} de -1.8 MPa a mediados de agosto, aunque de forma puntual (Figura 6. 7).

Las lluvias de otoño provocaron una recuperación de Ψ_{tallo} , al igual que en el resto de los tratamientos, independientemente de su nivel de estrés. Cuando el riego deficitario se restituye al 100 % de la ET_C los potenciales hídricos de tallo se recuperan con valores altos y similares a los del tratamiento control (Figura 6. 7).

Para el **tratamiento de riego automático (Ta)**, basado en el control del estado hídrico del suelo con sondas de capacitancia, se muestra la evolución del contenido de agua del suelo en el perfil radical activo (0-0.5 m) en la Figura 6. 10. La dinámica fue distinta para cada año, de acuerdo con los distintos niveles umbrales establecidos para el inicio y fin del riego (Figura 4. 7). En 2007, el contenido de agua del suelo refleja el patrón en forma de campana, similar a la curva de demanda de ET_C , con valores máximos en verano y mínimos en invierno.

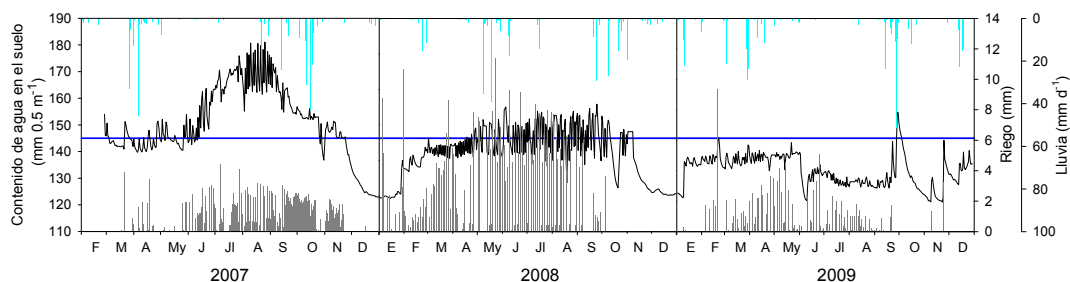


Figura 6. 10. Contenido de agua en el suelo en el perfil 0-0.5 m en el tratamiento de riego automático (Ta), riego diario (barras grises) y lluvia diaria (barras azules) durante el período experimental. La línea horizontal indica la capacidad de campo. Los datos son promedio diario de los originales (15 minutos).

En 2008, el contenido de agua del suelo durante la temporada de riego mostró valores estables y en torno a la capacidad de campo ($145 \text{ mm } 0.5 \text{ m}^{-1}$), si bien con un patrón ligeramente divergente, con grandes variaciones respecto al valor umbral establecido, especialmente en los momentos de alta demanda de ET_C . Ello es debido a que el protocolo previsto en el automatismo iniciaba el riego, si era preciso, a las 22:00 h, y terminaba una vez que el agua alcanzaba 0.8 m de profundidad (incremento del 2% del valor inicial de θ_v a esta profundidad). Por ello el control del contenido de agua en los niveles establecidos era menor en los momentos de alta demanda evaporativa (Figura 6. 10).

Durante 2009, se mostró un patrón más estable, variando el contenido de agua en el suelo en dos niveles, el primero más alto, desde el comienzo de la temporada de riegos hasta la cosecha, tal y como lo establecían los umbrales (100% CC - 95% CC), y el segundo ligeramente inferior (95% CC - 90% CC) en la postcosecha (Figura 4. 7 y Figura 6. 10).

La Figura 6. 11 muestra los valores del contenido de agua del suelo en las distintas profundidades (0.1, 0.2, 0.3, 0.5 y 0.8 m) durante una semana en un periodo de alta demanda evaporativa (julio), pudiéndose apreciar los diferentes perfiles resultantes de una programación del riego con riego diario en 2009, mientras que en 2007 y 2008 fue cada 2-3 días.

En 2007 la dinámica del agua a 0.5 m de profundidad (Figura 6. 11) fue similar a la del perfil completo 0-0.5 m (Figura 6. 10), sin embargo, durante la temporada de alta demanda de riego, se observa un agotamiento del agua en profundidad, tal y como indican las lecturas a 0.8 m (Figura 6. 11).

En 2008 el agotamiento del agua en el suelo a 0.8 m de profundidad apareció antes (Figura 6. 11). En 2009, los límites establecidos después de la cosecha, impidieron que el agua alcanzara horizontes más profundos de 0.3 m, agotándose a 0.5 y 0.8 m de profundidad. Sin embargo, en 2007 y 2008, el sensor situado a 0.5 m detectó el frente mojado en cada evento de riego (Figura 6. 11).

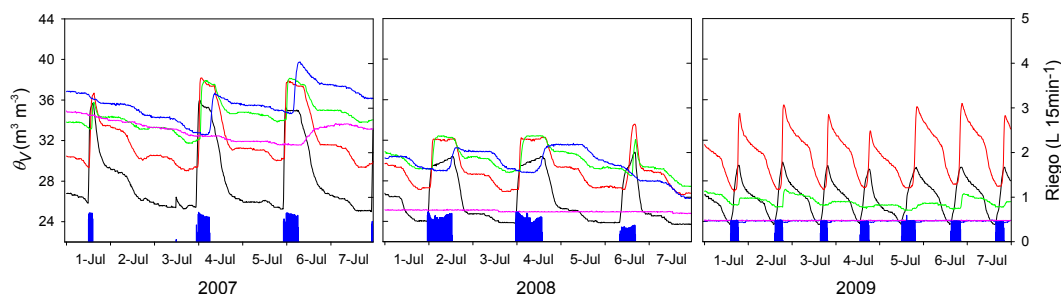


Figura 6. 11. Registro continuo del contenido volumétrico de agua en el suelo a 0.1 (—), 0.2 (—), 0.3 (—), 0.5 (—) y 0.8 m (—) de profundidad y eventos de riego (barras azules) en el tratamiento Ta, durante la primera semana de julio de 2007, 2008 y 2009.

El potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) a lo largo del periodo experimental mostró valores mínimos durante el verano, coincidiendo con máximos de ET_0 , y altos en primavera y otoño o tras episodios de lluvia (Figura 6. 7). En el periodo postcosecha de 2006, cuando el sistema ensayaba un protocolo con riego al 85% de la capacidad de campo, se observan los niveles más bajos de Ψ_{tallo} de todo el periodo experimental (-1.8 MPa), mientras que en el verano de 2007 no se superaron los -1.5 MPa. Durante

2008 se registraron en Ta los valores más altos de Ψ_{tallo} de los 3 ciclos de cultivo. El menor nivel de estrés, coincide con los mayores volúmenes de agua de riego aplicadas al tratamiento Ta durante ese año (438, 672 y 508 mm para 2007, 2008 y 2009, respectivamente).

Aunque el riego se activó siguiendo los distintos protocolos establecidos, el hecho de que el contenido de agua del suelo no se mantuviera constante en torno a los límites puede ser una de las causas de los menores valores de Ψ_{tallo} con respecto al de las plantas del tratamiento control (Figura 6. 7), indicando que los árboles del tratamiento automático soportaron un cierto grado de déficit hídrico.

De acuerdo con DeJong y Bootsma (1996) la producción está más estrechamente relacionada con el agua disponible en el suelo que con cualquier variable meteorológica, por ello el control del contenido de agua del suelo se ha utilizado para estimar los requerimientos de agua y el manejo eficiente del riego (Campbell y Campbell, 1982). En las condiciones experimentales ensayadas, los sensores de capacitancia han resultado ser unas herramientas adecuadas para el control, en continuo y en tiempo real, del contenido de agua del suelo, así como para la evaluación del impacto de diferentes programas de riego. Los datos de humedad en cada profundidad, además, proporcionan una valiosa información sobre el movimiento del frente húmedo, profundidad y actividad del sistema radical y cómo se usa el agua de riego, por ello ha sido empleado para la programación del riego en diferentes cultivos (Starr y Paltineanu, 2002; Fares y Polyakov, 2006; Thompson *et al.*, 2007).

Los parámetros de **intercambio gaseoso**: fotosíntesis neta (F_n) y conductancia foliar (g_l) se midieron en diferentes días despejados durante el periodo experimental. En la Figura 6. 12 se muestran los correspondientes a la fase III de crecimiento del fruto (abril) y a la postcosecha (julio). En el primer caso, no se observan diferencias entre tratamientos en ninguno de los parámetros, debido posiblemente al estrés ligero que soportaban los árboles de los tratamientos de riego deficitario (T2, T3), así como la ausencia de estrés en los de RDC (T4) y riego automático (Ta) durante la primavera (Figura 6. 7); sin embargo, en la postcosecha se

produce una disminución significativa de la fotosíntesis neta y, en mayor grado, de la conductancia foliar en los tratamientos deficitarios T2, T3 y T4 (Figura 6. 12). Hay que destacar que la disminución fue mayor en el tratamiento T4 regado al 25% de la ET_C durante ese periodo. La regulación de las pérdidas de agua por transpiración en respuesta a la reducción en el suministro hídrico ha sido constatada en numerosos ensayos en frutales cultivadas en clima mediterráneo bajo condiciones de déficit hídrico (Turner *et al.*, 1985; Pereira *et al.*, 1986; Girona *et al.*, 1993).

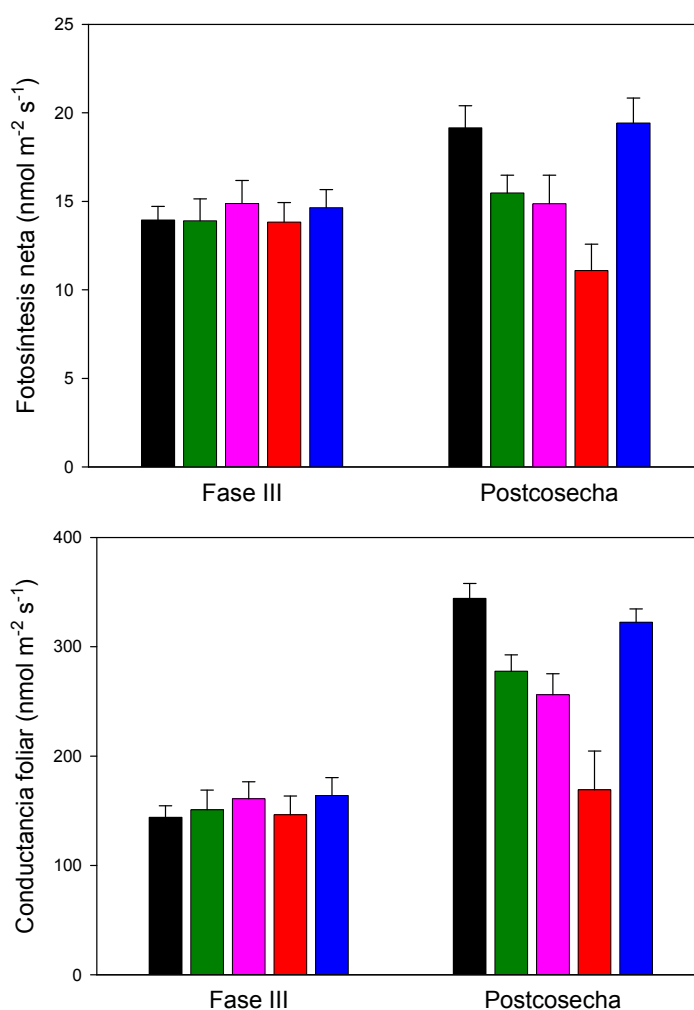


Figura 6. 12. Fotosíntesis neta (A) y conductancia foliar (B) en los tratamientos T1 (■), T2(■), T3(■), T4(■), y Ta (■) en la fase III de crecimiento del fruto y la postcosecha de melocotonero Flodastar. Los valores son la media de 3 años. Las barras son ± EEM.

En relación al tratamiento de riego parcial de raíces, RPR (T3) hay que destacar que no se observaron diferencias significativas con respecto al de riego deficitario sostenido (T2), si bien la reducción en los paráme-

tros de intercambio gaseoso con respecto a los valores del tratamiento control fue ligeramente mayor en T3 (22 y 26% para F_n y g_i , respectivamente frente a una reducción del 19% para ambos parámetros en el T2) (Figura 6. 12).

En este sentido, Fernández *et al.* (2006) no encontraron diferencias significativas en los valores de fotosíntesis neta y conductancia foliar de olivos sometidos a riego parcial de raíces y riego deficitario controlado; similares resultados se señalan en melocotonero (Goldhamer *et al.*, 2002). Según estos autores no hay evidencia de que el RPR cause un efecto positivo en el comportamiento estomático, en comparación con otros métodos de riego deficitario aplicado en ambos lados del árbol.

No obstante la ligera reducción de los parámetros de intercambio gaseoso en el tratamiento de RPR respecto al riego deficitario sostenido en melocotonero apunta a una respuesta relacionada con señales desde las raíces; aunque para concluir de forma definitiva se necesita disponer de más datos.

Índices de estrés

Para la programación automática del riego en base a la medida del contenido de agua en el suelo con sensores de capacitancia se requiere que el agua del suelo se mantenga dentro de unos límites. Comúnmente, el límite superior se aproxima a la capacidad de campo y el límite inferior es ligeramente por encima del nivel donde la planta comienza a experimentar estrés hídrico (Campbell y Campbell, 1982).

Con el objetivo de definir el umbral inferior se realizó un ensayo para evaluar si la dinámica de contenido de agua en el suelo puede utilizarse para desarrollar índices que permitan identificar el comienzo del estrés hídrico en plantas de melocotonero. Para ello se seleccionaron 4 filas de árboles en la parcela experimental a las que se aplicó un ciclo de estrés de un mes de duración, aplicado de dos modos: supresión del riego totalmente (tratamiento de **estrés rápido**) en dos filas y reducción del riego de forma progresiva, con riego nocturno diario al 80, 60, 40, 20 y 0% de la

ET_C , en periodos de una semana (tratamiento de **estrés progresivo**), aplicado en otras dos filas. El estrés se inició coincidiendo con la etapa postcosecha (3 de junio) y se prolongó durante un mes. Desde el inicio de la estación de crecimiento todos los árboles se habían regado diariamente al 120% de la ET_C , igual que el tratamiento control.

En cuatro árboles representativos de cada tratamiento se instaló una sonda de capacitancia, a 0.1 m del segundo emisor. Cada sonda constaba de 5 sensores que se situaron a 0.05, 0.15, 0.25, 0.45 y 0.75 m de profundidad.

De los datos de contenido de agua acumulado en el perfil de suelo 0-0.8 m (CAS) durante el período de estrés se calcularon los siguientes índices, siguiendo las recomendaciones de Thompson *et al.* (2007), para el tratamiento de estrés rápido (Figura 6. 13):

- *Disminución diurna* (DD): diferencia entre el valor máximo y mínimo diario en las horas de luz (07:00 y 20:00 h, respectivamente).

- *Disminución nocturna* (DN): diferencia entre el valor mínimo del día anterior y el máximo del día siguiente.

- *Disminución total diaria* (DTD): diferencia entre el valor mínimo diurno del día anterior y el del día actual. DTD corresponde a la suma de DD y DN.

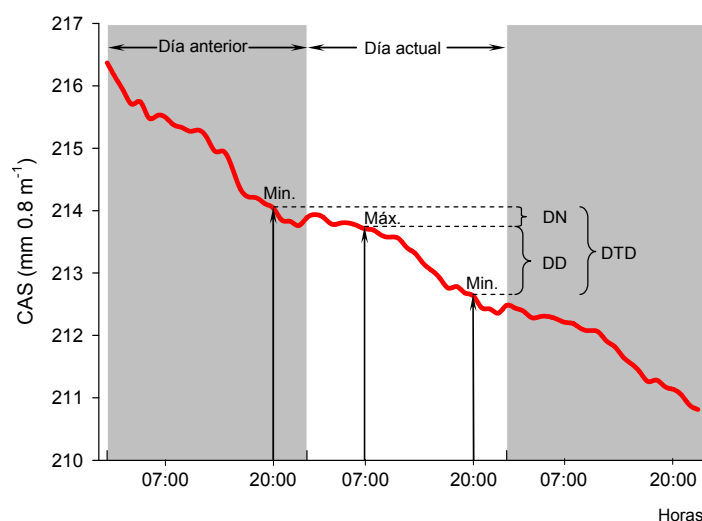


Figura 6. 13. Índices derivados de la disminución del contenido de agua en el suelo (CAS): DD, DN y DTD durante 3 días en el tratamiento de estrés rápido.

Además, en los tratamientos control y de estrés progresivo, que se regaban diariamente, se calculó el índice *disminución máxima diaria* (DMD) como la diferencia entre los valores máximo y mínimo diarios (Figura 6. 14).

La disminución el contenido de agua en el suelo durante el periodo de estrés resultó amortiguada por las lluvias ocurridas el 8 y 9 de junio (≈ 26 mm), que provocaron un aumento en el contenido de agua en el suelo en ambos tratamientos (Figura 6. 14); por ello, el inicio del ciclo de estrés se consideró el 9 de junio.

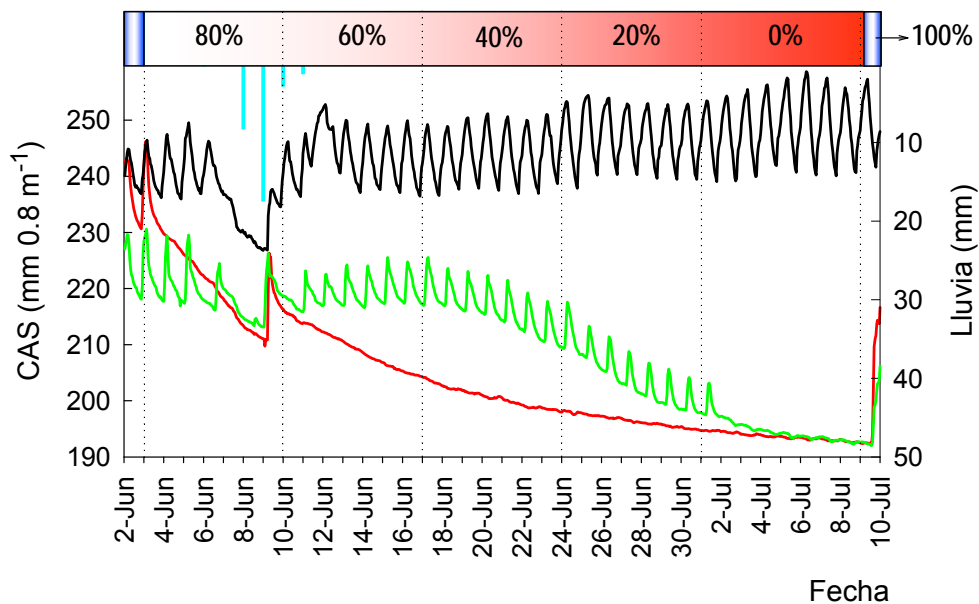


Figura 6. 14. Contenido de agua en el suelo (CAS, $\text{mm } 0.8 \text{ m}^{-1}$) durante el periodo de estrés hídrico en los tratamientos: control (—), estrés progresivo (—) y estrés rápido (—). Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras verticales azules son la lluvia diaria. La barra superior coloreada corresponde al porcentaje de la ET_c en el estrés progresivo.

En las etapas iniciales del estrés, la absorción de agua por la planta provoca disminuciones importantes del CAS durante el día y menores durante la noche, las cuales se van haciendo despreciables cuando cesa el drenaje (Figura 6. 15). Es decir, conforme el suelo se seca, estas disminuciones se van haciendo progresivamente más pequeñas (Starr y Palteanu, 1998a, b; Goldhamer *et al.*, 1999; Girona *et al.*, 2002).

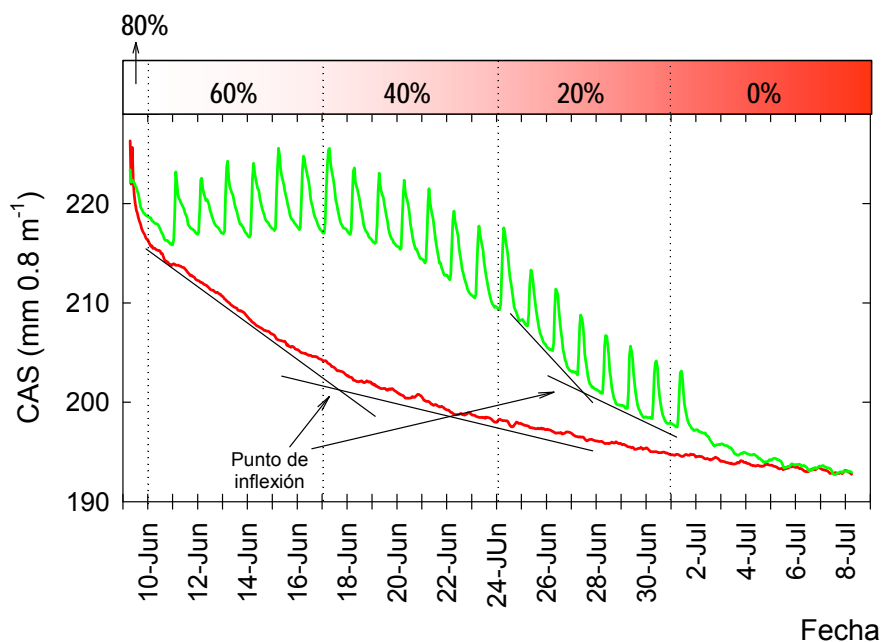


Figura 6. 15. Contenido de agua en el suelo (CAS, mm 0.8 m^{-1}) en los tratamientos de estrés progresivo (—) y estrés rápido (—). Las flechas indican los *puntos de inflexión*. (—). Los valores son la media de 4 repeticiones. La barra superior coloreada corresponde al porcentaje de la ET_C en el estrés progresivo.

Para el estrés progresivo, el riego al 60% de la ET_C (del 11 al 17 de junio) mantiene los niveles de CAS constantes en torno a $220\text{ mm }0.8\text{ m}^{-1}$, y es la reducción del riego al 40% de la ET_C , la que provoca el descenso progresivo del contenido de agua en el suelo indicando un aporte insuficiente de agua a la planta. Durante el periodo de riego al 20% de la ET_C se produce un cambio en la velocidad de disminución de CAS. Cuando se suprimió el riego, el contenido de agua en el suelo descendió, alcanzando valores similares en los registrados en el tratamiento de estrés rápido ($\approx 193\text{ mm }0.8\text{ m}^{-1}$) (Figura 6. 15).

Para el estrés rápido la disminución de CAS fue muy rápida desde el inicio del estrés, amortiguándose posteriormente, para alcanzar valores bajos al final del periodo de estrés (Figura 6. 15).

La transición entre el ritmo relativamente rápido de disminución del contenido de agua en el suelo y el ritmo más lento, identificado como *punto de inflexión*, ha sido sugerido como un indicador del comienzo de estrés hídrico por varios autores (Starr y Paltineanu, 1998a, b; Thompson *et al.*, 2007). El *punto de inflexión*, determinado como la intersección entre

las tangentes de disminución del CAS con diferente pendiente, tuvo lugar el 17 de junio para el estrés rápido y el 27 de junio para el estrés progresivo, correspondiendo a valores de contenido de agua en el suelo muy similares, 203 y 205 mm 0.8 m^{-1} , respectivamente (Figura 6. 15).

El agotamiento de agua en el suelo, según indican los perfiles de humedad medidos con sonda de neutrones que se muestran en la Figura 6. 16, se produjo fundamentalmente en los primeros 40 cm. Los momentos indicados por el punto de inflexión se corresponden con valores próximos al valor del punto de marchitez permanente de este suelo. Tras un semana sin riego en ambos tratamientos de estrés (del 1 al 8 de julio) no se observan variaciones en la humedad del suelo por debajo de 50 cm (Figura 6. 16), lo que indica la ausencia de actividad radical a estas profundidades.

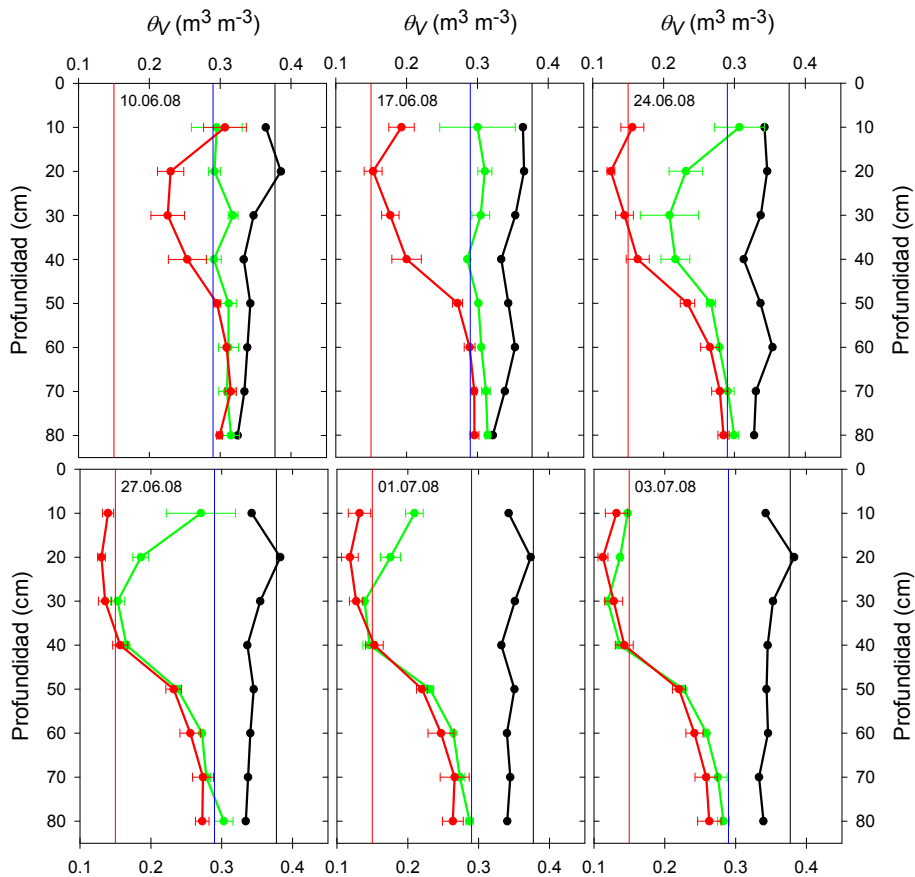


Figura 6. 16. Perfiles de humedad en el suelo (θ_v) en los tratamientos control (●), estrés progresivo (●) y estrés rápido (●) durante el periodo de estrés. Las líneas horizontales indican saturación (—), capacidad de campo (—) y punto de marchitez permanente (—). Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM

Los valores de potencial hídrico de hoja (Ψ_{hoja}) y de tallo (Ψ_{tallo}) fueron similares en todos los tratamientos durante los primeros días del estrés; destacándose una recuperación clara en los valores del Ψ_{hoja} tras los episodios de lluvia (Figura 6. 17). La recuperación total de los potenciales hídricos, después de la reanudación del riego al 100% de la ET_C , se produjo a los dos días para ambos potenciales y en los dos tipos de estrés. Hasta niveles de -2.4 MPa, es de destacar la ausencia de diferencias claras entre los valores de Ψ_{hoja} de los tratamientos de estrés con respecto a los del control (Figura 6. 17).

En cuanto al potencial de tallo (Ψ_{tallo}) las primeras diferencias significativas con respecto al tratamiento control se observaron el 17 de junio, para el estrés rápido. Para el estrés progresivo las diferencias fueron significativas a partir del 27 de junio, aunque es posible que éstas se hubieran producido antes (Figura 6. 17).

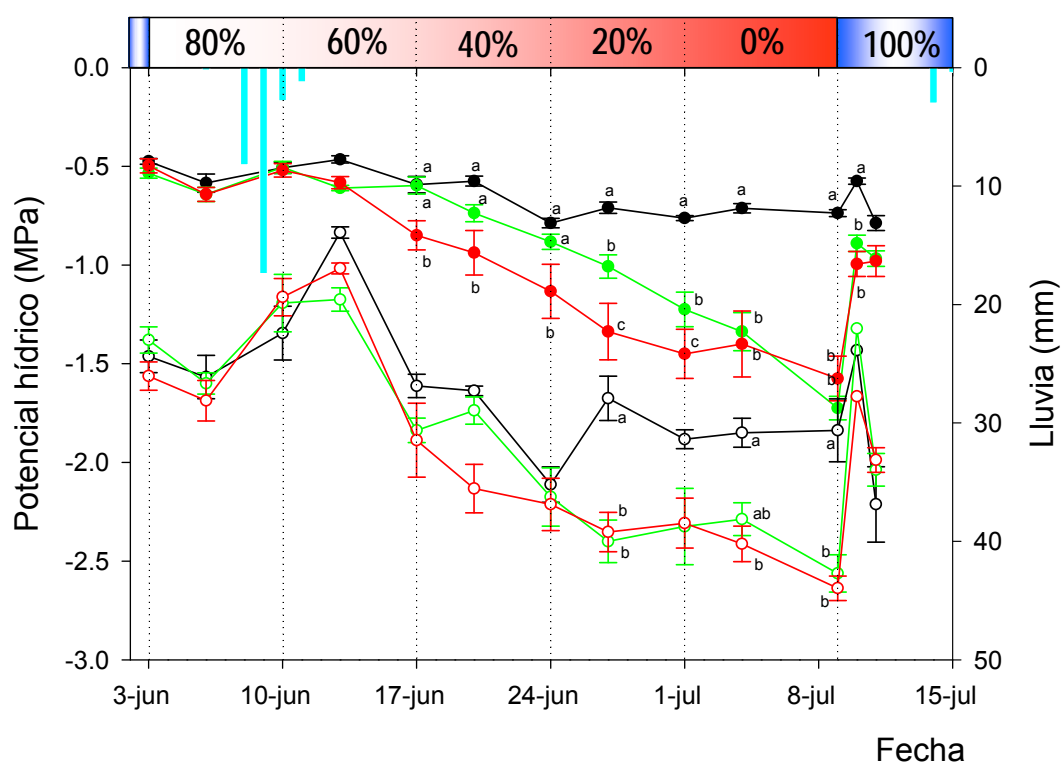


Figura 6. 17. Potencial hídrico de hoja (Ψ_{hoja} , símbolos abiertos) y tallo (Ψ_{tallo} , símbolos cerrados) en los tratamientos control (●), estrés progresivo (●) y estrés rápido (●). La barra superior coloreada corresponde al porcentaje de la ET_C en el estrés progresivo. Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM. Letras distintas indican la existencia de diferencias significativas entre tratamientos, para cada fecha y tipo de potencial, según el test de la $MDS_{0.05}$.

La mayor estabilidad y consistencia de las medidas de potencial de tallo frente a las del potencial de hoja, convierten a Ψ_{tallo} en un mejor indicador para el diagnóstico del déficit hídrico, tal y como ya ha sido señalado en numerosos estudios en frutales (McCutchan y Shackel, 1992; Ferreres y Goldhamer, 2000; Abrisqueta *et al.*, 2002).

De acuerdo con los valores de los índices derivados de la curva de disminución de agua en el suelo, calculados para el estrés rápido, los valores de DN (disminución nocturna) disminuyeron desde el comienzo del período de estrés, estabilizándose en valores prácticamente constantes el 16 de junio, lo que indica el cese de drenaje a partir de esa fecha (Figura 6. 18).

Los valores del índice DD (variación diurna) muestran una disminución progresiva, para llegar a valores bajos y constantes a partir del 17 de junio (Figura 6. 19). Los descensos de DD del 10 al 16 de junio son debidos a la disminución en la disponibilidad de agua, propiciados además por el agotamiento nocturno (DN). Cabe destacar una disminución de la variación diaria del 16 al 18 de junio, cuando los valores de DN son insignificantes, que puede venir dada por una disminución en la demanda evaporativa de la atmósfera (descenso 7 a 6 mm en los valores de ET_0) (Figura 6. 19). Del 18 al 19 de junio, a pesar del aumento de la ET_0 , no se observaron cambios en valores de DD. Esto sugiere que la absorción de agua en las plantas estresadas fue insensible al aumento de la demanda evaporativa, lo que puede considerarse como una *indicación* de la aparición inmediata de estrés hídrico en la planta. Al día siguiente (20 de junio), los valores DD permanecieron constantes (Figura 6. 19), lo que podría considerarse como *confirmación* de que los árboles estaban sufriendo estrés.

El índice de disminución total diaria (DTD) mostró una dinámica similar a la de DD con valores más altos por la inclusión del agotamiento nocturno (DN) que provoca unas mayores diferencias al inicio del periodo de estrés. Las fechas de *indicación* y *confirmación*, fueron las mismas que para DD (datos no mostrados).

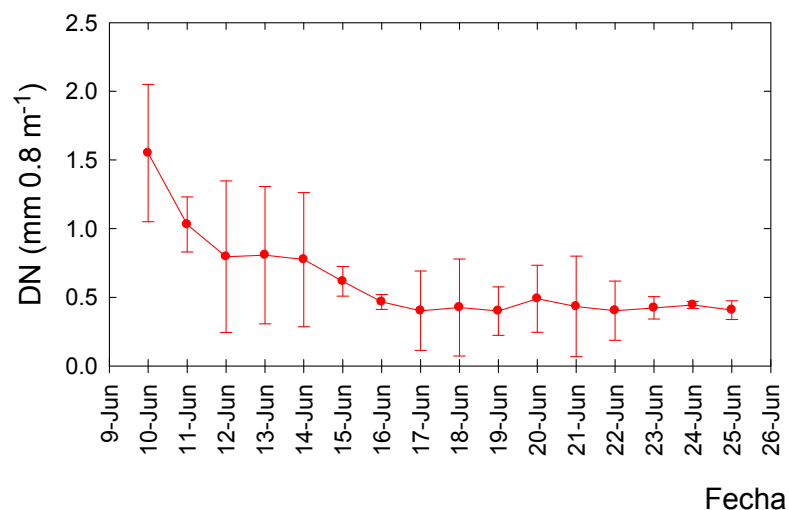


Figura 6. 18. Disminución nocturna del contenido de agua en el suelo (DN) en el tratamiento de estrés rápido (●). Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM.

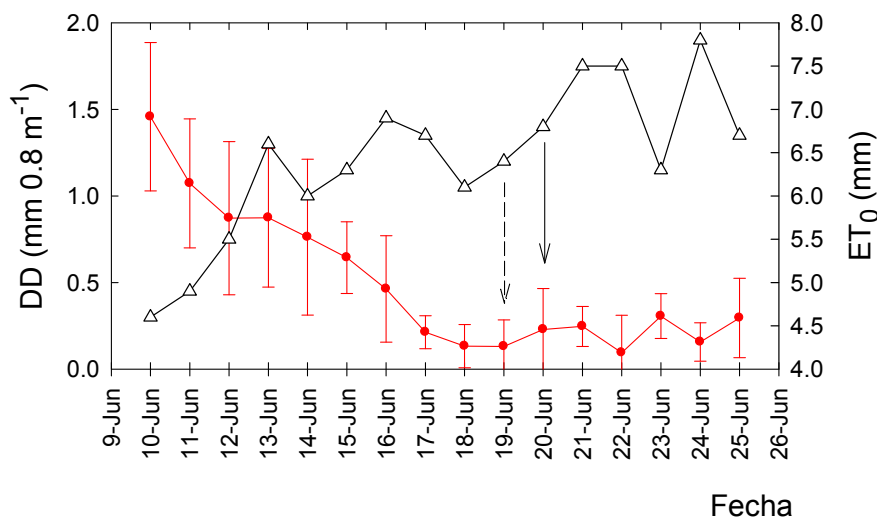


Figura 6. 19. Disminución diaria del contenido de agua en el suelo (DD) en el tratamiento de estrés rápido (●) y ET_0 diaria (Δ). Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM. Las flechas muestran la *indicación* (discontinua) y *confirmación* (continua) de la situación de estrés hídrico.

Hay que destacar que la fecha de inicio de estrés señalada por los índices DD (Figura 6. 19) y DTD ocurrió 2 días más tarde que la señalada por el *punto de inflexión* (Figura 6. 15) y por la disminución significativa de Ψ_{tallo} (Figura 6. 17).

Para el tratamiento de estrés progresivo, los valores del índice de *disminución máxima diaria* (DMD) fueron menores, aunque sin diferencias significativas, que los correspondientes en el tratamiento control desde el

inicio del periodo de estrés y con riego al 80, 60 y 40% de la ET_c (Figura 6. 20). En el tratamiento control los valores de DMD variaron ligeramente, con aumentos que coinciden con días de alta demanda evaporativa, tal y como reflejan los valores de déficit de presión de vapor (DPV).

Al inicio del periodo de riego al 20% de la ET_c (25 junio) se produce una rápida disminución de DMD en el tratamiento de estrés progresivo, alcanzando valores casi nulos al inicio de la supresión total del riego (Figura 6. 20).

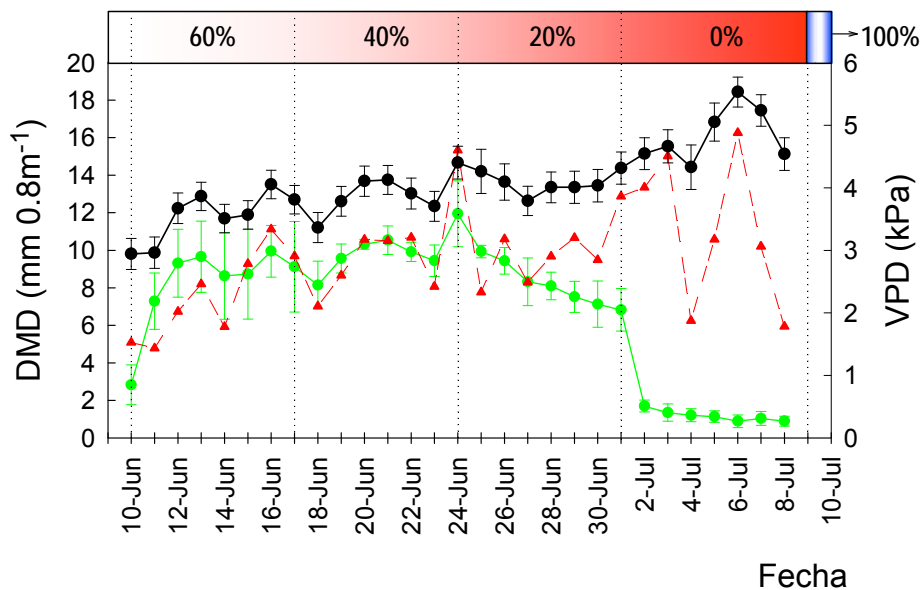


Figura 6. 20. Disminución máxima diaria del contenido de agua en el suelo (DMD) en el tratamiento control (●) y de estrés progresivo (●) y déficit de presión de vapor (DPV) máximo diario (▲). Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM.

Los índices propuestos para el estrés rápido (DD y DTD), con un proceso de dos etapas: *indicación* y *confirmación*, así como el DMD en el estrés progresivo, implican un cierto grado de subjetividad. La determinación del *punto de inflexión* no se ve afectada por drenaje, como es el caso de los índices anteriores. No obstante, aunque el *punto de inflexión* necesita un periodo de secado largo para poder identificar la fase de disminución lenta (Thompson *et al.*, 2007), su sencillez y capacidad para detectar estrés en la planta (disminución del Ψ_{tailo}), antes que la indicada por los índices DD y DTD, durante las etapas iniciales de disminución del conte-

nido de agua en el suelo, lo convierten en un indicador útil para identificar el inicio de estrés.

Las reducciones del agua disponible en el suelo están asociadas con el desarrollo del estrés hídrico en la planta. El desafío consiste en desarrollar procedimientos que permitan identificar con precisión cuándo comienza el estrés hídrico en la planta. Los resultados del ensayo demuestran la validez de las medidas en continuo del contenido de agua en el suelo con sondas de capacitancia, que permiten el acceso a los datos en tiempo real y definir el límite inferior al cual se inicia el estrés en la planta. Todo ello facilita la gestión automática del riego en melocotonero.

En las condiciones experimentales ensayadas, se sugiere que el contenido de agua en el suelo se mantenga en niveles superiores a $210 \text{ mm } 0.8 \text{ m}^{-1}$ (correspondiente a una humedad volumétrica media de $0.26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Esto se traduce en un valor de umbral del 10% de la capacidad de campo, que se propone como límite inferior para activar la programación de riego automático.

Hay que destacar que este límite se establece para el período de postcosecha, que coincide con un período no crítico al déficit hídrico (Chalmers *et al.*, 1981; Li *et al.*, 1989b).

6.3.2 Crecimiento vegetativo

Dinámica radical

El conocimiento de la fenología del cultivo es muy importante tanto para el manejo del cultivo (ajuste de las necesidades de agua, fertilizantes y agroquímicos) como para la determinación de los períodos críticos al déficit de riego (Torrecillas *et al.*, 2000). La delimitación de las fases de crecimiento vegetativo y del fruto, permite establecer la competencia entre el crecimiento de la parte aérea y de las raíces ante situaciones de déficit hídrico (Chalmers, 1989).

Para ello se abordó el estudio de la dinámica del sistema radical de melocotoneros sometidos a distintas condiciones de riego durante 2007

en el tratamiento control (T1), riego deficitario sostenido (T2) y riego parcial de raíces (T3), utilizando minirrizotrones y determinando la densidad de longitud de raíces (DLR, cm de raíz por cm³ de suelo), según metodología indicada en el apartado 6.2.3.1.

De forma preliminar se ha de destacar que la variabilidad es una característica intrínseca de los estudios del sistema radical, donde el problema del tamaño de la muestra en relación a la varianza esperada y la realmente observada es muy importante (Tardieu, 1988a, b; Logsdon y Allmaras, 1991). Obviamente, si los niveles de probabilidad estadística son altos, el número de medidas (repeticiones o minirrizotrones) requeridos aumenta y viceversa. En las condiciones experimentales ensayadas, los coeficientes de variación de la DLR de melocotonero, calculados sobre la base de tres repeticiones, para los 3 tratamientos de riego, 7 profundidades y 26 fechas de medida variaron entre el 12 y el 150 %.

La representación gráfica de las frecuencias relativas de los coeficientes de variación (Figura 6. 21) muestra que el mayor porcentaje de las observaciones (30%) tienen un coeficiente de variación (CV) comprendido entre el 40 y el 50%. Existe un 12% de las observaciones con un CV entre 30 y 40% y el mismo porcentaje entre 50 y 60%. El primer cuartil (Q₂₅) se encuentra en el intervalo comprendido entre el 40 y 50% del CV y el tercer cuartil (Q₇₅) entre el 80 y el 90%.

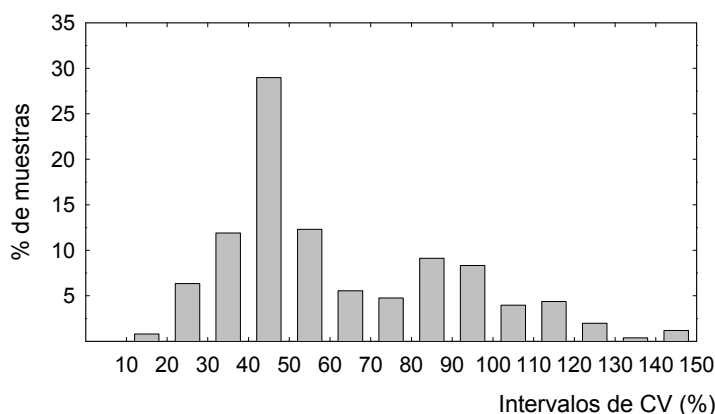


Figura 6. 21. Distribución de las frecuencias relativas de los coeficientes de variación (CV) de DLR durante el periodo experimental.

Una vez analizadas las imágenes con el programa informático empleado (WinRHIZO-Tron®), se ofrecen dos métodos para el cálculo de la densidad de longitud de raíces (DLR): uno basado en la longitud (DLR_L), según la ecuación de Johnson *et al.* (2001), y otro en el número de puntas (DLR_P), según la fórmula propuesta por Upchurch y Ritchie (1983).

Con los datos de crecimiento de raíces en el tratamiento control se realizó un análisis de regresión entre DLR_L y DLR_P (Figura 6. 22), que muestra una alta correlación entre ambos métodos: pendiente cercana a la unidad (0.93) y un coeficiente de correlación (0.98) altamente significativo (Figura 6. 22), con una ligera sobreestimación de DLR_P sobre DLR_L .

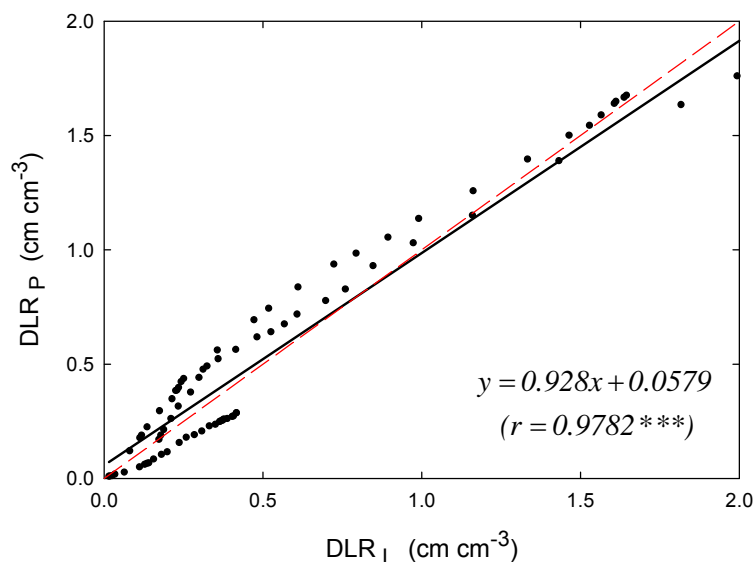


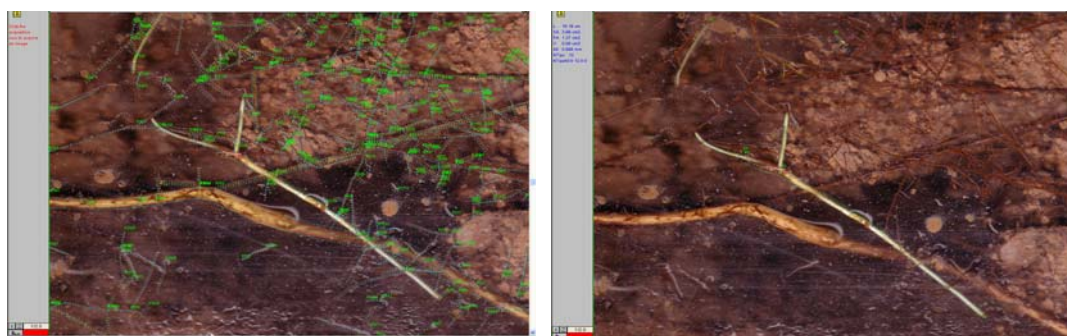
Figura 6. 22. Regresión entre los métodos de cálculo de DLR: número de puntas (DLR_P) y longitud (DLR_L) en el tratamiento control. 2007. La línea discontinua es la relación 1:1.

Si bien parecería más lógico convertir directamente los valores de longitud radical en DLR_L (Johnson *et al.*, 2001), el cálculo de DLR que utiliza el número de puntas (DLR_P) es igualmente válido para estimar DLR, según los resultados obtenidos (Figura 6. 22). Hay que indicar que este último método se basa en el concepto original de la cuadrícula de Newman (Newman, 1966) siendo el empleado en este trabajo.

Los métodos propuestos para el estudio de la dinámica del sistema radical son tediosos e incluyen cuidadosos conteos (Bland y Mesarch,

1990). Por ello, los nuevos programas informáticos pretenden facilitar el engorroso procedimiento de evaluación de la longitud de raíces.

El software empleado (WinRHIZO-Tron®) analiza las imágenes proporcionadas por el escáner circular, en las que previamente se han trazado a mano las raíces, sobre las que se determinan los diferentes parámetros. Con las imágenes del tratamiento control se compararon dos procedimientos de análisis: el primero, basado en la determinación de todas las raíces observadas en la imagen (Fotografía 6. 12 Izda.) y el segundo, donde sólo se evalúan las raíces de nuevo crecimiento, caracterizadas por su distintivo color blanquecino (Fotografía 6. 12 Dcha.).



Fotografía 6. 12. Análisis de la imagen con el software WinRHIZO-Tron®, evaluando el total de raíces (Izda.) y sólo las raíces de nuevo crecimiento (Dcha.).

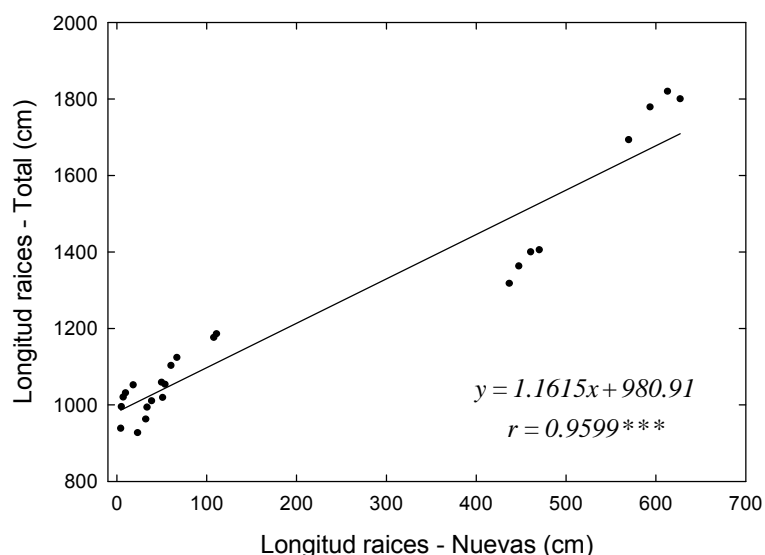


Figura 6. 23. Regresión entre los procedimientos de evaluación de la longitud radical: total de raíces y raíces nuevas. Los datos corresponden al tratamiento control. 2007.

La comparación de los dos procedimientos de análisis mostró una buena correlación, con una pendiente cercana a la unidad (1.16) y un significativo coeficiente de correlación (0.92) (Figura 6. 23). Los resultados obtenidos avalan que el uso del método simplificado de evaluación de raíces nuevas es más práctico, permitiendo obtener los parámetros de la dinámica radical del melocotonero de una forma más rápida.

Dado que en el tratamiento de riego parcial de raíces (T3) se produce una alternancia del riego entre la parte izquierda y derecha del árbol, es del máximo interés determinar si esa alternancia provoca diferencias en la dinámica de crecimiento radical de un lado respecto al otro. Para ello, en la Figura 6. 24 se muestran los datos correspondientes a la DLR y la tasa de crecimiento de la DLR en el tratamiento T3.

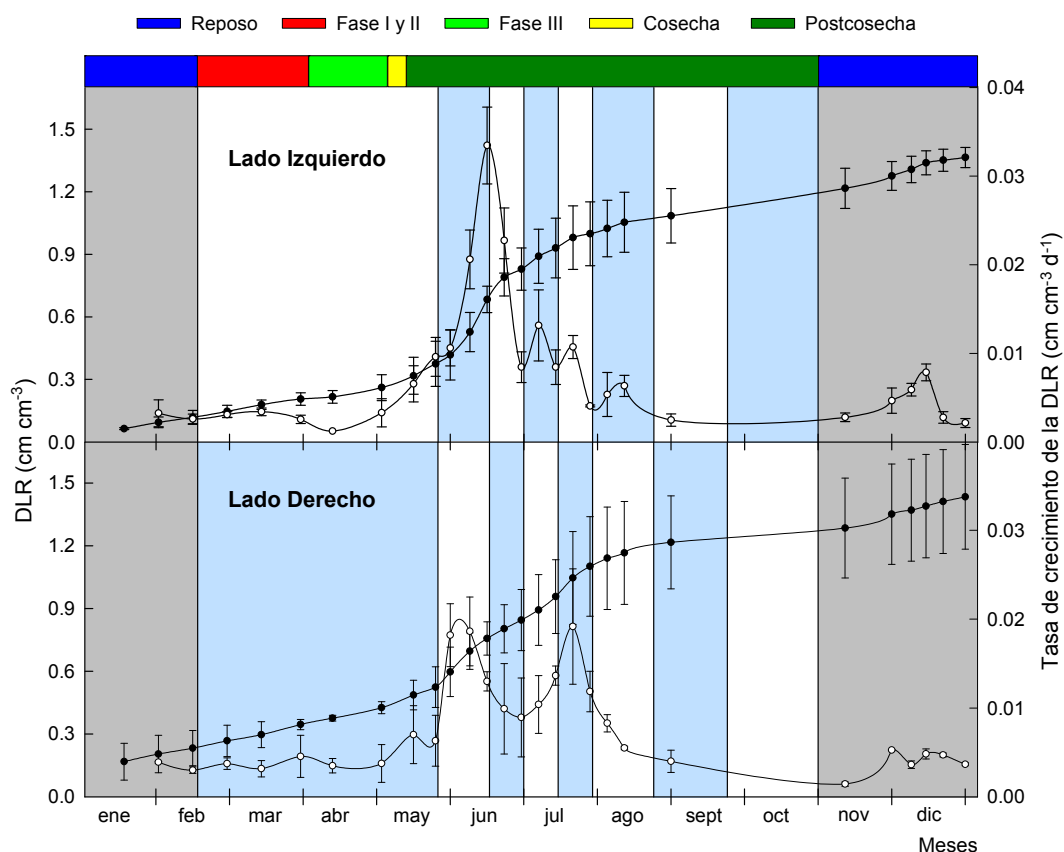


Figura 6. 24. Evolución de la DLR (●) y de la velocidad de crecimiento de la DLR (○) en el tratamiento de riego parcial de raíces: lado izquierdo (arriba) y lado derecho (abajo) durante el 2007. Las bandas verticales azules indican riego y las blancas no riego. Los valores son media de 3 repeticiones. Las bandas verticales grises son los periodos sin riego. Las barras en los puntos son \pm EEM.

6. Respuesta agronómica y fisiológica al riego deficitario

El análisis de la varianza (ANOVA), realizado de forma separada para cada periodo de riego y no riego, indicó la ausencia de diferencias estadísticamente significativas en el crecimiento de raíces entre ambos lados. Igualmente, el ANOVA de medidas repetidas, realizado con todos los datos, tanto de DLR como de la tasa de crecimiento de la DLR, indicó que la alternancia de riego no produce un efecto significativo en la dinámica de crecimiento de raíces de melocotonero.

En la Figura 6. 25 se muestra los resultados correspondientes a los tres tratamientos de riego: control (T1), riego deficitario sostenido (T2) y de riego parcial de raíces (T3), expresado este último como promedio de la parte derecha e izquierda.

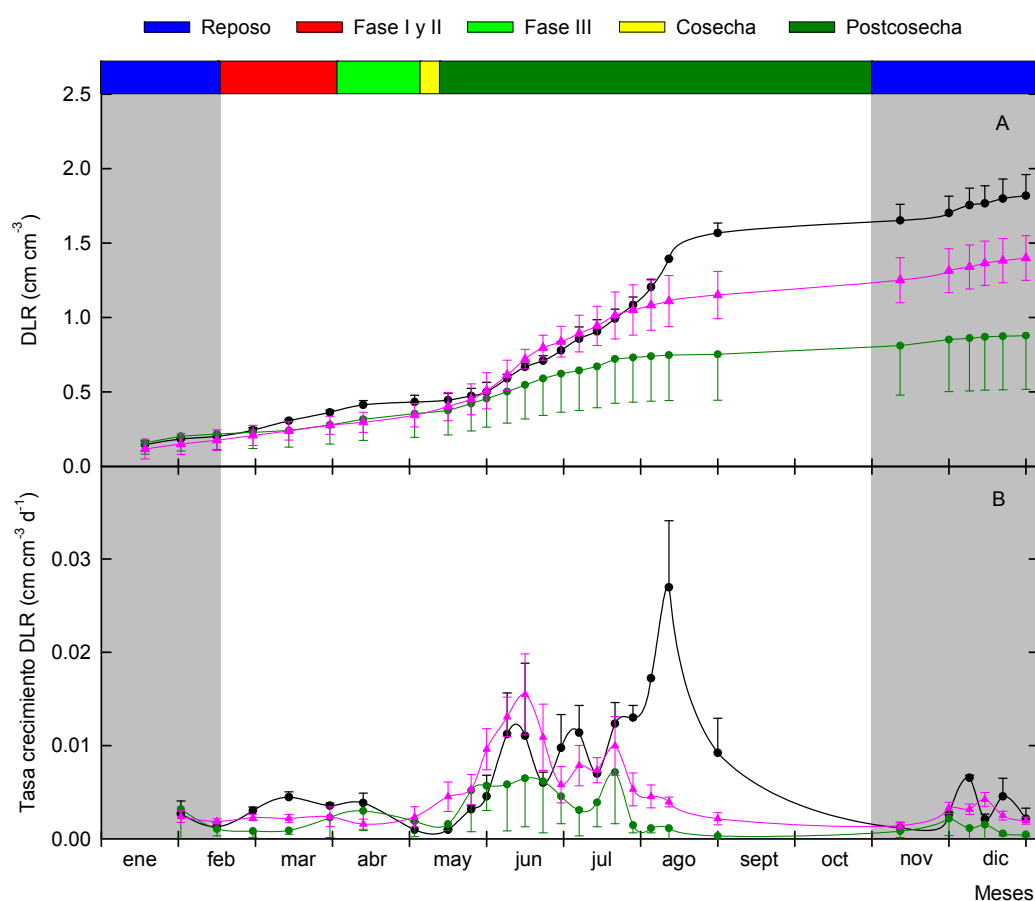


Figura 6. 25. Evolución de la densidad de longitud de raíces (DLR) (A) y tasa de crecimiento diario de la DLR (B) en los tratamientos de riego T1 (●), T2 (●) y T3 (▲) durante el 2007. Los valores son media de 3 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM. Las bandas verticales grises son los periodos sin riego.

Coincidiendo con la época de menor demanda evapotranspirativa (enero a mayo), se observan valores muy similares de DLR entre los tres tratamientos de riego, aunque ligeramente superiores en el tratamiento control (Figura 6. 25 A). A principios de junio se observa un aumento importante de la DLR, y es a partir de este momento cuando las diferencias entre tratamientos comienzan a hacerse más notables, mostrando el tratamiento control los valores más altos de DLR y los menores en el tratamiento de riego deficitario sostenido (T2).

El tratamiento de RPR muestra unos valores de DLR similares a los del tratamiento control hasta el mes de agosto, separándose a partir de esa fecha y quedando en valores intermedios entre el tratamiento T1 y T2 hasta el final del año (Figura 6. 25 A).

De forma global la disminución en el crecimiento de las raíces con respecto al tratamiento control fue mayor en el tratamiento de riego deficitario sostenido (52%) que en el de riego parcial de raíces (23%)

La tasa de crecimiento de la DLR (Figura 6. 25 B) mostró unos valores bajos y similares entre tratamientos desde enero a finales de mayo. En junio, tras la recolección, se produce un máximo anual de crecimiento de la DLR, con valores en torno a $0.015 \text{ cm cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$, en los tratamientos control y RPR, mostrando el tratamiento T2 los valores más bajos. A finales del mes de julio se observa otro máximo en la tasa de crecimiento de la DLR en los tratamientos deficitarios T2 y T3. Sólo el tratamiento sin limitación hídrica (control) muestra de nuevo un incremento en este valor en agosto, que se corresponde con el máximo anual observado ($\approx 0.027 \text{ cm cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$) (Figura 6. 25 B).

Cabe destacar que en el periodo posterior a la fecha en que se realizó el aclareo de los árboles (principios de marzo), se produce un leve aumento de la tasa de crecimiento de la DLR en el tratamiento control, aunque sin diferencias significativas. Otro ligero aumento se observa a finales de año, coincidiendo con las labores de poda (Figura 6. 25 B).

Ampliando la imagen de la DLR durante los primeros meses y haciéndola coincidir con el crecimiento del fruto, se puede observar cómo

la tasa de crecimiento de las raíces se ralentiza durante la etapa de máximo crecimiento de los frutos (Figura 6. 26).

Se puede concluir que los frutos actúan como fuertes sumideros de los fotoasimilados, provocando un patrón claramente alternante entre el crecimiento de la parte aérea y el de las raíces, de forma similar a lo observado en almendro (Ross y Catlin, 1978), albaricoquero (Pérez-Pastor *et al.*, 2004) o cítricos (Bevington y Castel, 1985).

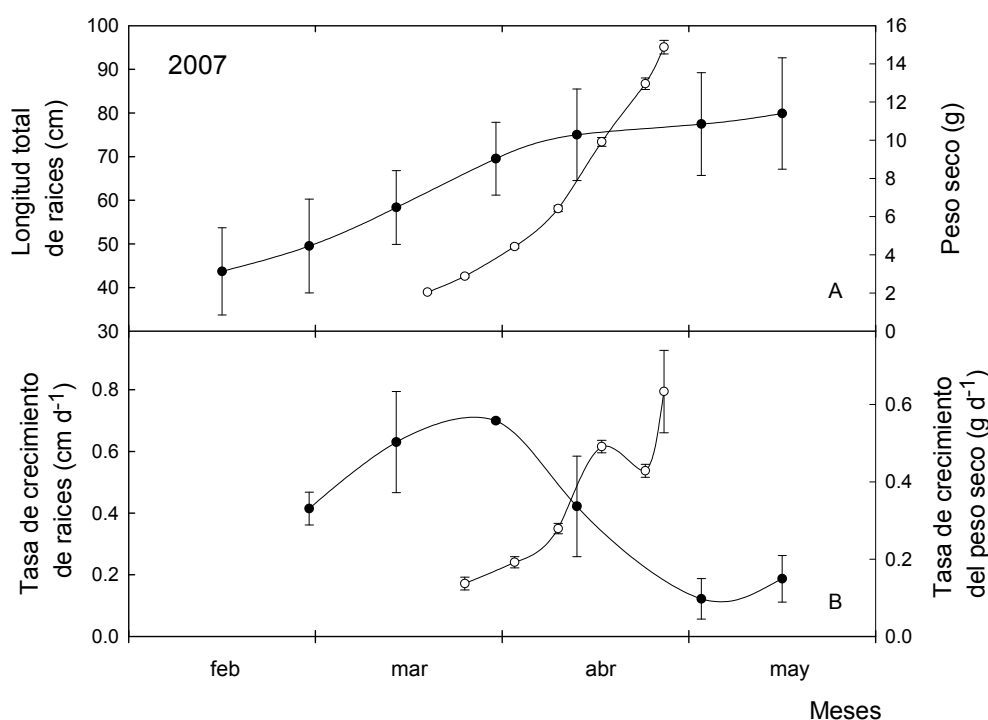


Figura 6. 26. Crecimiento en longitud de raíces (●) y en peso seco del fruto (○) (A) y tasa de crecimiento de la longitud de raíces (●) y del peso seco (○) (B) en el tratamiento control durante 2007. Los valores son media 3 (en raíces) y 4 (en frutos) repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM.

Distribución radical

Como complemento al estudio de dinámica radical y con el objetivo de determinar el volumen de suelo explorado por las raíces de melocotonero bajo diferentes condiciones de riego, se tomaron muestras de suelo, siguiendo la malla indicada en la Figura 6. 3, en los tratamientos de riego control (T1), riego deficitario sostenido, RDS (T2) y riego automático (Ta),

en las que se determinó la longitud total de raíces (expresada como DLR) y la humedad volumétrica, determinada por gravimetría.

En la Figura 6. 27 se representan los resultados obtenidos en mapas de isolíneas de humedad del suelo y de isorrizas (isolíneas de DLR, considerando todos los diámetros de raíz), obtenidas por krigeado, en los 3 tratamientos de riego.

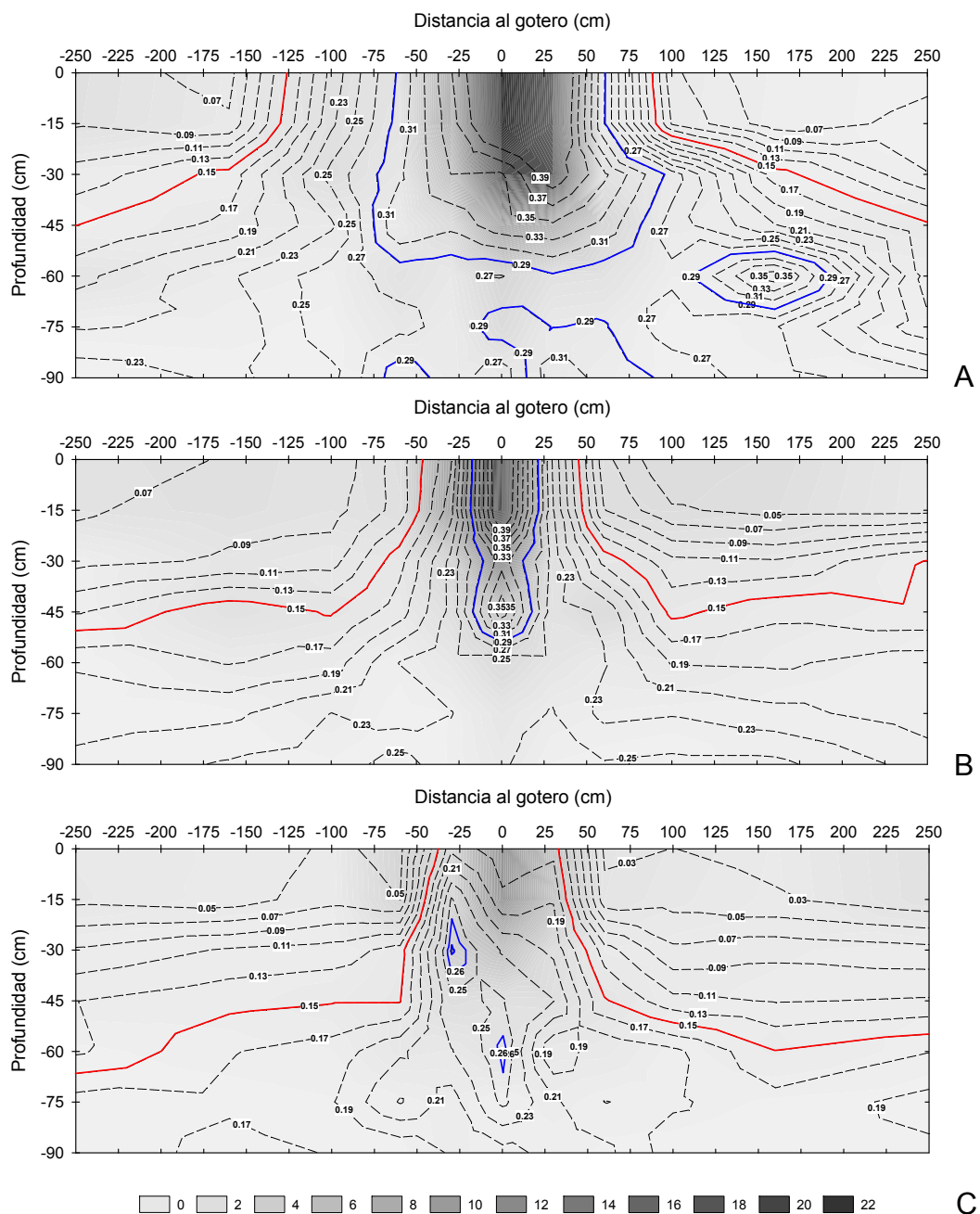


Figura 6. 27. Mapa de isolíneas de humedad volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) (trazo discontinuo negro) e isorrizas de DLR (cm cm^{-3}) (gradiente de grises) en los tratamientos T1 (A), T2 (B) y Ta (C). Las líneas continuas rojas son el punto de marchitez permanente. Las líneas continuas azules son la capacidad de campo. 2007. Los valores son media de 2 repeticiones.

En general, en todos los tratamientos se observan valores altos de DLR en zonas cercanas al punto de emisión, donde los valores de humedad son así mismo altos, con una disminución significativa de la densidad radical conforme aumenta la distancia al emisor, tanto en superficie como en profundidad (Figura 6. 27).

En el tratamiento control se observa una disminución significativa de la DLR en el punto de emisión del gotero, hasta 60 cm de profundidad. A 30 cm del emisor la disminución deja de ser significativa a 45 cm de profundidad, mientras que a partir de los 60 cm del emisor no existen diferencias significativas, según indican los resultados del análisis de la varianza (datos no mostrados). De los datos de la Figura 6. 27 A, se deduce para el tratamiento control una banda húmeda de 3.5 m, a 30 cm de profundidad. El 97% de las raíces se encuentra dentro de este volumen de suelo, y la mayoría de ellas (74%) se concentra en un volumen donde la humedad está en torno a valores de capacidad de campo, no superándose los 60 cm de profundidad y unos límites laterales de 60 cm desde el emisor.

En el tratamiento T2, el gradiente de disminución de la DLR tampoco supera los 60 cm de distancia al emisor, sin embargo las raíces alcanzan los 75 y 60 cm de profundidad en el punto de goteo y a 30 cm del mismo, respectivamente. Se observa una mayor profundización radical, con respecto al tratamiento control, debido al menor volumen de agua aplicado, que obliga a la planta a movilizar su sistema radical en sentido vertical (Ruggiero y Andiloro, 1984).

En el caso del tratamiento de riego automático (Ta) se observa un comportamiento opuesto al T2, con un mayor alcance de las raíces en sentido horizontal que en profundidad. El gradiente de disminución significativa desaparece a los 100 cm del emisor, aunque sólo alcanza los 45 cm de profundidad en el punto de gotero.

La banda húmeda a 30 cm de profundidad en los tratamientos T2 y Ta es de 1.4 y 1.1 m, respectivamente con un 74% del sistema radical ubicado en un volumen de suelo por encima del punto de marchitez

(Figura 6. 27 B y C). No obstante, la mayoría de las raíces en ambos tratamientos (57%) se concentra en el volumen de suelo con humedad superior o igual a capacidad de campo, que no supera los 45 cm de profundidad y abarca hasta 30 cm a uno y otro lado del emisor, con un porcentaje medio en la periferia inferior al 5%.

Para estudiar la influencia del diámetro de las raíces en la distribución de las mismas se realizó el correspondiente análisis de la varianza con los datos de DLR separados en 3 categorías: ≤ 0.5 mm (Tabla 6. 5), 0.5-2 mm (Tabla 6. 6) y >2 mm, para cada tratamiento y tomando como factores principales la profundidad y la distancia al emisor.

De los resultados cabe concluir que sólo las raíces de diámetro inferior a 2 mm se distribuyen de forma estadísticamente diferente en el volumen del suelo. Las de diámetro > 2 mm además de suponer sólo el 1, 1.5 y 1% de la totalidad (para los tratamientos T1, T2 y Ta, respectivamente), tienen una distribución uniforme en el volumen de suelo (datos no mostrados).

Las raíces de diámetro inferior a 0.5 mm (raíces finas) suponen el 81% frente al 19% de las de grosor medio (entre 0.5 y 2 mm) en el tratamiento control. Para los tratamientos T2 y Ta las raíces finas representan el 76%, frente al 24% de las raíces de grosor medio.

Las raíces finas son, por estas razones, las que más inciden en la distribución del sistema radical en todos los tratamientos (Pérez-Pastor, 2001; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2005), teniendo los mismos umbrales de significación estadística las raíces de diámetro inferior a 0.5 mm (Tabla 6. 5) que cuando se analizan de forma global todos los diámetros (datos no mostrados).

Las raíces de diámetro medio se distribuyen en un volumen de suelo menor, situándose los umbrales significación estadística en torno a 60 cm del emisor y más superficiales en sentido vertical (45 cm para los tratamientos T1 y T2 y apenas 30 cm de profundidad para el tratamiento de riego automático) (Tabla 6. 6).

6. Respuesta agronómica y fisiológica al riego deficitario

Tabla 6. 5. Densidad de longitud de raíces (DLR, cm cm⁻³) de diámetro ≤ 0.5 mm en el perfil 0-90 cm, a 0, 30, 60, 100, 160 y 250 cm del emisor en los tratamientos T1, T2 y Ta.

T1		Distancia al emisor (cm)					
Prof. (cm)	0	30	60	100	160	250	
0-15	17.23 cE	8.90 bB	0.96 a	0.94 a	0.45 a	0.63 a	
15-30	14.43 cD	9.04 bB	1.26 a	1.31 a	0.28 a	0.22 a	
30-45	7.38 bC	1.25 aA	1.61 a	0.63 a	0.56 a	0.51 a	
45-60	2.83 bB	1.25 abA	1.44 ab	0.33 a	0.45 a	0.66 a	
60-75	2.32 bAB	0.75 abA	0.82 ab	0.05 a	0.25 a	0.17 a	
75-90	0.86 A	0.71 A	0.29 NS	0.07 NS	0.11 NS	0.12 nsNS	
T2							
0-15	12.40 cE	5.04 bD	1.46 aC	1.24 aB	1.49 aC	0.96 a	
15-30	8.97 dD	2.26 cC	1.02 bBC	0.89 abB	0.95 bBC	0.25 a	
30-45	4.17 cC	1.61 bBC	1.35 bC	1.00 bB	1.00 bBC	0.28 a	
45-60	2.18 cB	1.00 bB	0.45 abAB	0.67 abAB	0.49 abAB	0.13 a	
60-75	1.06 bA	0.32 abA	0.16 aA	0.32 abA	0.18 aA	0.13 a	
75-90	0.74 A	0.17 A	0.04 A	0.07 A	0.17 A	0.02 nsNS	
Ta							
0-15	7.38 dD	2.89 cC	1.57 bC	0.57 aA	0.47 a	0.94 a	
15-30	4.49 cC	2.14 bB	0.71 aAB	0.40 aA	0.36 a	0.50 a	
30-45	1.69 cB	1.73 cB	1.03 bcBC	0.50 abA	0.41 a	0.36 a	
45-60	1.43 cB	0.81 bcA	0.83 bcB	0.27 abA	0.37 ab	0.19 a	
60-75	0.15 A	0.42 A	0.24 A	0.18 A	0.08	0.05 ns	
75-90	0.16 A	0.25 A	0.15 A	0.12 A	0.06 NS	0.08 nsNS	

Los valores son media de 4 repeticiones. Letras distintas indican la existencia de diferencias significativas según el test de la MDS_{0,05}, considerando separadamente la distancia al emisor (minúsculas) y la profundidad (mayúsculas). ns: no significativo.

Tabla 6. 6. Densidad de longitud de raíces (DLR, cm cm^{-3}) de diámetro $0.5 < d \leq 2 \text{ mm}$ en el perfil 0-90 cm, a 0, 30, 60, 100, 160 y 250 cm del emisor en los tratamientos T1, T2 y Ta.

T1		Distancia al emisor (cm)					
Prof. (cm)	0	30	60	100	160	250	
0-15	4.66 cB	2.37 bB	0.19 a	0.33 a	0.18 a	0.30 a	
15-30	3.67 bB	2.28 bB	0.19 a	0.14 a	0.06 a	0.11 a	
30-45	0.86 aA	0.11 aA	0.23 a	0.08 a	0.09 a	0.13 a	
45-60	0.24 A	0.11 A	0.20	0.04	0.05	0.24 ns	
60-75	0.14 A	0.04 A	0.11	0.01	0.03	0.02 ns	
75-90	0.08 A	0.07 A	0.06 NS	0.01 NS	0.01 NS	0.02 nsNS	
T2							
0-15	5.53 cC	1.02 bB	0.57 ab	0.64 bB	0.48 ab	0.32 a	
15-30	2.71 bB	0.22 aA	0.16 a	0.20 aA	0.25 a	0.09 a	
30-45	0.42 aA	0.22 aA	0.27 a	0.14 aA	0.22 a	0.06 a	
45-60	0.31 A	0.18 A	0.07	0.12 A	0.14	0.03 ns	
60-75	0.16 A	0.05 A	0.05	0.08 A	0.03	0.03 ns	
75-90	0.14 A	0.02 A	0.01 NS	0.03 A	0.02 NS	0.009 nsNS	
Ta							
0-15	2.64 cB	0.88 bB	0.68 abB	0.27 a	0.24 a	0.46 ab	
15-30	0.64 A	0.60 AB	0.15 AB	0.12	0.14	0.10 ns	
30-45	0.16 A	0.24 A	0.19 AB	0.18	0.11	0.12 ns	
45-60	0.17 A	0.12 A	0.14 AB	0.07	0.10	0.03 ns	
60-75	0.02 A	0.09 A	0.04 A	0.05	0.04	0.01 ns	
75-90	0.06 A	0.11 A	0.06 A	0.05 NS	0.01 NS	0.01 nsNS	

Los valores son media de 4 repeticiones. Letras distintas indican la existencia de diferencias significativas según el test de la $MDS_{0.05}$, considerando separadamente la distancia al emisor (minúsculas) y la profundidad (mayúsculas). ns: no significativo.

Ramos y tronco

La evolución del crecimiento de los ramos fue similar en los 3 años de estudio, la correspondiente a 2009 se muestra en la Figura 6. 28. De manera global el crecimiento de los ramos sigue un comportamiento sigmoïdal, con un periodo de lento crecimiento, que coincide con la recolección y donde la mayor parte del crecimiento ocurre durante el periodo de postcosecha (desde mayo a finales de septiembre).

Policarpo *et al.* (2002) encuentran resultados similares en la misma variedad, mientras que Girona *et al.* (2003), para una variedad tardía, indican que el crecimiento activo de los ramos ocurre entre los meses de mayo y junio, antes de la recolección.

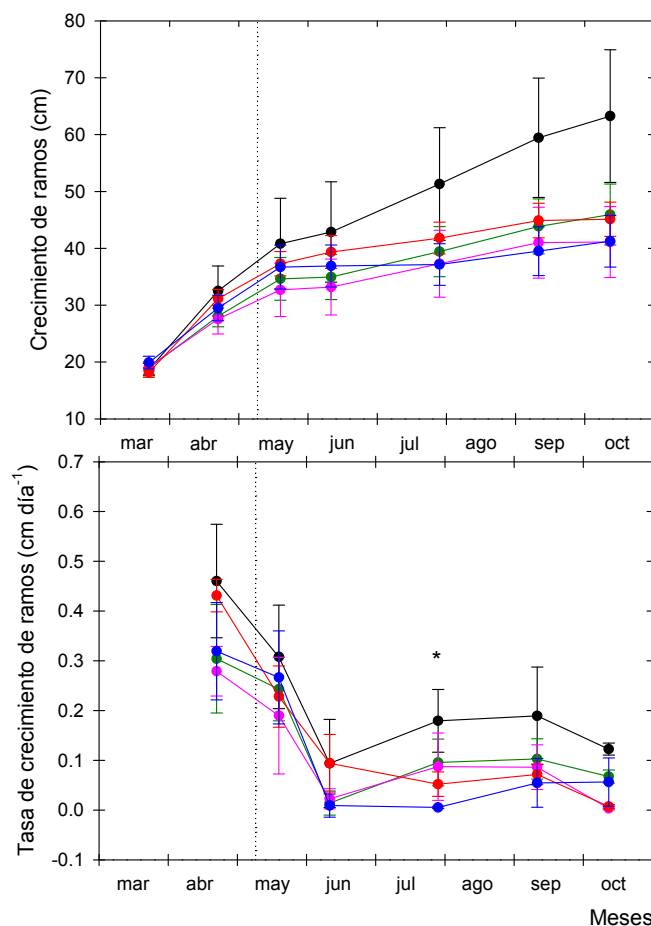


Figura 6. 28. Crecimiento en longitud de ramos (A) y velocidad de crecimiento diaria (B) de melocotonero Flordastar en los tratamientos T1 (●), T2 (◐), T3 (◑), T4 (◒) y Ta (◓). Los valores son media de 16 ramos. Las barras en los puntos son \pm EEM. El asterisco indica la existencia de diferencias significativas ($P < 0.05$).

Aunque se observa un crecimiento mayor en el tratamiento control ($\Delta=45$ cm) respecto al resto de tratamientos ($\Delta_{\text{medio}}=24$ cm), el análisis de la varianza no mostró diferencias significativas entre los tratamientos de riego en ninguna de las fechas de medida.

La velocidad de crecimiento de los ramos disminuye de forma rápida desde el inicio de la estación debido a la competencia de los frutos por los fotoasimilados. Es a partir de junio cuando la velocidad de crecimiento aumenta ligeramente, estabilizándose en agosto con un ligero descenso en septiembre, cuando los ramos de los árboles de los tratamientos T4 y Ta presentan los valores más bajos, siendo significativa para éste último con respecto al tratamiento control, a finales de julio (Figura 6. 28).

El estudio de la influencia del tratamiento de riego en el crecimiento en diámetro del tronco se realizó mediante el análisis de la varianza de medidas repetidas de todos los datos disponibles de la parcela experimental desde el inicio del riego diferencial (2004). Los resultados mostraron un efecto altamente significativo ($P < 0.0001$) del año, el tratamiento de riego y la interacción de ambos factores.

De forma global los árboles del tratamiento control muestran un crecimiento medio anual significativamente mayor que el resto de los tratamientos a partir de 2006 (Figura 6. 29), por lo que se requiere un periodo de, al menos, dos años para afectar de forma significativa el desarrollo vegetativo del árbol.

Todos los tratamientos deficitarios siguen una evolución paralela, con ligeras diferencias entre ellos (Figura 6. 29). Cabe destacar el comportamiento del tratamiento de riego automático a partir de 2007, cuando pasa a tener una velocidad media de crecimiento anual similar a la del tratamiento control (≈ 1.7 cm año⁻¹), respecto a los 0.7 cm año⁻¹ de los años anteriores, aunque el tamaño de los árboles sigue siendo menor que el de los del tratamiento control (Figura 6. 29).

6. Respuesta agronómica y fisiológica al riego deficitario

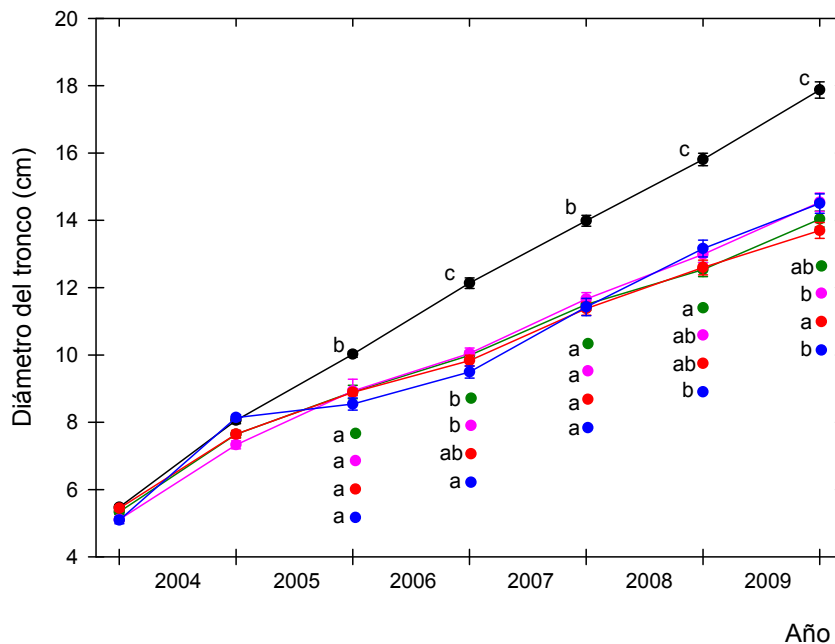


Figura 6. 29. Evolución anual del diámetro del tronco de los árboles en los tratamientos T1 (●), T2 (●), T3 (●), T4 (●) y Ta (●). Los valores son la media de 20 árboles. Las letras distintas indican diferencias significativas según el test de la $MDS_{0.05}$, para cada año.

En 2008 se realizó una medida del diámetro de los troncos después de la cosecha (junio), lo que permitió determinar que el crecimiento del tronco sucede de forma más importante durante el periodo postcosecha, tal y como indican los resultados de la Tabla 6. 7, donde se observan un crecimiento similar en todos los tratamientos de riego durante la primera mitad del año (desde el reposo a la cosecha), ocurriendo las mayores velocidades de crecimiento durante la segunda parte del año (postcosecha), momento en el que se observan diferencias entre los tratamientos (Tabla 6. 7).

Sin embargo hay que destacar que sucede lo contrario en el tratamiento de riego deficitario controlado (T4), debido a que durante el periodo de postcosecha los árboles estaban sometidos a un déficit hídrico severo (riego al 25% de la ET_C), la ET_C mientras que durante la fase III de crecimiento del fruto el riego al 100% de la ET_C iguala el crecimiento del tronco con respecto al de postcosecha (Tabla 6. 7).

Tabla 6. 7. Incremento del diámetro del tronco (cm) y porcentaje respecto del total anual en los tratamientos de riego de melocotonero Flordastar durante 2008.

Periodo	T1		T2		T3		T4		Ta	
	cm	%	cm	%	cm	%	cm	%	cm	%
Reposo – Cosecha	0.5	30	0.4	36	0.4	33	0.7	56	0.4	26
Postcosecha	1.3	70	0.7	64	0.9	67	0.5	44	1.3	74

Tamaño de la copa

Para la determinación del volumen de la copa se han empleado dos métodos, el de Hutchison (1977) y el de Westwood (1988) (apartado 6.2.3.4); la comparación de los dos procedimientos mostró una buena correlación ($r=0.9994^{***}$), por lo que en la Tabla 6. 8 se muestra el promedio de ambos métodos durante los años de ensayo en los distintos tratamientos de riego. Además, el tamaño de la copa se evaluó mediante la determinación de la superficie sombreada por el árbol (a mediodía solar, en verano) (Tabla 6. 8).

Los resultados indican un crecimiento de los árboles, siendo mayor de 2007 a 2008 que entre los dos últimos años, debido a la poda severa practicada en la parcela en otoño de 2006, que se comentará en el apartado siguiente (Figura 6. 26).

De manera general se observa que el tratamiento control presenta tamaños de copa significativamente mayores que el resto de los tratamientos, sin embargo, en 2009 la superficie sombreada fue similar a la del T2 y Ta, mientras que los tratamientos deficitarios no difieren entre sí (Tabla 6. 8).

Si bien ambos parámetros de determinación del tamaño de la copa (volumen y superficie sombreada) muestran una alta correlación lineal ($r=0.9756^{***}$) (datos no mostrados), la determinación mediante el volumen detecta mejor las posibles diferencias entre tratamientos (Tabla 6. 8). De esta forma, el volumen de los árboles del tratamiento de riego T2 y T4 fue significativamente menor en 2008, aunque experimentaron un aumento significativo en 2009 que iguala que al de los árboles de los tratamientos T3 y Ta (Tabla 6. 8).

Tabla 6. 8. Volumen de copa (m^3) y superficie sombreada (m^2) de melocotonero Flordastar en los distintos tratamientos de riego durante el periodo experimental.

	Año	T1	T2	T3	T4	Ta	Media
Volumen de copa (m^3)	2007	30.55 bA	20.65 aA	19.57 aA	18.86 aA	18.04 aA	21.53 A
	2008	57.21 cC	37.24 aB	43.86 bB	37.60 aB	46.50 bB	44.48 B
	2009	52.28 cB	44.36 abC	43.07 aB	41.08 aC	47.04 bB	45.57 B
	Media	46.68 d	34.08 ab	35.50 bc	32.52 a	37.20 c	
Superficie Sombreada (m^2)	2007	13.80 bA	10.42 aA	10.64 aA	9.58 aA	9.29 aA	10.75 A
	2008	19.61 bB	14.11 aB	15.61 aB	14.51 aB	15.93 aB	15.96 B
	2009	19.62 bB	17.68 abC	15.32 aB	16.37 aB	16.66 abB	17.13 C
	Media	17.68 b	14.07 a	13.86 a	13.48 a	13.96 a	

Los valores son media de 4 repeticiones. Letras distintas indican la existencia de diferencias significativas según el test de la $MDS_{0.05}$, considerando separadamente el tratamiento (minúsculas) y el año (mayúsculas) y cada tipo de media.

Poda

La poda se realizó al final de cada año a fin de conseguir un equilibrio entre desarrollo vegetativo y fructificación (Urbano Terrón, 1999). Los resultados correspondientes a 2006, 2007, 2008 y 2009, expresados como kilos de materia seca por árbol se muestran en la Figura 6. 30.

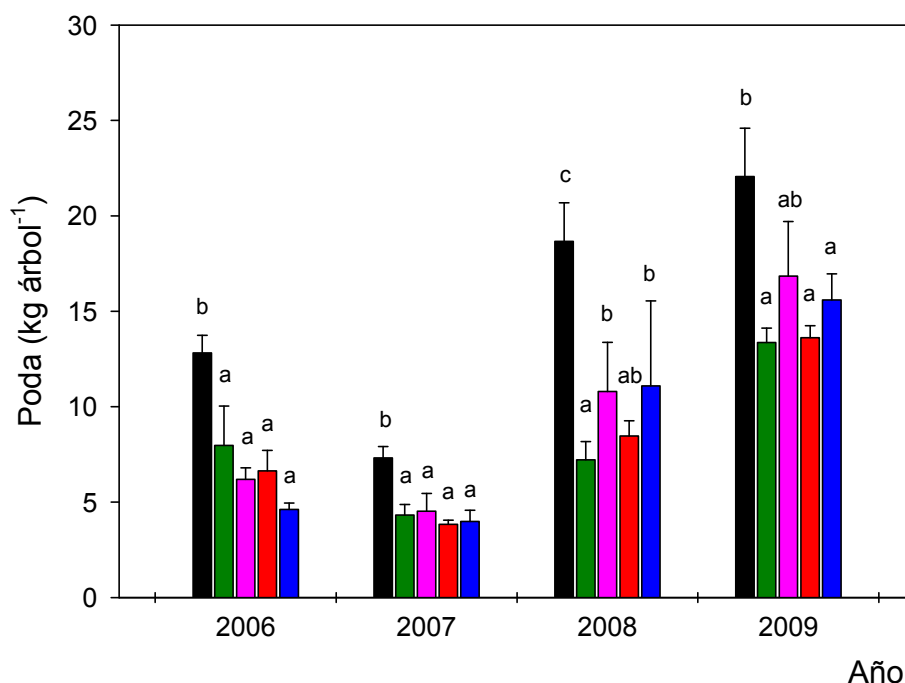


Figura 6. 30. Peso seco de madera de poda ($kg\ árbol^{-1}$) en los tratamientos T1 (■), T2 (■), T3 (■), T4 (■) y Ta (■) en melocotonero Flordastar durante 2006, 2007, 2008 y 2009. Los valores son media de 4 repeticiones. Las barras son \pm EEM. Letras distintas indican diferencias significativas según el test de la $MDS_{0.05}$.

El efecto de los tratamientos de riego fue muy significativo todos los años de ensayo, siendo los árboles del tratamiento control a los que mayor cantidad de madera se eliminó en las labores de poda, el doble y, en algunos casos, el triple que a los de los tratamientos deficitarios, entre los que hay ligeras diferencias. Los valores más bajos de poda correspondieron al tratamiento de riego automático (Ta) en 2006 y de RDC en 2007, mientras que en los dos últimos años fueron los árboles del tratamiento de riego deficitario sostenido (T2) los que mostraron los valores absolutos más bajos (Figura 6. 30). En cualquier caso, los valores más bajos de poda eliminada coinciden con los menores volúmenes de agua aplicada, tal y como se observa en la Figura 6. 31.

Un aumento lineal del peso de madera eliminada con la poda con aumentos del agua de riego aplicada se ha encontrado en frutales (Mitchell y Chalmers, 1982; Mitchell *et al.*, 1989; Pérez-Pastor, 2001; Girona *et al.*, 2003), por lo que los riegos deficitarios suponen una ventaja al llevar asociado una disminución de los costes por mano de obra en las labores culturales de poda.

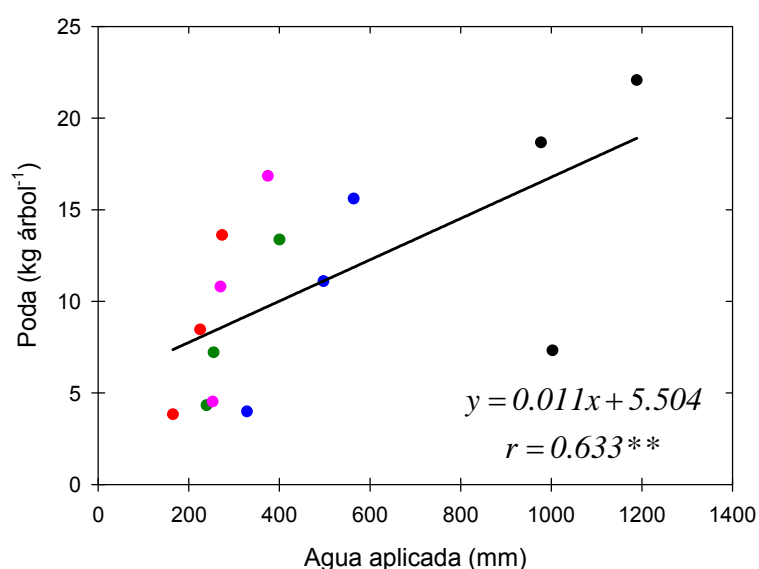


Figura 6. 31. Relación entre el peso de poda y el agua de riego aplicada en melocotonero Flordastar en los tratamientos de riego: T1 (●), T2 (●), T3 (●), T4 (●) y Ta (●) durante el periodo experimental. Cada punto corresponde a la media de cuatro repeticiones.

Es de destacar las diferencias interanuales como consecuencia del crecimiento de los árboles; sin embargo, hay que señalar que la poda realizada en la parcela en otoño de 2006 fue anormalmente alta, lo que condicionó en gran medida el desarrollo vegetativo general (Tabla 6. 8) y la subsiguiente cosecha (Figura 6. 34) en 2007, como se comentará a continuación.

Estos hechos constatan la alta sensibilidad del crecimiento vegetativo al déficit hídrico (Bradford y Hsiao, 1982a; Hsiao, 1973), tal y como ha sido ampliamente documentado en melocotonero sometido a distintas condiciones de riego deficitario (Johnson *et al.*, 1992; Boland *et al.*, 2000; Girona *et al.*, 2003, 2005b).

De manera global, cabe concluir que el déficit hídrico afectó al crecimiento vegetativo del melocotonero Flordastar de forma similar en todos los tratamientos deficitarios, observándose la siguiente progresión: diámetro del tronco > madera de poda \geq tamaño de la copa > crecimiento en longitud de ramos.

6.3.3 Crecimiento reproductivo

Floración y fructificación

La acumulación de grados de crecimiento en escala de días (GDD) o de horas (GDH) es una herramienta muy útil en la planificación de estrategias de riego, especialmente en el caso del riego deficitario controlado, en el que la delimitación de las fases de crecimiento es imprescindible.

La Figura 6. 32 se muestran los GDH acumulados durante las distintas fases de crecimiento del fruto en la parcela de melocotonero Flordastar desde la ruptura de yemas, cuando se habían acumulado 225 unidades frío (UF) (Sherman *et al.*, 1988), hasta la recolección.

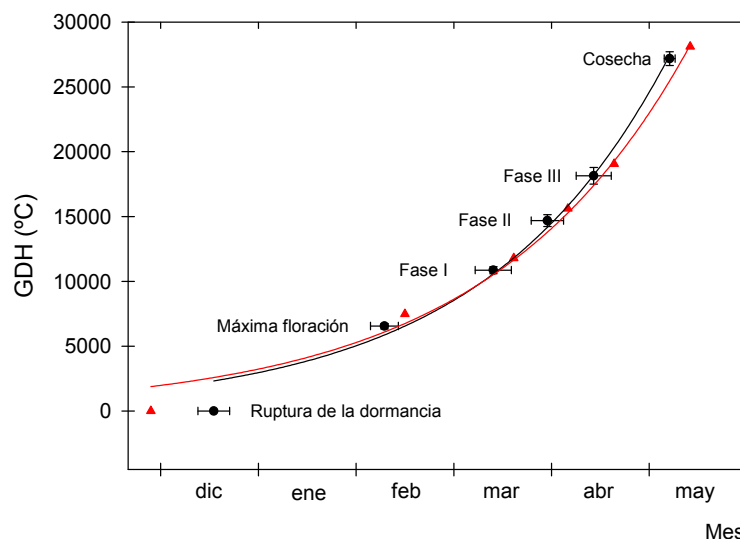


Figura 6. 32 Acumulación de grados de crecimiento hora (GDH) desde la ruptura de la dormancia hasta la recolección del melocotonero Flordastar (●). Cada punto es la media de 7 valores (2003 a 2009). Las barras son \pm EEM. Simulación de la acumulación de GDH durante 2010 (▲).

Esta variedad temprana necesitó aproximadamente 6.500 GDH para llegar a plena floración; la primera fase de rápido crecimiento del fruto (Fase I) comenzó después de acumular unos 10.800 GDH; con 14.700 GDH empezó la fase de endurecimiento del hueso (Fase II), y con 18.100 GDH se inició la fase crítica de segundo rápido crecimiento del fruto (Fase III). En total, las yemas de esta variedad necesitaron unos 27.200 GDH para llegar a ser recolectadas como frutos. Mounzer *et al.* (2008) obtuvieron similares resultados para esta variedad en su estado juvenil (6244 y 27106 GDH acumulados para máxima floración y recolección, respectivamente) en un estudio que comprendía los años 2003 a 2006.

En base al conocimiento de los GDH necesarios para alcanzar cada fase se simuló la evolución para el año 2010 (Figura 6. 32), la cual predijo con una gran exactitud los distintos estados fenológicos en dicho año, permitiendo conocer la fecha aproximada de recolección, facilitando la programación y planificación de la misma.

Los porcentajes de fructificación, evaluados cuatro semanas después de la máxima floración, no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos de riego ensayados, durante el período experimental (da-

tos no mostrados). El último año de ensayo se realizó un estudio de la floración, con evaluación de la fructificación antes y después del aclareo (marzo y abril, respectivamente), no observándose diferencias significativas entre los tratamientos de riego (Tabla 6. 9).

Es de destacar el elevado porcentaje de flores que se transforma en fruto inicialmente (> 90%), pero dado que se trata de una variedad de calidad se requiere que sólo un reducido número de frutos permanezcan en cada ramo, a fin de conseguir un tamaño comercial competitivo, de ahí que los porcentajes de aclareo sean altos (\approx 88%, Tabla 6. 9)

Tabla 6. 9. Floración y fructificación en los distintos tratamientos de riego en melocotonero Flordastar. 2009.

	Máxima floración (30 Enero)	Antes aclareo (11 Marzo)		Después aclareo (6 Abril)	
	Nº flores m ⁻¹	Nº frutos m ⁻¹	% fructificación	Nº frutos m ⁻¹	% fructificación
T1	190.8	179.6	94.1	18.3	9.62
T2	166.8	155.7	93.3	21.5	12.92
T3	157.5	142.1	90.2	17.9	11.37
T4	188.4	174.3	92.5	21.0	11.17
Ta	172.5 ns	155.9	90.4	20.7	12.00

Los valores son media de 4 repeticiones. ns: no significativo.

Crecimiento del fruto

Debido a la dificultad de observar en el caso de la variedad de maduración extratemprana el patrón de crecimiento doble sigmoide característico de los frutales de hueso (Chalmers y van den Ende, 1975, 1977; Baldini, 1992), y que la evolución estacional del peso seco del fruto parece ser un buen indicador del cambio de fase (Chalmers y van den Ende, 1975; Girona, 1994), la Figura 6. 33 muestra la evolución del diámetro ecuatorial y del peso seco de melocotonero en los distintos tratamientos durante los años de estudio.

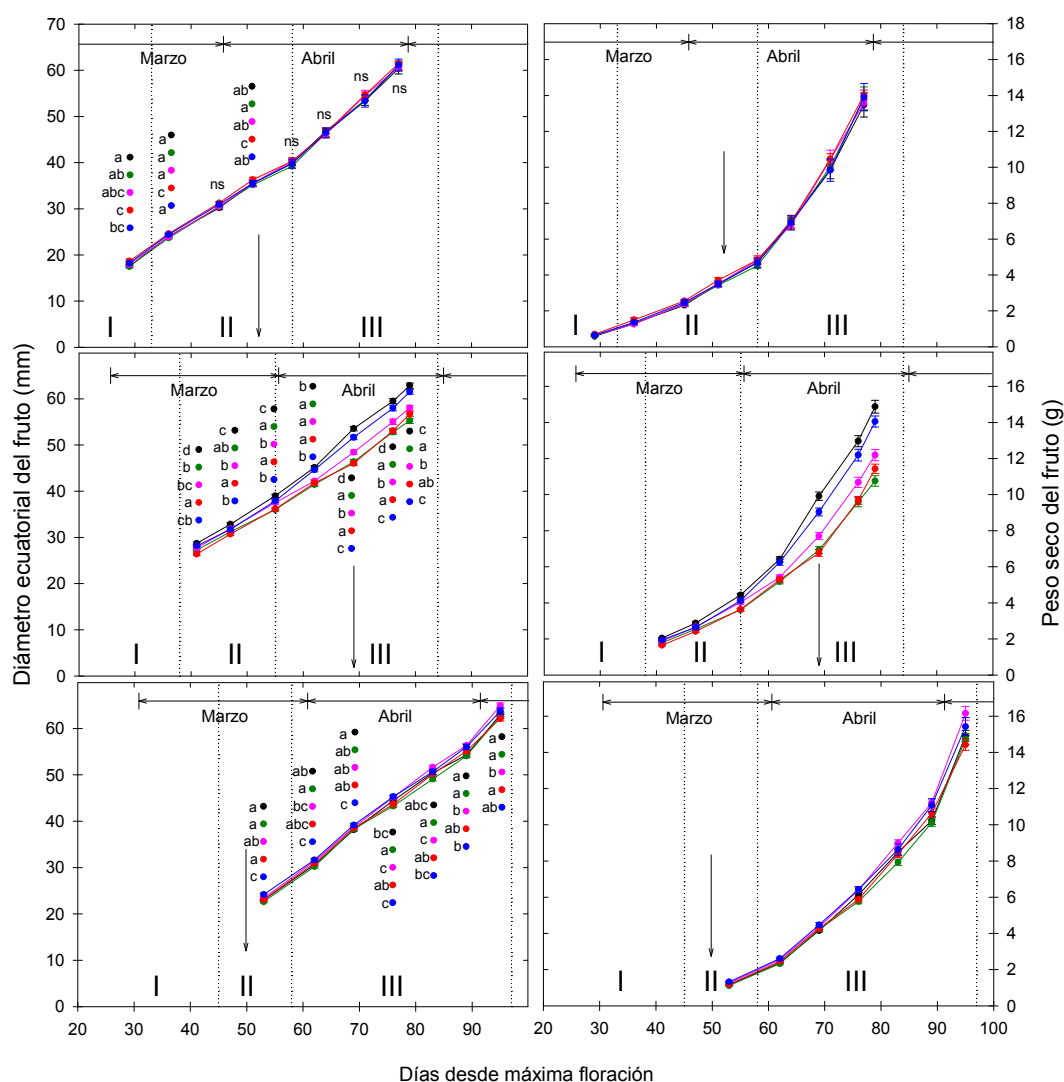


Figura 6. 33. Diámetro ecuatorial (Izda.) y peso seco del fruto (Dcha.) en 2007 (arriba), 2008 (centro) y 2009 (abajo) del melocotonero Flordastar en los tratamientos T1 (●), T2 (●), T3 (●), T4 (●) y Ta (●). Las líneas punteadas son los cambios de fase de crecimiento del fruto. Las flechas hacia abajo indican el inicio del riego al 100% de la ET_C en el T4. Los valores son media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM. Letras distintas indican diferencias significativas según el test de la $MDS_{0.05}$ en cada fecha.

En 2007 no se observaron diferencias importantes en el tamaño de los frutos de los árboles sometidos a los distintos tratamientos de riego (Figura 6. 33).

En 2008 y 2009 los frutos en el tratamiento de RDC mostraron valores de diámetro y peso significativamente menores que los del tratamiento control durante el periodo de riego al 25% de la ET_C (Figura 6. 33).

Estas diferencias desaparecen tras reanudarse el riego al 100% de las necesidades hídricas, si bien es importante destacar que un retraso en la aplicación de la totalidad de estas necesidades en 2008 produjo una disminución del tamaño de fruto en este tratamiento que no logró igualar a los del tratamiento control al final de la fase III (Figura 6. 33). Este hecho coincide con el mayor porcentaje de frutos pequeños encontrados en cosecha en este tratamiento como se comentará en el apartado siguiente.

En el resto de tratamientos deficitarios (T2 y T3), los frutos presentaron un tamaño significativamente menor que el control, que se mantiene hasta cosecha, mientras que en el tratamiento de riego automático (Ta) los frutos presentaron un tamaño similar a los del tratamiento control al final de la fase III en ambos años (Figura 6. 33).

Producción y calidad de la cosecha

La recolección en la parcela experimental se realizó entre finales de abril y primeros de mayo, atendiendo a criterios comerciales y de mercado de la zona, de tal forma que ésta tuvo lugar en un sólo corte en 2007 y 2008 y en dos cortes en el año 2009.

La producción total y el número de frutos por árbol, así como el peso medio del fruto en los distintos tratamientos ensayados se muestran en la Figura 6. 34. De manera general, los árboles del tratamiento de riego control muestran los valores de producción estadísticamente mayores al resto de tratamientos, siendo los tratamientos deficitarios similares entre sí. En el tratamiento de riego automático la producción fue más baja que la del tratamiento control sólo el primer año, siendo similar en 2008 y 2009 (Figura 6. 34).

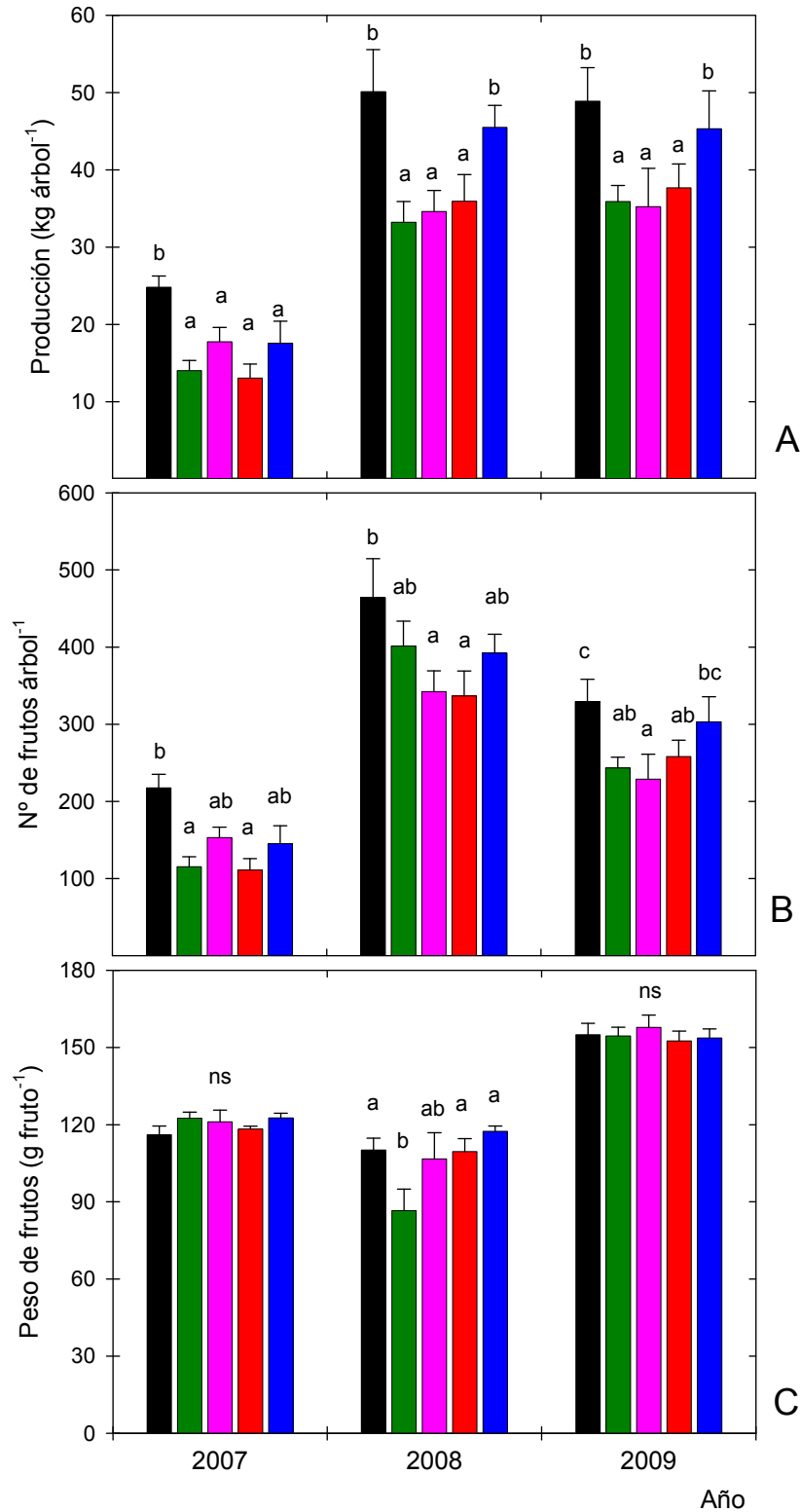


Figura 6. 34. Producción total (kg árbol⁻¹) (A) y número de frutos por árbol (B) en melocotonero Flordastar en los tratamientos T1 (■), T2 (■), T3 (■), T4 (■) y Ta (■) durante los años 2007, 2008 y 2009. Los valores son media de 4 repeticiones. Las barras son ± EEM. Letras distintas indican diferencias significativas según el test de la MDS_{0.05}.

Hay que destacar que la producción de 2007 fue anormalmente baja, ya que el año anterior se habían recolectado en el tratamiento control unos 48 kg árbol⁻¹ (datos no mostrados). Este hecho afectó a todas las plantaciones de frutales de maduración temprana (tanto de melocotonero como de albaricoquero) en la Región de Murcia, donde se reseñaron las producciones más bajas de los últimos 5 años (Anuario Estadístico de la Región de Murcia, 2008) posiblemente debido a las temperaturas anormalmente bajas en la primavera que afectaron a los procesos de floración y fructificación.

Los tratamientos deficitarios (T2, T3 y T4) no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí (Figura 6. 34), con unos valores medios de 15, 35 y 36 kilos por árbol, para 2007, 2008 y 2009, respectivamente. Hay que destacar que para estos tratamientos los ahorros de agua de riego estuvieron cercanos al 50% de las necesidades hídricas reales del cultivo (Tabla 6. 4).

La importante reducción en la producción en 2007 (\approx 45% con respecto al tratamiento control) fue debida, además de lo anteriormente comentado, a que los déficits hídricos durante la postcosecha de 2006 fueron severos, con valores de potencial hídrico de tallo de -1.8 MPa mantenidos durante la mayor parte de esta fase fenológica en todos los tratamientos deficitarios (Figura 6. 7).

Para el tratamiento de riego automático (Ta) la reducción de producción con respecto al tratamiento control en 2007, aunque significativa fue menor (29%) que la de los tratamientos deficitarios (Figura 6. 34). En 2008 y 2009, cuando los umbrales de agua en el suelo fueron más precisamente ajustados (Figura 6. 10), la producción fue similar a la del tratamiento control con un valor medio de 47 kilos por árbol para ambos años (Figura 6. 34), cuando el riego había sido al 67% de la ETc (Tabla 6. 4).

En cuanto al peso medio del fruto, en el año 2007 se recolectaron frutos de mayor tamaño que en 2008, pero menores que en 2009 (Figura 6. 34). La reducción paralela en la producción y el número de frutos por

árbol en 2007 y 2009 en los tratamientos deficitarios provoca similares tamaños medios de los frutos esos años, de ahí que el efecto de los tratamientos de riego no sea significativo, sólo destacando que en 2008, el peso medio de los frutos del tratamiento T2 fue significativamente más bajo que el del resto de tratamientos (Figura 6. 34).

La recolección de 2009 se realizó en dos cortes (6 y 11 de mayo). En el primero se recolectó selectivamente la fruta de mayor tamaño, con un mejor precio en el mercado y en el segundo corte el resto de la fruta que quedó en el árbol (Figura 6. 35).

En el primer corte no se observaron diferencias significativas en la producción entre los tratamientos de riego, excepto en el tratamiento de riego automático que presentó una proporción significativamente mayor de frutos grandes (40 %) que en el tratamiento control (Figura 6. 35), aunque la producción total no difiere del control (Figura 6. 34). En el segundo corte, se observan ligeras diferencias entre los tratamientos deficitarios, los cuales muestran un producción significativamente menor que la del tratamiento control (Figura 6. 35).

Los frutos recolectados se distribuyeron en campo en 5 categorías, en función del diámetro: ≤ 56 , 56-61, 61-67, 67-73 y >73 mm (Tabla 6. 3). Los porcentajes de cada diámetro se muestran en la Figura 6. 36. En torno al 70% corresponden a los tamaños equivalentes a las categorías A y B (67-73 y 61-67 mm, respectivamente), concretamente un 63 y 75% en 2007 y 2009 respectivamente; mientras que un 8% equivale a los frutos de menor tamaño (calibre D) y un 6% a los categoría extra (calibre AA). En 2008 los frutos se distribuyeron en categorías correspondientes a tamaños de frutos más pequeños (Figura 6. 36).

6. Respuesta agronómica y fisiológica al riego deficitario

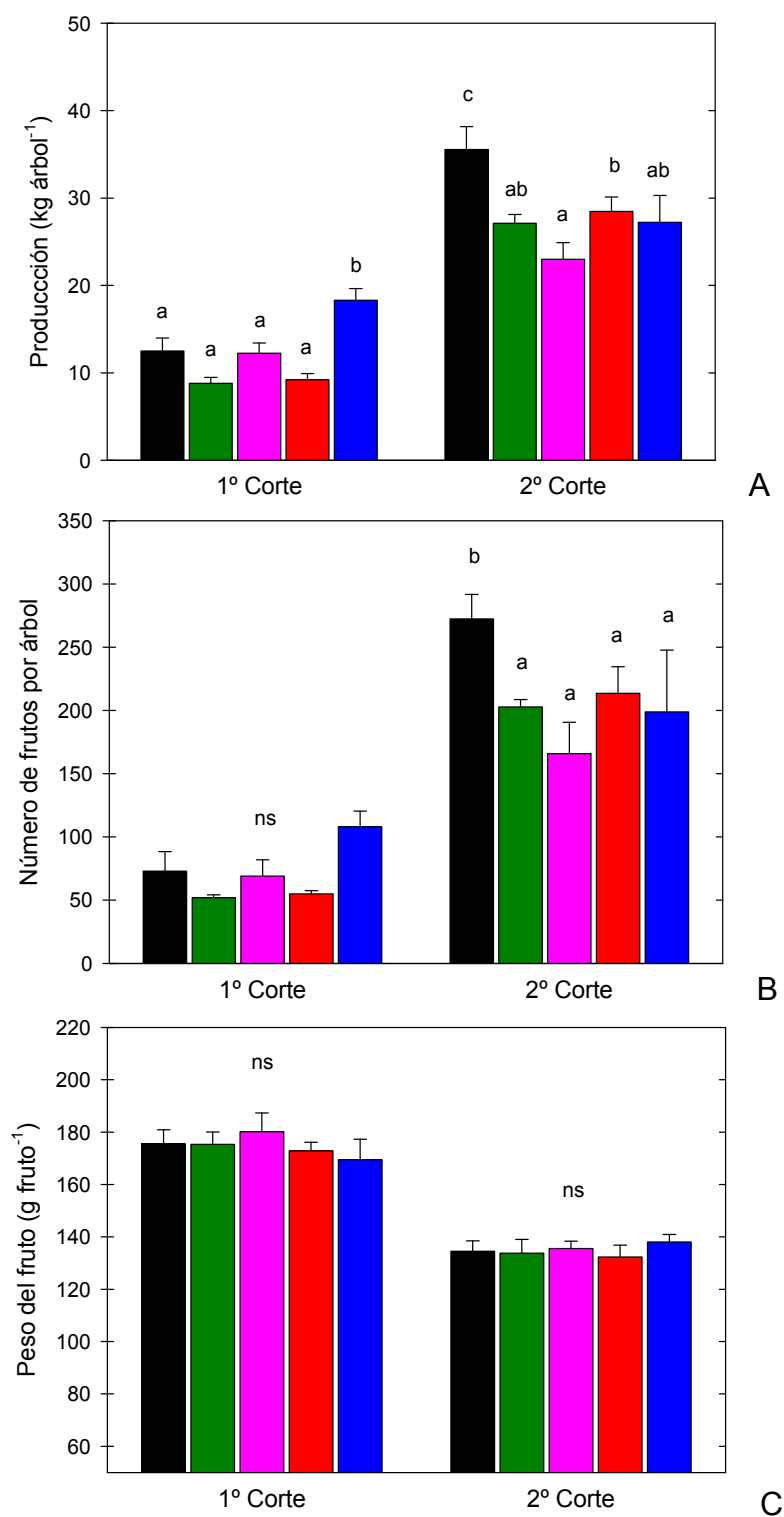


Figura 6. 35. Producción total (A), número de frutos por árbol (B) y peso medio del fruto (C) de melocotonero Flordastar en los dos cortes de 2009, en los tratamientos T1 (●), T2 (■), T3 (●), T4 (■) y Ta (■). Los valores son media de 4 repeticiones. Las barras son \pm EEM. Letras distintas indican diferencias significativas según el test de la MDS_{0,05}. ns: no significativo.

6. Respuesta agronómica y fisiológica al riego deficitario

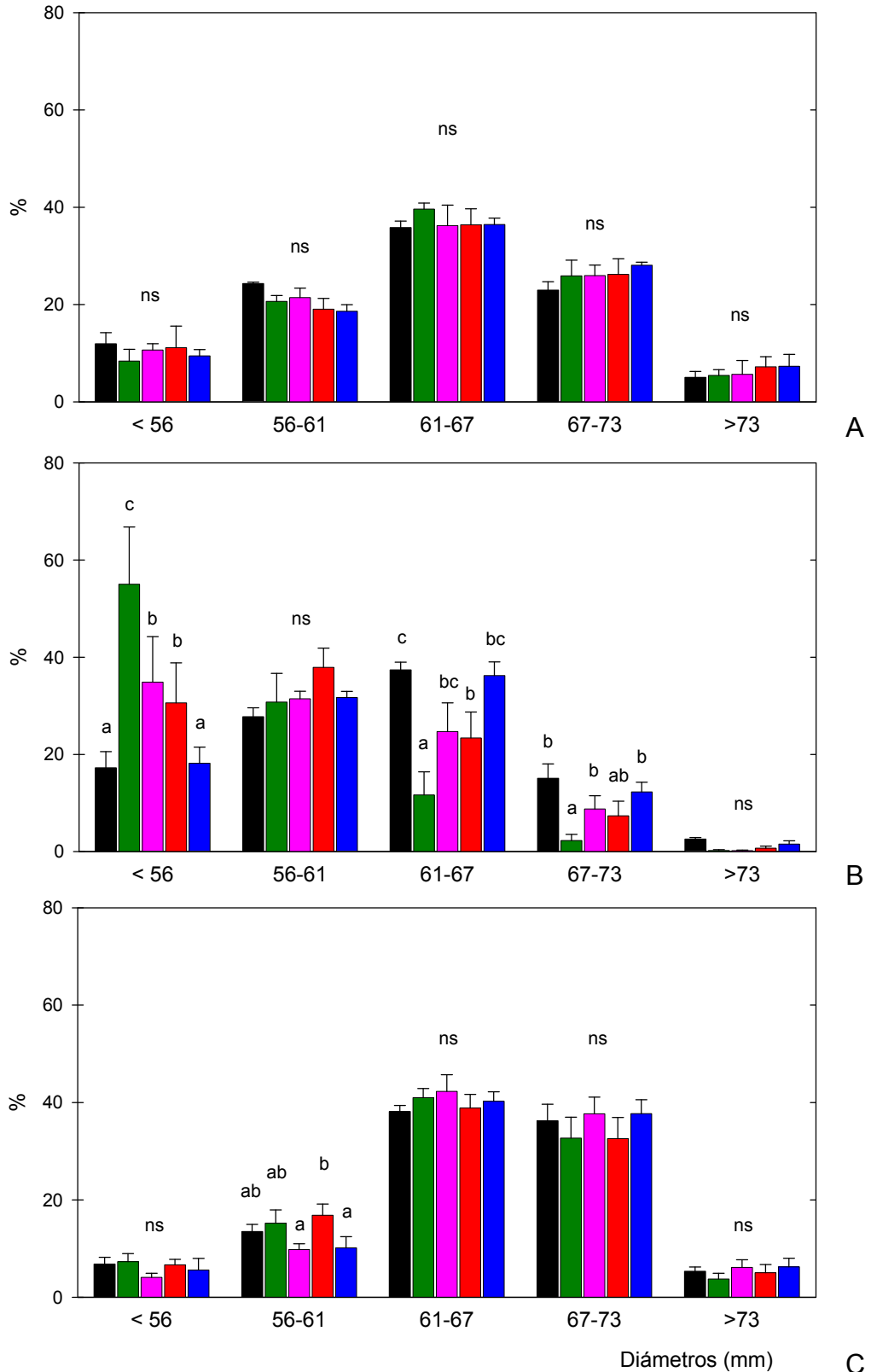


Figura 6. 36. Distribución de calibres (%) de los frutos de la cosecha de 2007 (A), 2008 (B) y 2009 (C) de melocotonero Flordastar en los tratamientos T1 (■), T2 (■), T3 (■), T4 (■) y Ta (■). Los valores son media de 4 repeticiones. Las barras son \pm EEM. Letras distintas indican diferencias significativas según el test de la MDS_{0.05}. ns: no significativo. (Datos previamente transformados arcsen).

En 2007 y 2009 sólo se encontraron diferencias significativas entre los diámetros de los frutos, mostrando los tratamientos de riego una distribución de diámetros similar, si bien en 2009, en el tratamiento T3 se obtuvieron los porcentajes más bajos de los calibres 56 y 61 mm (Figura 6. 36), lo cual coincide con la menor cantidad de frutos por árbol producidos en ese tratamiento (Figura 6. 34).

En 2008 el análisis indicó un efecto significativo de los tratamientos de riego, los diámetros, así como de la interacción tratamiento x diámetro. En los tratamientos deficitarios se observa un mayor porcentaje de frutos de diámetros menores, con un 86, 66 y 68%, para el T2, T3 y T4 respectivamente (Figura 6. 36). Cabe destacar que en el tratamiento de riego T2 el porcentaje más alto (55%) corresponde a los frutos de menor tamaño (Figura 6. 36). Este hecho coincide con el menor peso medio del fruto obtenido ese año ($86.6 \text{ g fruto}^{-1}$) (Figura 6. 34).

De forma global, los tratamientos deficitarios indujeron un menor porcentaje de frutos de calibre comercial A y B (26%), mientras que en los tratamientos control y automático éste fue el doble (en torno al 50%).

En los dos cortes de 2009 el efecto del tratamiento no fue significativo en la distribución de los diámetros (Figura 6. 37). De manera general todos los tratamientos de riego producen en el primer corte un alto porcentaje (89%) de diámetros de calibre A y B (67-73 y 61-67 mm), mientras que en el segundo estos porcentajes son algo menores (68%) (Figura 6. 37) ya que los frutos de mayor tamaño ya habían sido recolectados.

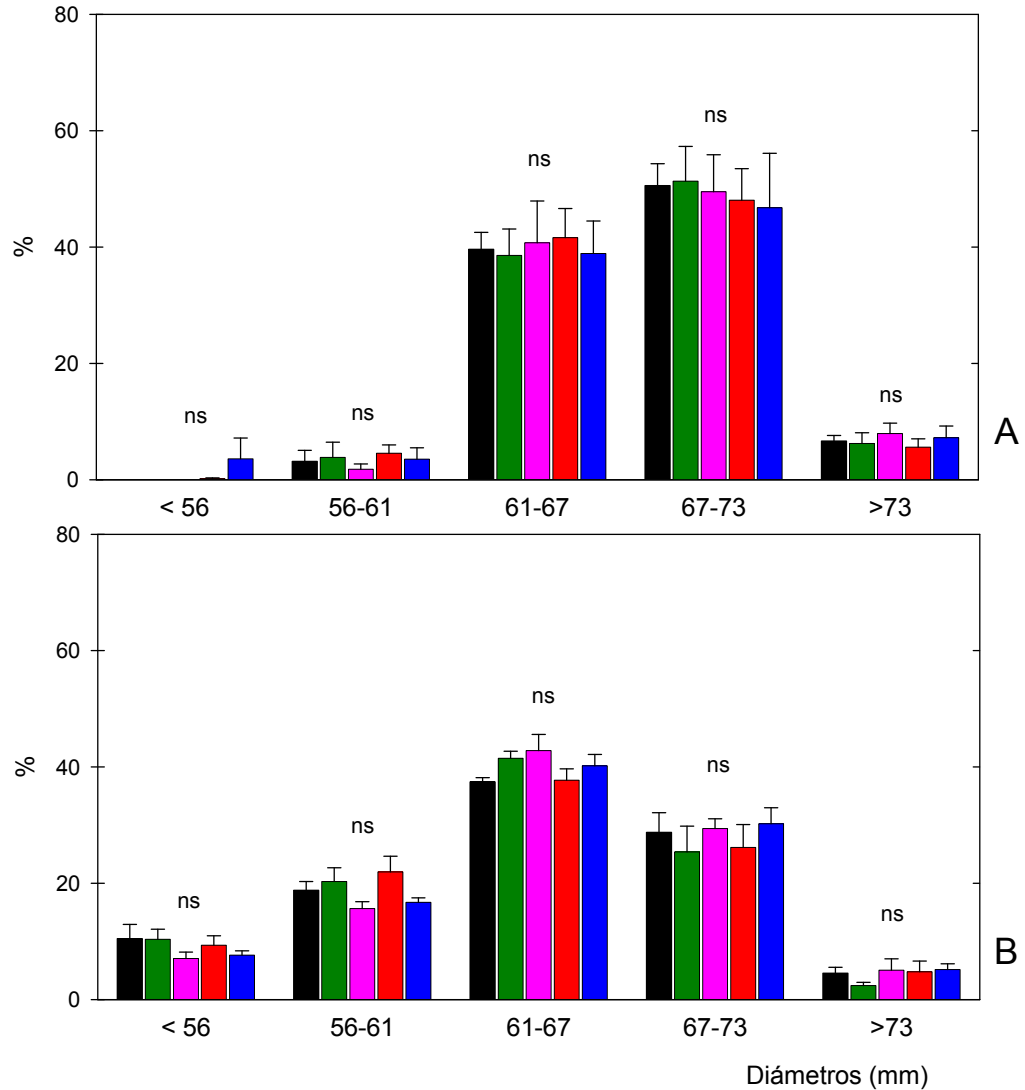


Figura 6. 37. Distribución de calibres (%) de los frutos de la cosecha de 2009 en el primer (A) y segundo corte (B) de melocotonero Flordastar en los tratamientos T1 (■), T2 (■), T3 (■), T4 (■) y Ta (■). Los valores son media de 4 repeticiones. Las barras son \pm EEM. Letras distintas indican diferencias significativas según el test de la MDS_{0.05}. ns: no significativo. (Datos previamente transformados arcsen).

La evaluación de la calidad de los frutos recolectados realizada en el laboratorio mostró unos calibres medios de 6 cm de diámetro ecuatorial, con 120 g de peso fresco y 11.2 °Brix, correspondientes a una aceptable calidad organoléptica dentro de las variedades tempranas (Buendia *et al.*, 2008). El fruto en cosecha presentó un color rojo intenso en el 70-80% de la superficie sobre fondo amarillo-anaranjado.

La Tabla 6. 10 muestra los datos correspondientes a los parámetros físico-químicos (diámetro longitudinal y ecuatorial, peso fresco y seco y sólidos solubles) durante el periodo experimental. En 2007 no se observó efecto significativo de los tratamientos en ninguno de los parámetros estudiados, mientras que en 2008 los frutos del tratamiento control mostraron valores más altos de diámetro que el resto de tratamientos, si bien sin diferencias significativas con el tratamiento de riego automático (Tabla 6. 10).

En los tratamientos deficitarios (T2, T3 y T4), en 2008, los frutos presentaron los valores más bajos de todos los parámetros físicos, excepto para el contenido de sólidos solubles que resultaron ser los más altos. Entre ellos, es el tratamiento de riego deficitario sostenido, RDS, el que presenta los frutos significativamente más pequeños pero con un mayor contenido en sólidos solubles (Tabla 6. 10).

Tabla 6. 10. Características físico-químicas de los frutos de melocotonero Flordastar evaluadas en la cosecha de 2007, 2008 y 2009 (primer y segundo corte).

2007	T1	T2	T3	T4	Ta
Diámetro longitudinal (mm)	59.30 a	60.67 ab	60.69 ab	61.15 b	59.27 a
Diámetro ecuatorial (mm)	63.81 a	64.06 a	63.74 a	61.93 a	62.10 a
Peso fresco (g)	128.14 a	133.94 a	132.38 a	125.81 a	139.52 a
Peso seco (g)	15.42 a	15.62 a	15.46 a	14.38 a	14.50 a
Sólidos solubles (°Brix)	9.25 a	9.30 a	9.41 a	9.45 a	9.54 a
2008					
Diámetro longitudinal (mm)	57.90 b	55.16 a	57.67 b	57.00 b	58.50 b
Diámetro ecuatorial (mm)	62.95 c	57.03 a	61.14 bc	59.90 b	61.71 bc
Peso fresco (g)	124.65 bc	101.36 a	123.70 bc	115.40 b	131.58 c
Peso seco (g)	15.05 c	11.61 a	13.81 bc	13.11 b	14.24 bc
Sólidos solubles (°Brix)	9.66 a	13.03 c	11.74 b	11.62 b	10.00 a
2009 1º Corte					
Diámetro longitudinal (mm)	57.53 a	56.90 a	58.73 ab	59.54 b	58.71 ab
Diámetro ecuatorial (mm)	66.63 a	65.84 a	68.58 a	65.84 a	68.69 b
Peso fresco (g)	145.00 a	145.93 a	156.93 a	148.49 ab	154.54 ab
Peso seco (g)	17.14 a	16.67 a	18.41 a	16.64 a	18.48 b
Sólidos solubles (°Brix)	9.97 a	9.82 a	9.74 a	9.51 a	9.53 a
2009 2º Corte					
Diámetro longitudinal (mm)	55.12 a	57.17 ab	58.69 b	58.51 b	56.18 ab
Diámetro ecuatorial (mm)	68.55 bc	66.37 abc	69.39 bc	64.86 a	65.69 ab
Peso fresco (g)	150.81 ab	149.63 ab	165.04 b	138.26 a	141.32 a
Peso seco (g)	18.34 ab	16.99 ab	18.97 b	16.07 a	16.75 ab
Sólidos solubles (°Brix)	10.82 a	12.18 b	12.08 b	11.35 a	11.15 a

Los valores son media de 4 repeticiones. Las medias seguidas de letras distintas son significativamente diferentes según el test de la MDS_{0.05}.

En 2009 cabe destacar el efecto de los cortes en el contenido de sólidos solubles ya que los frutos recolectados en el segundo corte presentan el valor más alto de sólidos solubles de todo el periodo experimental (11.5 °Brix) (Tabla 6. 10).

Un aumento del contenido en sólidos solubles de los frutos de melocotón en respuesta al déficit hídrico ha sido ampliamente referido en frutales de hueso tanto melocotonero (Buendía *et al.*, 2008; Gelly *et al.*, 2004) como albaricoquero (Torrecillas *et al.*, 2000; Pérez-Pastor *et al.*, 2007), demostrando el aspecto beneficioso de los riegos deficitarios al mejorar la calidad de los frutos en la recolección.

Eficiencia productiva

La eficiencia en el uso del agua (kg de fruta m⁻³ riego aplicado) fue significativamente mayor en los tratamientos deficitarios que en el tratamiento control (Tabla 6. 11), de forma similar a lo indicado por otros autores en frutales bajo condiciones de déficit hídrico (Torrecillas *et al.*, 1989a; Hutmacher *et al.*, 1994; Romero *et al.*, 2004a; Pérez-Pastor *et al.*, 2009). Cabe destacar la escasa eficiencia del año 2007, debida a la baja producción en todos los tratamientos. En valor promedio del periodo experimental, los tratamientos deficitarios y de riego automático fueron 2.5 veces más eficientes que el tratamiento control (Tabla 6. 11).

Tabla 6. 11. Eficiencia del uso del agua (kg m⁻³) y eficiencia productiva (kg cm⁻²) de melocotonero Flordastar durante el periodo experimental.

	Año	T1	T2	T3	T4	Ta
Eficiencia en el uso del agua (kg m ⁻³)	2007	0.82 a	1.90 b	2.17 b	2.00 b	2.59 b
	2008	1.75 a	4.52 c	4.38 c	4.59 c	3.38 b
	2009	1.46 a	3.18 b	3.27 b	4.73 c	2.71 b
	Media	1.34 a	3.20 b	3.27 b	3.77 b	2.89 b
Eficiencia productiva (kg cm ⁻²)	2007	0.21 a	0.18 a	0.23 a	0.18 a	0.25 a
	2008	0.30 a	0.30 a	0.30 a	0.31 a	0.41 b
	2009	0.25 a	0.29 a	0.27 a	0.30 a	0.35 a
	Media	0.25 a	0.26 a	0.27 a	0.26 a	0.34 b

Los valores son media de 4 repeticiones. Las medias seguidas de letras distintas son significativamente diferentes según el test de la MDS_{0.05}

En relación a la eficiencia productiva (kg cm^{-2} sección del tronco) no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos de riego (Tabla 6. 11), si bien el tratamiento de riego automático mostró valores significativamente mayores que los demás tratamientos en 2008, cuando la producción fue mayor (Figura 6. 34) y el ahorro de agua fue del 33% respecto a la ET_C (Tabla 6. 4). Estos hechos indican que los árboles producen de forma proporcional a su tamaño.

Diferentes estrategias de riego deficitario han sido ensayadas con éxito en melocotonero, permitiendo ahorros de agua de riego entre el 35% de la ET_C , para la variedad Andross en suelos profundos (Girona *et al.*, 2005b) y del 22% de la ET_C en Sudanell cultivados en suelos menos profundos (Girona *et al.*, 2003) sin afectar la producción ni la calidad del fruto. Igualmente, Botía *et al.* (2004) consiguen ahorros de hasta el 25% en el agua aplicada sin diferencias en la producción total de melocotón de maduración media.

El manejo del riego deficitario en melocotonero debe ser ajustado de forma que se limiten los déficits hídricos en el periodo postcosecha, muy largo en el caso de las variedades extratempranas como Flordastar si no se quiere afectar negativamente la productividad del cultivo. Además, Girona *et al.* (2003) alertan del efecto acumulado del estrés hídrico en melocotonero, que puede afectar al vigor del árbol y limitar la productividad del mismo.

Capítulo 7
Conclusiones y Conclusions

Determinación de las necesidades hídricas del melocotonero

Las necesidades hídricas del melocotonero Flordastar, evaluadas mediante el cálculo de la evapotranspiración real del cultivo (ET_C), utilizando el método de balance hídrico en lisímetros de drenaje, permitió determinar los coeficientes de cultivo (K_c) locales.

Los valores de K_c aumentaron durante la estación de crecimiento, con un ligero descenso de K_c después de la recolección. Los máximos consumos de agua suceden en verano.

La evapotranspiración real del cultivo (ET_C) aumentó por el crecimiento de los árboles, el cual fue mayor entre 2007 y 2008, que entre 2008 y 2009. La cantidad total media de agua de riego consumida por el cultivo fue de 838 mm anuales.

En comparación con los valores de K_c propuestos por la FAO-56, éstos últimos tienden a sobreestimar la ET_C al inicio de la estación.

El uso de los coeficientes de cultivo propuestos en el cálculo de las necesidades hídricas del melocotonero Flordastar se traduciría en un ahorro de agua de riego del 16%, tal y como se requiere para una gestión precisa del riego en zonas semiáridas con recursos hídricos limitados.

Respuesta agronómica y fisiológica del melocotonero al riego deficitario y riego automático.

El contenido de agua en el suelo (medido con sonda de neutrones) y el potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) (medido a mediodía con cámara de presión en hojas cubiertas) se redujeron en respuesta al déficit hídrico mostrando los árboles del tratamiento de riego deficitario controlado (RDC) valores de (Ψ_{tallo}) más bajos (-1.8 MPa) durante el periodo postcosecha, coincidiendo con las mayores reducciones en el riego. Los trata-

mientos de riego parcial de raíces (RPR) y riego deficitario sostenido (RDS) mostraron valores similares de agua en el suelo y Ψ_{tallo} .

La alternancia del riego en el tratamiento RPR solo afecta a los primeros 40 cm. No se han encontrado diferencias significativas en los perfiles hídricos por debajo de esta profundidad. Los valores altos de humedad del suelo encontrados por debajo de este nivel, incluso en el lado que no se riega, indican que esas reservas de agua no son consumidas por la planta.

En el tratamiento de riego automático (Ta), la evolución del contenido de agua en el suelo fue distinta para cada año, de acuerdo con los distintos niveles criterios establecidos para el inicio y fin del riego. En 2007, el contenido de agua del suelo refleja el patrón en forma de campana, similar a la curva de demanda de ET_C . En 2008, el contenido de agua del suelo mostró valores estables en torno a la capacidad de campo si bien con un patrón ligeramente divergente, con grandes variaciones respecto al valor umbral establecido, especialmente en los momentos de alta demanda de ET_C . Durante 2009, se mostró un patrón más estable, variando el contenido de agua en el suelo en los dos niveles establecidos.

Los sensores de capacitancia han resultado ser unas herramientas adecuadas para el control, en continuo y en tiempo real, del contenido de agua del suelo, así como para la evaluación del impacto de diferentes programas de riego. Los datos de humedad en cada profundidad, además, proporcionan una valiosa información sobre el movimiento del frente húmedo, profundidad y actividad del sistema radical.

En las condiciones experimentales ensayadas, se sugiere que el contenido de agua en el suelo se mantenga en niveles superiores a $210 \text{ mm } 0.8 \text{ m}^{-1}$ (correspondiente a una humedad volumétrica media de $0.26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Esto se traduce en un valor umbral del 10% de la capacidad de campo, que se propone como límite inferior para activar la programación del riego automático. Este límite se estableció para el período de poscosecha en base a la determinación del punto de inflexión, derivado de la

curva de agotamiento del agua en el suelo como la intersección entre las líneas con diferente pendiente.

La dinámica de crecimiento de las raíces en minirrizotrones y el análisis de las imágenes avalan el uso del método simplificado de evaluación de raíces nuevas frente al de raíces totales, permitiendo obtener valores de densidad de longitud de raíces (DLR) en melocotonero de una forma más rápida.

La dinámica de crecimiento de la DLR en condiciones de adecuado suministro hídrico (tratamiento control) mostró un crecimiento continuo durante todo el año, con diferentes tasas de crecimiento diario, en función de la fenología del cultivo, Tras la recolección se produce un aumento de la tasa crecimiento que se mantiene hasta mediados de verano, cuando se observan los máximos crecimientos (a mediados de agosto), para después disminuir. La tasa de crecimiento de las raíces se ralentiza durante la etapa de máximo crecimiento de los frutos, por lo que queda claro que los frutos actúan como fuertes sumideros de los fotoasimilados, provocando un patrón claramente alternante entre el crecimiento de la parte aérea y el de las raíces.

El déficit de riego en el tratamiento RDS redujo en un 52% el crecimiento radical con respecto al tratamiento control, mientras que sólo fue del 23% en el tratamiento de riego parcial de raíces, en el que no se observaron diferencias significativas en el crecimiento de raíces entre ambos lados, por lo que se concluye que la alternancia de riego no produce un efecto significativo en la dinámica de crecimiento de raíces de melocotonero.

El déficit hídrico afectó al crecimiento vegetativo del árbol de forma similar en todos los tratamientos deficitarios, sin embargo se observó la siguiente progresión: diámetro del tronco (medido con calibre durante el reposo) > madera de poda (peso en campo, en otoño) ≥ tamaño de la copa (superficie sombreada en verano) > crecimiento en longitud de ramos.

La producción en los tratamiento deficitarios fue significativamente menor que la del tratamiento control durante los tres años de ensayo, sin

diferencias entre el riego deficitario sostenido (T2), parcial de raíces (T3) y deficitario controlado (T4). En 2007 las producciones fueron anormalmente bajas en todos los tratamientos debido a las condiciones climáticas adversas durante la floración y a una excesiva poda realizada el año anterior.

El efecto del déficit hídrico acumulado provocó en los tratamientos de riego deficitario (T2, T3 y T4) un menor crecimiento vegetativo que se tradujo en árboles de menor tamaño lo que limitó la producción con respecto a los árboles sobre-regados del tratamiento control durante los tres años de ensayo. En el tratamiento de riego automático la producción fue más baja que la del tratamiento control sólo el primer año, siendo similar en 2008 y 2009.

De forma global, los tratamientos deficitarios indujeron un menor porcentaje de frutos ($\approx 26\%$) de calibre comercial A y B (diámetro entre 61 y 73 mm) que en los tratamientos control y de riego automático ($\approx 50\%$).

Si los datos de producción se normalizan con la sección de tronco desaparecen las diferencias entre tratamientos. Además, los tratamientos deficitarios fueron más eficientes en el uso del agua que el tratamiento sobre-regado, siendo el más eficiente el de RDC con las mayores reducciones de riego (al 35% respecto de la ET_C).

Cuando los límites de agua en el suelo se definen con precisión, como sucede en los dos últimos años, el tratamiento de riego automático Ta permite una programación eficiente del riego que conduce a un adecuado estado hídrico de la planta y limitando exclusivamente el crecimiento vegetativo sin afectar la producción ni la calidad de la cosecha.

El manejo del riego deficitario en melocotonero debe ser ajustado de forma que se limiten los déficits hídricos en el periodo postcosecha, muy largo en el caso de las variedades extratempranas como la empleada en el estudio, si no se quiere afectar negativamente la productividad del cultivo.

Conclusions

Water requirements of Flordastar peach trees

Crop water requirements (ET_C) of Flordastar peach trees were evaluated by calculating the actual evapotranspiration (ET_C), using the method of water balance in drainage lysimeters, which allowed to determine local crop coefficients (K_c) values.

K_c values increased during the growing season, with a slight decline of K_c after harvest. Maximum consumption of water occurred during summer.

The actual crop evapotranspiration increased as tree grew, which were higher from 2007 to 2008, than between 2008 and 2009. The annual average irrigation water consumed by the crop amounted 838 mm.

The K_c values proposed by the FAO-56 tend to overestimate the ET_C at the beginning of the season.

The use of the proposed crop coefficients for the calculation of water requirements of Flordastar peach trees would result in savings of 16% in irrigation water, as required for the accurate management of irrigation in semi-arid areas with limited water resources.

Agronomic and physiological response of peach trees to deficit irrigation and automatic irrigation.

The soil water content (measured neutron probe) and the stem water potential (Ψ_{stem}) (measured at noon with pressure chamber in covered leaves) were reduced in response to the water deficits, showing the trees from the controlled deficit treatment trees the lowest Ψ_{stem} values during the post-harvest period (-1.8 MPa), coinciding with major reductions in irrigation water applications. Partial root drying (PRD) and sustained deficit irrigated (RDI) treatments showed similar values of in the soil water content and Ψ_{stem} values.

The alternation of irrigation in the PRD treatment only affects the soil water content variations of the first 40 cm of soil. No significant differences in the water profiles below this depth were found. High values of soil moisture found below this level, even on the side that was not irrigated, indicated that these water reserves were not consumed by the plant.

In the treatment of automatic irrigation (Ta), the evolution of the soil water content was different for each year, in accordance with criteria established for the beginning and end of the irrigation. In 2007, the soil water content reflects the bell-pattern, similar to ET_C demand curve. In 2008, soil water content showed stable values around field capacity values, although with large variations from the threshold value set, especially in times of high ET_C demand. During 2009, soil water content showed a more stable pattern by varying the water content in the soil between the two established values.

Capacitance sensors have proved to be suitable tools for control, in continuous and real-time the soil water content, as well as the assessment of the impact of different irrigation scheduling. Data of soil water content at each depth also provides valuable information about the movement of the wet front, depth and radical system activity.

Under our experimental conditions, it is suggested that the soil water content at which plant water stress was evident corresponded to a mean SWC value of 210 mm in the 0-0.8 m soil upper layer (mean volumetric soil water content of $0.26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). That could result in a threshold value of 10% of the soil field capacity being adopted as a lower limit to activate automatic irrigation scheduling based on soil water content measurements. The limit, defined as breaking point, was determined as the transition between the two phases of decline in SWC in a drying soil: the relatively rapid phase and a subsequent slower phase.

The root dynamics using minirhizotrons and the subsequent analysis of the images proved to be a satisfactory tool by adopting the simplified method of evaluation of new roots vs. total, allowing to obtain root length density (RLD) values in peach a faster roots.

The root dynamics under adequate water supply conditions (control treatment) showed a continuous growth throughout the year, with different growth rates, depending on the phenological stage, after harvest an increase in the growth rate occurred which remained until the middle of summer, when maximum growth were observed (middle of August), and then RLD decreased. Root growth rate slows down during maximum fruit growth period, for what it is clear that fruit act as strong sinks the photoassimilates, causing a clearly alternating pattern between the growth of the aerial and root parts of the tree.

Sustained deficit irrigation (T2 treatment) reduced by 52% root growth respect to the control treatment, while was only 23% in the partial root drying treatment, where no significant differences were observed in the growth of roots between both sides; therefore it can be concluded that that alternation of irrigation does not produce a significant effect on the dynamics of growth of peach tree roots.

The water deficit affected the vegetative growth of the tree similarly in all deficit irrigated treatments, however the following progression was noted: trunk diameter (measured with caliber during dormancy) > wood pruning (weighted in the field in autumn) \geq canopy size (shaded area in summer) > growth in length of shoots.

Yield in the deficit treatment was significantly lower than the control treatment during the three years of study, no differences between the sustained deficit irrigation (T2), partial root drying (T3) and controlled deficit (T4) treatments were found. In 2007 yields were abnormally low in all treatment due to adverse climatic conditions during the flowering and excessive pruning performed the previous year.

The effect of the accumulated water deficit resulted in deficit irrigation (T2, T3 and T4 treatment) decreased vegetative growth resulting in smaller trees which limited yield, with respect to over-irrigated trees of control treatment, during the three years of trial. In the treatment of automatic irrigation yield was lower than that of the control treatment only during the first year, being similar in 2008 and 2009.

Globally, deficit irrigated treatments induced a minor percentage of fruit ($\approx 26\%$) of commercial grade A and B (diameter 61 to 73 mm) than in the automatic irrigation and control treatments ($\approx 50\%$).

If the yield data are normalized with trunk diameter data, the differences between treatments disappeared. In terms of water use efficiency (defined as the ratio between yield and total irrigation applied water) it was clear that the deficit irrigation treatments were more efficient than the over-irrigated trees of the control treatment. The RDI treatment, with the greatest irrigation reduction (35% of the ET_C), were the most efficient in this respect.

When the limits of water in the soil are defined with precision, as in the two last years, treatment of automatic irrigation based on soil water content measurements with capacitance probes (T_a), allows an efficient scheduling irrigation that leads to a suitable plant water status and exclusively limiting vegetative growth without affecting production or quality of the harvest.

Deficit irrigation strategies in peach trees must be adjusted to limit water deficits during the postharvest period of early maturing cultivars, which is very long as in the case of 'Flordastar', if fruit yield is not to be reduced.

Capítulo 8
Bibliografía

- Abrisqueta, J.M., Hernansáez, A., Alarcón, J.J., Lozano, M.A. 1991. Dinámica del sistema radicular de dos genotipos de tomate en invernadero en riego por goteo sometidos a estrés salino. *Suelo y Planta*, 1: 351-361.
- Abrisqueta, J.M., Plana, V., Marco, I., Ruiz-Sánchez, M.C. 2002. Relaciones hídricas del albaricoquero en distintas condiciones de riego deficitario. *VI Simposium Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las Plantas*, Pamplona, 26-29.
- Abrisqueta, J.M., Ruiz, A., Franco, J.A. 2001. Water balance of apricot trees (*Prunus armeniaca* L. cv. Búlida) under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 50: 211-227.
- Adiku, S.G.K., Braddock, R.D., Rose, C.W. 1996. Modelling the effect of varying soil water on root growth dynamics of annual crops. *Plant and Soil*, 185: 125-135.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. *Paper 56. FAO of the United Nations*. Roma (Italia). 300 pp.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R. 2005. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in western USA. Water rights regulation and planning. *Journal of Irrigation and Drainage Systems*, 19: 251-268.
- Anderson, J.L., Richardson, E.A., and Kesner, C.D. 1986. Validation of chill unit and flower bud phenology models for "Montmorency" sour cherry. *Acta Horticulturae*, 184: 71-78.
- Andren, O., Rajkai, K., Kätterer, T. 1991. A non-destructive technique for studies of root distribution in relation to soil moisture. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 34: 269-278.
- Andreu, L., Hopmans, J.W., Schwankl, L.J. 1997. Spatial and temporal distribution of soil water balance for a drip-irrigated almond tree. *Agricultural Water Management*, 35: 123-146.
- Arkin, G.P., Blom, A., Bornett, E. 1978. A root observation chamber field installation. *Texas Agricultural Experimental Station*. Mix. Publication nº 1386.
- Asare, D.K., Sammis, T.W., Smeal, D., Jones, T.L. 1996. Sensitivity of simulated field water balance to different soil hydraulic data. *Transactions of the American Society of the American Engineers*, 39: 2085-2095.
- Atkinson, D. 1980. The distribution and effectiveness of root of tree cops. *Horticultural Reviews*, 2: 424-490.
- Ayars, J.E., Johnson, R.S., Phene, C.J., Trout, T.J., Clark, D.A., Mead, R.M. 2003. Water use by drip-irrigated late-season peaches. *Irrigation Science*, 22: 187-194.

- Badenes, M.L. 2000. Melocotonero. En: *La Horticultura Española* (F. Nuez y G. Liácer, Eds.). Sociedad Española de Ciencias Hortícolas: 334-337.
- Baker, J.M., Wraith, J.M., Dalton, F.N. 1992. Root function in water transport. En: *Limitation to Plant Root Growth* (Hatfield, J.L. y Steward, B.A. Eds.). Springer-Verlag, New York. *Advances in Soil Science*, 19: 53-72.
- Baldini, E. 1992. *Arboricultura General* (Mundi-Prensa Ed.). Madrid. 379 pp.
- Ball-Coelho, B., Sampaio, E.V.S.B., Tiessen, H., Stewart, J.W.B. 1992. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. *Plant and Soil*, 142: 316-329.
- Barrs, H.D., Meyer, W.S., Mason, W.K., Smith, R.C.G. 1990. Use of vertical root observation tubes in a irrigated grey clay soil. *CSIRO Division on Water Resources*, Griffith, Technical Memo.
- Bates, G.H. 1937. A device for the observation of root growth in the soil. *Nature*, 139: 966-967.
- Ben-Mimoun, M., Longuenesse, J.J., Genard, M. 1996. P_{max} as related to leaf: fruit ratio and fruit assimilate demand in peach. *Journal of Horticultural Science*, 71: 767-775.
- Bennet, J.M. 1990. Problems associated with measuring plant water status. *HortScience*, 25: 1551-1554.
- Bhat, R.B., 1998. Vessel length-diameter distribution in roots, internodes, nodes, petioles and peduncles of *Abutilon angulatum* (Gill. & Perr.) Mast. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 62: 1-2.
- Blad, B.L., Rosenber, N.J. 1974. Lysimetric calibration of Bowen ratio-energy balance method for evapotranspiration estimation in Central Great Plains. *Journal of Applied Meteorology*, 13: 227-236
- Bland W.L., Mesarch, M.A. 1990. Counting error in the line-intercept method of measuring root length. *Plant and Soil*, 126: 155-157.
- Böhm, W. 1974. Minirhizotrons for root observations under field conditions. *Z. Acker Pflanzenbau*, 140: 282-287.
- Böhm, W. 1979. *Methods of Studying Root Systems*. Springer-Verlag Ed., Berlin, Heidelberg. Ecological Studies, nº 33. 188 pp.
- Böhm, W., Maduakor, H., Taylor, H.M. 1977. Comparison of five methods for characterizing soybean rooting density and development. *Agronomy Journal*, 69: 415-419.
- Box, J.E.Jr., Johnson, J.W. 1987. Minirhizotron rooting comparison of three wheat cultivars. En: *Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics*. (Taylor, H.M., Ed.). American Society of Agronomy, Special Publication Number 50, Madison, Wisconsin, 123-130.

- Box, J.E.Jr., Smucker, A.J.M., Ritchie, J.T. 1989. Minirhizotron installation techniques for investigating root responses to drought and oxygen stress. *Soil Science Society of America Journal*, 53: 115-118.
- Bragg, P.L., Govi, G., Cannell, R.Q. 1983. A comparison of methods, including angled and vertical minirhizotrons, for studying root growth and distribution in a spring oat crop. *Plant and Soil*, 73: 435-440.
- Bray, R.H. 1965. *Methods of Soil Analysis*. Ed. American Society of Agronomy. Inc. Madison.
- Brown, D.A., Upchurch, D.R. 1987. Minirhizotrons: A summary of Methods and Instruments in Current Use. In *Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics*. (Taylor, H.M., Ed.). American Society of Agronomy, Special Publication Number 50, Madison, Wisconsin, 15-30.
- Buendía B., Allende A., Nicolás E., Alarcón J.J., Gil M.I., 2008. Effect of regulated deficit irrigation and crop load on the antioxidant compounds of peaches. *J. Agric. Food. Chem.*, 56: 3601-3608.
- Burgess, S.S.O., Adams, M.A., Turner, N.C., Ong, C.K. 1998. The redistribution of soil water by tree root systems. *Oecologia*, 115: 306-311.
- Cambra, T. 1985. *Denominaciones del melocotón*. Boletín Estación Experimental Aula Dei 13.
- Campbell, D.I., Willianson, J.L. 1997. Evaporation from a rained peat log. *Journal of Hydrology*, 193, (1/4), 142-160.
- Campbell, G.S., Campbell, M.D. 1982. Irrigation scheduling using soil moisture measurements. En: *Advances in Irrigation* (D. Hillel Ed.) Academic Press, Inc., New York, Vol 1: 25-42.
- Carlson, C.W. 1965. Problems and techniques in studying plant root system. *Proceeding 9th International Grass Congress*, Sao Paulo, 2: 1491-1493.
- CARM, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. 2009. www.carm.es.
- Caspari, H.W., Einhorn, T.C., Leib, B.G., Redulla, C:A., Andrews, P.K., Lombardini, L., Auvil, T., McFerson, J.R. 2004. Progress in the development of partial rootzone drying of apple trees. *Acta Horticulturae*, 664: 125-132
- Castel, J.R., Buj, A. 1990. Response of Salustiana oranges to high frequency deficit irrigation. *Irrigation Science*: 11, 121-127.
- Castel, J.R., Buj, A. 1993. Riego por goteo deficitario en naranjos adultos "Salustiana" durante siete años. *Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetales*, 8(2): 191-204.
- Castel. J.R., Bautista, I., Ramos, C., Cruz, G. 1987. Evapotranspiration and irrigation efficiency of mature orange orchards in Valencia (Spain). *Journal of Irrigation and Drainage Systems*, 3: 205-217.

- Chalmers, D.J. 1990. Control del crecimiento de la planta por la regulación de los déficits de agua y la limitación de la zona de humidificación. *Fruticultura*, 5: 369-375.
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D., Jerie, P.H. 1984. The physiology of growth control of peach and pear trees using reduced irrigation. *Acta Horticulturae*, 146: 143-149.
- Chalmers, D.J., Olson, K.A., Jones, T.R. 1983. Water relations of peach trees and orchards. En: *Water Deficit and Plant Growth* (T.T. Kozlowski Ed.). Academic Press, New York. Vol. 3: 197-232.
- Chalmers, D.J., Van den Ende, B. 1975. Productivity of peach trees. Factors affecting dry-wight distribution during tree growth. *Annals of Botany*, 39: 423-432.
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D. y Van Heek, L. 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106: 307-312.
- Chapman, H.D., Pratt, P.F. 1973. *Métodos de Análisis para Suelos, Plantas y Aguas*. Trillas Ed. México. 195 pp.
- Cheng, W., Coleman, D.C., Box, J.E.Jr. 1991. Measuring root turnover using the minirhizotron technique. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 34: 261-267.
- CID, Inc. 2009. www.cid-inc.com.
- Cohen, S., Moreshet, S., Le-Guillou, L., Simon, J.C. Cohen, M. 1997. Response of citrus trees to modified radiation regime in semi-arid conditions. *Journal of Experimental Botany*, 48 (306): 35-44.
- Cohen, S., Strzepez, K.M., Yates, D.N. 1996. Climate change and water balance components. *Water Resources Management in the Face of Climatic/Hydrologic Uncertainties*. Series: Water Science and Technology Library 18, 30-45.
- Conejero, W., Alarcón, J.J., García-Orellana, Y., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2007. Evaluation of sap flow and trunk diameter sensors used for irrigation scheduling in early maturing peach trees. *Tree Physiology* 27: 1753-1759
- Connors, C.H. 1919. Growth of fruits of peach. *New Jersey Agricultural Experience Station Annual Report*, 40: 82-88.
- Dalton, F. N. 1992. Development of time-domain reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity. En: (G. C. Topp et al. Eds.) *Advance in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing theory into practice*. SSSA Spec. Publ. No. 30. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, WI. 143-168.
- Daudet, F.A., Vachaud, G. 1977. Le mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application á la détermination du bilan hydrique. *Annales Agronomie*, 28, 503-519.

- Davies, W.J., Tardieu, F., Trejo, C.L. 1994. How do chemical signals work in plants that grow in drying soil? *Plant Physiology*, 104: 309-314.
- De Souza, C.R., Maroco, J.P., dos Santos, T.P., Rodrigues, M.L., Lopes, C.M., Pereira, J.S., Chaves, M.M. 2003. Partial root zone drying: regulation of stomatal aperture and carbon assimilation in field-grown grapevines (*Vitis vinifera* cv. Moscatel). *Functional Plant Biology*, 30: 653-662.
- DeJong R., Bootsma A. 1996. Review of recent developments in soil water simulation models. *Canadian Journal of Soil Science*, 76: 263-273.
- DeJong, T.M., Doyle, J.F. y Day, K.R. 1987. Seasonal patterns of reproductive and vegetative sink activity in early and late maturing peach (*Prunus persica*) cultivars. *Physiologia Plantarum*, 71: 83-88.
- Dholakia, M., Misra, R., Zaman, M.S. 1998. Simulation of border irrigation using explicit MacCormack finite difference method. *Agricultural Water Management*, 36 (3), 181-200.
- Diario Oficial de las Comunidades Europeas. 1999. Reglamento CE N° 2335/1999 por el que se establecen las normas de comercialización de los melocotones y nectarinas. 4.11.1999, L281: 11-15.
- Dittmer, H.J. 1938. A quantitative study of the subterranean members of three field grasses. *American Journal of Botany*, 25: 654-657.
- Domingo, R. 1994. Respuesta del limonero Fino al riego deficitario controlado. Aspectos fisiológicos. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. 237 pp.
- Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M.C., Nortes, P., Torrecillas, A., Pérez-Pastor, A. 2001. Respuesta productiva de albaricoqueros 'Búlida' al riego deficitario. *ITEA 97*: 123-133.
- Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M.C., Sánchez-Blanco, M.J., Torrecillas, A. 1996. Water relations, growth and yield of Fino lemon trees under regulated deficit irrigation. *Irrig. Sci.* 16, 115-123.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. *Irrig. Drain. Pap.*, 24, 144 pp. FAO. Roma, Italia.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. U.N. *Food and Agriculture Organization Irrigation and Drainage*. Paper No. 33, Rome.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O. 1986. Las necesidades de agua de los cultivos. *Estudios FAO. Riego y Drenaje* n° 24. Ed. FAO. Roma. 194 pp.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O. 1997. Crop Water Requirements. *Estudios FAO. Riego y Drenaje* n° 24. FAO. Roma. 144 pp.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O. 1975. Guidelines for predicting crop water requirements. *Food and Agriculture Organization Irrigation and Drainage*. Paper 24. FAO, Rome

- Drew, M.C. 1988. Effects of flooding and oxygen deficiency on plant mineral nutrition. *Advances in Plant Nutrition*, 3: 115-159.
- Dry, P.R., Loveys, B.R. 1998. Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 4: 140-148.
- Dry, P.R., Loveys, B.R. 1999. Grapevine shoot growth and stomatal conductance are reduced when part of the root system is dried. *Vitis*, 38: 51-156.
- Dry, P.R., Loveys, B.R. and During, H. 2000b. Partial drying of the root-zone of grape. 2. Changes in the pattern of root development. *Vitis*, 39: 9-12.
- Dry, P.R., Loveys, B.R., During, H. 2000a. Partial drying of the root-zone of grape. 1. Transient changes in shoot growth and gas exchange. *Vitis*, 39: 3-8.
- Dugas, W.A., Upchurch, D.R., Ritchie, J.T. 1985. A weighing lysimeter for evapotranspiration and root measurement. *Agronomy Journal*, 77: 821-825.
- Durán, P.J. 1993. Estimación de las necesidades hídricas de los *citrus* en Uruguay. *Levante Agrícola* 2º Trimestre, 140-149.
- Ebel, R.C., Proebsting, E.L., Evans, R.G. 1995. Deficit irrigation to control vegetative growth in apple and monitoring fruit growth to schedule irrigation. *HortScience*, 30: 1229-1232.
- Egea, J., E. Ortega, P. Martínez-Gómez, F. Dicenta. 2003. Chilling and heat requirements of almond cultivars for flowering. *Environmental and Experimental Botany*, 50:79-85.
- Ehlers, W., Hamblin, A.P., Tennant, D., Van Der Ploeg, R.R. 1991. Root system parameters determining water uptake of field crops. *Irrigation Science*, 12: 115-124.
- Eldredge, E.P., Shock, C.C. and Stieber, T.D. 1993. Calibration of granular matrix sensors for irrigation management. *Agron. J.* 85(6):1228-1232.
- Erena, M., Fontes, C., Soler, M.D., Caro, M., 1999. Necesidades hídricas del melocotonero en la Región de Murcia. *Actas de Horticultura. VIII Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas*. Tomo 3, 433-439
- Ervin, E.H., Koski, A.J. 1998. Drought avoidance aspects and crop coefficients of Kentucky bluegrass and tall fescue turfs in the semiarid West. *Crop Science*, 38 (3), 788-795.
- Evans, H. 1938. Studies on the absorbing surface of sugar-cane root systems. I. Method of study with some preliminary results. *Annals of Botany*, 2: 159-
- Faci, J.M., Martínez-Cobb, A. 1993. Necesidades de riego. Determinación en las plantaciones de frutales del Valle del Ebro. *Hortofruticultura*. 4, 47-52.

- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2008. www.faostat.fao.org
- Farahani, H.J., Ahuja, L.R. 1996. Evapotranspiration modelling of partial canopy/residue-covered fields. *Transactions of the ASAE*, 39, 2051-2064
- Fares, A., Alva, A.K. 1999. Estimation of citrus evapotranspiration by soil water mass balance. *Soil Sci.* 164 (5), 302-310.
- Fares, A., Alva, A.K. 2000. Soil water components based on capacitance probes in a sandy soil. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 64, 311-318.
- Fares, A., Polyakov, V. 2006. Advances in crop water management using capacitance sensors. *Advances in Agronomy* 90:43–77
- Faures, J.M., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A. Sorooshian, S. 1995. Impact of small-scale rainfall variability on runoff model. *J-hydrol.* Vol. 173. Issue 1-4. 309-326. Elsevier Science. B.V. Amsterdam.
- Faust, M. 1989. En: *Physiology of Temperate Zone Fruit Trees*. John Wiley and Sons, New York. 338 pp.
- Fereres, E., 1978. Irrigation of almond. En: *Almond orchard Management* (Micke, W. y Kester, D. Eds.). Division of Agricultural Science, University of California, 71-76.
- Fereres, E., Aldrich, T.M., Schulbach, H., Martinichi, 1981a. Responses of young almond trees to late season drought. *California Agriculture*, 35, 11-12.
- Fereres, E., Goldhamer, D. 2000. Avances recientes en la programación de los riegos. *Ingeniería del Agua* 7: 47-54.
- Fereres, E., Goldhamer, D.A. 1990. Deciduous fruit and nut trees. En: *Irrigation of Agricultural Crops*. B.A. Steward y D.R. Nielsen (Eds.), Agronomy nº 30. Published by ASA, CSSA y SSA, Madison. Wisconsin. USA, 987-1017.
- Fereres, E., Martinichi, D.A., Aldrich, T.A., Castel, J.R., Holzapfel, E., Schulbach, H. 1982. Drip irrigation saves money in young almond orchards. *California Agriculture*, 36, 12-13.
- Fereres, E., Pruitt, W.O., Bentel, J.A., Herderson, D.W., Holzapfel, E., Schulbach, H., Uriu, K. 1981b. Evapotranspiration and drip-irrigation scheduling. En: *Drip Irrigation Management*. Division of Agricultural Science. University of California, 8-13.
- Fereres, E., Reed, A.D., Meyer, J.L., Aljibury, F.K., Marsh, A.W. 1978. Irrigation costs. Univ. California. Div. Agric. Sci. Leaflet nº2875. 15 pp.
- Ferguson, J.C., Smucker, A.J.M. 1989. Modification of the minirhizotron video camera system for measuring spatial and temporal root dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 53: 1601-1605.
- Fernández, J.E., Díaz-Espejo, A., Infante, J.M., Durán, P., Palomo, M.J., Chamorro, V., Girón, L.F., Villagarcía, L. 2006. Water relations and

- gs exchange in olive trees under regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. *Plant and Soil*, 284: 273-291.
- Fernández, J.E., Moreno, F., Martín-Aranda, J., Fereres, E. 1992. Olive-tree root dynamics under different soil water regimes. *Agricultura Mediterránea*, 122: 225-235.
- Fideghelli, C. 1986. El melocotonero. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 243 pp.
- Foken, T. Wichura, B. 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agricultural And Forest Meteorology*, 78: 83-105.
- Franco, J.A. 1993. Balance hídrico y respuesta del almendro a distintas dosis de riego por goteo con agua salina. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. 350 pp.
- Franco, J.A., Abrisqueta, J.M., Hernansáez, A., Moreno, F. 2000. Water balance in a young almond orchard under drill irrigation with water of low quality. *Agricultural Water Management*, 43, 75-98.
- Galego, R. 1998. Evaluación del impacto de la sequía en distintos periodos fenológicos del albaricoquero. Mecanismos de resistencia. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. 278 pp.
- García-Orellana, Y., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Conejero, W., Ortuño, M.F., Nicolás, E., Torrecillas, A. 2007. Preliminary assessment of the feasibility of using maximum daily trunk shrinkage for irrigation scheduling in lemon trees. *Agricultural Water Management* 89: 167-171.
- García-Petillo, J.R., Castel, J.R. 2007. Water balance and crop coefficient estimation of a citrus orchard in Uruguay. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 5(2), 232-243.
- Gardner, B.R., Nielsen, D.C., Shock, C.C. 1992. Infrared thermometry and the crop water stress index: I. History, Theory and Baselines. *Journal of Production Agriculture*, 5: 462-466.
- Gardner, W.H. 1986. Water content. In: A. Klute (ed) *Methods of Soil Analysis, Part 1 – Physical and Mineralogical Methods*, 2nd edition. Agronomy Monograph No. 9: 493-544. *Am. Soc. Agron. Madison, WI*.
- Garnier, E. y Berger, A. 1985. Testing water potential in peach trees as an indicator of water stress. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 60: 47-56.
- Garrido Valero, M.S. 1994. Interpretación de análisis de suelos. Hojas divulgadoras. *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación*. 39 pp.
- Garwood, E.A. 1967. Seasonal variation in appearance and growth of grass roots. *J.Br. Grass J. Soc.*, 22: 121-130.
- Gear, R.D., Dansfield, A.S. Campbell, M.D. 1977. Irrigation scheduling with neutron probe. *J. Irrig. Drain. Div. (ASCE)* 103(IR3):291-298.

- Gelly M., Recasens I., Girona J., Mata M., Arbones A., Rufat J., Marsal J., 2004. Effects of stage II and postharvest deficit irrigation on peach quality during maturation and after cold storage. *J. Sci. Food Agric.*, 84: 561–568.
- Gijsman, A.J., Floris, J., Van Noordwijk, M., Brouwer, G. 1991. An inflatable minirhizotron system for root observations with improved soil/tube contact. *Plant and Soil*, 134: 261-269.
- Gill, K.S., Gajri, P.R., Chaudhary, M.R. 1996. Tillage, mulch and irrigation effects on corn (*Zea mays* L.) in relation to evaporative demand. *Soil & Tillage Research*, 39, 213-227.
- Ginestar, C., Castel, J.R. 1996. Utilización de dendrómetros como indicadores de estrés hídrico en mandarinos jóvenes regados por goteo. *Riegos y Drenajes XXI* 89: 40-46.
- Girona, J., Mata, M., Arbonés, A., Vall-Llebre, A., Carrasco, V., Marsal, J. 1995. Respuesta del crecimiento vegetativo y productivo en melocotoneros (*Prunus persica* L. Batsch. 'Sudanel') sometidos a diferentes estrategias de riego deficitario controlado. *Actas VI Congreso de la SECH*. Barcelona.
- Girona, J., Mata, M., Fereres, E., Goldhamer, D.A., Cohen, M. 2002. Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water deficits. *Agricultural Water Management*, 54: 107-122.
- Girona, J., Mata, M., Goldhamer, D.A., Johnson, R.S., Dejong, T.M. 1993. Patterns of soil and tree water status and leaf functioning during regulated deficit irrigation scheduling in peach. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 118: 580-586.
- Girona J., Mata M., Arbonés A., Alegre S., Rufat J., Marsal J., 2003. Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 128: 432-440.
- Girona, J. 1994. Respuesta fisiológica y productiva al estrés hídrico en diferentes especies de frutales: melocotonero (*Prunus persica* L. Bastch), avellano (*Corylus avellana* L.) y nogal (*Juglans regia*). Tesis Doctoral. Universitat de Lleida. 151 pp.
- Glenn, D.M., Brown, M.w., Takeda, F. 1987a. Statistical analysis of root count data from minirhizotrons. En: Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics (Taylor, H.M., Ed.). *American Society of Agronomy*, Special Publication Number 50, Madison, Wisconsin, 81-87.
- Glenn, D.M., Miller, S.S., Peterson, D.L. 1987b. Root development, water stress, and yield of mechanically harvested apple trees. *HortScience*, 22: 1256-1258.
- Goff, E.S. 1897. A study of the roots of certain perennial plant. Wisconsin Agricultural Experiment Station 14th Annue Rep., 286-298.

- Goldhamer, D., Fereres, E. 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science*, 20: 115-125.
- Goldhamer, D., Fereres, E., Mata, M., Girona, J., Cohen, M. 1999. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water stress monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 124: 437-444.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., Salinas, M. 2003. Can almond trees directly dictate their irrigation needs? *California Agriculture*, 57: 138-144.
- Goldhamer, D.A., Salinas, M., Crisost, C., Day, K.R., Soler, M., Moriana, A. 2002. Effects of regulated deficit irrigation and partial root zone drying on late harvest peach tree performance. *Acta Horticulturae*, 592: 343-350.
- Gómez-Aparisi, J. 1990. Respuesta al riego de las especies frutales: Albaricoquero, Ciruelo y Cerezo. *Fruticultura Profesional*, 30, 106-113.
- Gómez-Aparisi, J. 1991. El riego en la producción frutal. Necesidades hídricas: Riego tradicional y microirrigación. *Fruticultura Profesional*. 36, 50-60.
- González-Altozano, P., Castel, J.R. 1999. Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. I. Yield and fruit quality effects. *J. Hortic. Sci. & Biotech.* 74: 706-713.
- Gowing, D.J., Davies, W.J., Jones, H.G., 1990. A positive root-source signal as an indicator of soil drying in apple, *Malus domestica* Borkh. *Journal of Experimental Botany*, 41: 1535-1540.
- Grabarnik, P., Pages, L., Bengough, A.G. 1998. Geometrical properties of simulated maize root systems: consequences for length density and intersection density. *Plant and Soil*, 200 (2): 157-167.
- Granier, A. 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières* 42 : 193-200
- Grayston, S.J., Vaughan, D., Jones, D. 1997. Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with annual plants: The importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability. *Applied Soil Ecology*, 5 (1): 29-56.
- Gregory, P.J. 1979. A periscope method for observing root growth and distribution in field soil. *Journal of Experimental Botany*, 30: 205-214.
- Grismer, M.E. 2000. Long-term evaporation from coastal avocado/citrus orchard. *J. Irrig. And Drain. Engrg.* 126(1), 1-7.
- Hales, S. 1727. *Vegetable Static's*. London 1727. Reprint: London: Mcdonald, 1961.
- Hall, N.S., Chandler, W.F., Van Bavel, C.H.M., Reid, P.H., Anderson, J.H. 1953. A tracer technique to measure growth and activity of plant

- root systems. *N.C. Agricultural Experimental Station Technical Bulletin*, 101: 40.
- Hamblin, A. 1985. The influence of soil structure on water movement, crop root growth, and water uptake. *Advances in Agronomy*, 38: 95-158.
- Hamblin, A., Tennant, D. 1987. Root length density and water uptake in cereals and grain legumes: How well are they correlated? *Australian Journal of Agricultural Research*, 38: 513-527.
- Hatfield, J.L. 1983. The utilization of thermal infrared radiation measurements from grain sorghum crops as a method of assessing their irrigation requirements. *Irrigation Science* 3: 259-268.
- Hayward, H.E., Spurr, W.D. 1943. Effects of osmotic concentration of substrate on the entry of water into corn roots. *Botanical Gazette*, 105: 152-164.
- Head, G.C. 1967. Effects of seasonal changes in shoot growth on the amount of unsubsized root on apple and plum trees. *Journal of Horticultural Science*, 42: 169-180.
- Heeraman, D.A., Juma, N.G. 1993. A comparison of minirhizotron, core and monolith methods for quantifying barley (*Hordeum vulgare* L.) and fababean (*Vicia faba* L.) root distribution. *Plant and Soil*, 148: 29-41.
- Hendrick, R.L., Pregitzer, K.S. 1992. Spatial variation in tree root distribution and growth associated with minirhizotrons. *Plant and Soil*, 143: 283-288.
- Hilton, R.J., Bhar, D.S., Mason, G.F. 1969. A Rhizotron for *in situ* root growth studies. *Canadian Journal of Plant Science*, 49: 101-104.
- Hinckley, T.M., Bruckerhoff, D.N. 1975. Effects of drought on water relations and stem shrinkage of *Quercus alba*. *Canadian Journal of Botany* 53: 62-72
- Hoffman, G.J., Ester, J.D., Alves, W.J. 1982. Evapotranspiration of mature orange trees under drip irrigation in an arid climate. *TASAE* 25(4), 992-996.
- Holmes, J.W., Taylor, S.A., Richards, S.J. 1967. Measurement of soil water. En: R.M. Hagan, H.R. Haise, T.W. Edminister (eds.) *Irrigation of Agricultural Lands*, Agronomy Monograph no. 11, Amer. Soc. Agron. Madison, WI. 275-303
- Holzapfel, E.A. 1979. Drip Irrigation in Young Almond Trees. Thesis, University of California.
- Hsiao, T.C. 1990. Measurements of plants water stress. En: *Irrigation of Agricultural Crops*. (B.A. Steward, D.R. Nielsen, Eds.), Agronomy Monograph N° 30. Published by ASA, CSSA y SSSA, Madison, Wisconsin, USA, 243-279.

8. Bibliografia

- Hughes, K.A., Wilde, R.H. 1988. Root distributions and their interactions with the soil. *Proceedings of the Agronomy Society of New Zealand*, 18: 33-36.
- Huguet, J.G., 1985. Appréciation de l'état hydrique d'une plante à partir des variations micrométriques de la dimension des fruits ou des tiges au cours de la journée. *Agronomie* 5 : 733-741.
- Huguet, J.G., Li, S., Lorendeau, J., Pelloux, G. 1992. Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation. *Journal of Horticultural Science* 67: 631-640.
- Infoagro. 2008. www.infoagro.com.
- Intrigliolo, D.S., Castel, R. 2006a. Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agric. Water Manage.* 83: 173-180.
- Intrigliolo, D.S., Castel, R. 2006b. Usefulness of diurnal trunk shrinkage as a water stress indicator in plum trees. *Tree Physiology*, 26: 303-311.
- Jackson, R.D. 1982. Canopy temperature and crop water stress. *Advances in Irrigation Research*, 13: 651-656.
- Jagtap, S.S., Jones, J.W. 1989. Evapotranspiration model for developing crops. *Amer. Soc. Agric. Eng.* 32: 1342-1350.
- Johnson M.G., Tingey, D.T., Philips, D.L., Storm, M.J. 2001. Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environmental and Experimental Botany*, 45: 263-289.
- Jones, H.G. 1990. Physiological aspects of the control of water status in horticultural crops. *HortScience* 25: 19-26.
- Kage, H., Ehlers, W. 1996. Does transport of water to roots limit water uptake of field crops? *Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde*, 159: 583-590.
- Kainer, K.A. Wadt, L.H.O. Gomes-Silva, D.A.P. Capanu, M. 2006. Liana loads and their association with *Bertholletia excelsa* fruit and nut production, diameter growth and crown attributes. *Journal of Tropical Ecology* 22: 147-154.
- Kalma, J.D., Stanhill, G. 1969. Transpiration, evaporation and deep drainage losses from an orange plantation. *Israel J. Agric. Res.* 19 (1), 11-24.
- Karnok, K.J., Kucharski, R.T. 1982. Design and construction of a rhizotron-lysimeter facility at the Ohio State University. *Agronomy Journal*, 74: 152-156.
- Kerkides, P., Michalopoulou, H., Papaioannou, G., Pollatou, R. 1996. Water balance estimates over Greece. *Agricultural Water Management*, 32. 85-104.
- King, F.H. 1892. Natural distribution of roots in field soils. *Wisconsin Agricultural Experiment Station 9th Annue Report*, 112-120.

- Klepper, B. 1992. Development and growth of crops root system. En: Limitations to Plant Root Growth. (Hatfield, J.L. y Stewart, B.A. Eds.). Spriger-Verlag, New York. *Advances in Soil Science*, 19: 1-25.
- Klepper, B., Molz, F.J., Peterson, C.M. 1973. Temperature effects on radial propagation of water potential in cotton stem bark. *Plant Physiology* 52: 565-568.
- Klepper, B., Taylor, H.M., Huck, M.G., Fiscus, E.L. 1973. Water relations and growth of cotton in drying soil. *Agronomy Journal*, 65: 307-310.
- Kolesnikov, V.A. 1971. The Root system of Fruit Plant. Mir Publishers, Moscow.
- Kolesnikov, V.A. 1972. Methods of Studying the Root Systems of Woody Plants. Moscow. URSS.
- Koo, R.C.J. 1961. The distribution and uptake of soil moisture in citrus groves. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 74, 86-90.
- Koo, R.C.J., Sites, J.W. 1955. Results of research and response of citrus to supplemental irrigation. *Soil Sci. Soc. Fla. Proc.* 15, 180-189
- Kramer, P.J. 1983. Water Relations of Plants. Academic Press. New York. 489 pp.
- Kramer, P.J., Bullock, H.C. 1966. Seasonal variations in the proportions of suberized and unsuberized roots of trees in relation to the absorption of water. *American Journal of Botany*, 53: 200-204.
- Krasilnikov, P.K. 1960. The methods of studying the subterranean parts of the trees, shrubs and forest communities in the course of the geobotanical field investigations. En: Poleyaya Geobotanika. Lavrenko, E.M., Korchagin, A.A. (eds.). Moscow-Leningrad: Academy of Sciences of the URSS Press, 2: 448-449.
- Laitakari, E. 1929. The root system of pine (*Pinus silvestris*). A morphological investigation (Fin., Engl. Sum.). *Acta For. Fenn.* 33, 1: 1-380.
- Layne, D.R., Flore, J.A: 1993. Physiological responses of *Prunus cerasus* to whole plant source manipulation. Leaf gas exchange, chlorophyll fluorescence, water relations and carbohydrate concentrations. *Physiol. Plant.* 88: 44-51.
- Layne, R.E.C., Tan, C.S. y Fulton, J.M. 1981. Effect of irrigation and tree density on peach production. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106: 151.156.
- León, A., Del Amor, F., Torrecillas, A. 1987. El riego en la Región de Murcia. Apuntes para una historia reciente. *Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca.* 27 pp.
- León, A., Sánchez-Blanco, M.J., Torrecillas, A., Del Amor, F. 1986. Determinación gravimétrica de la intensidad de transpiración en hojas de limoneros. *Anales de Edafología y Agrobiología* 45:1087-1094.

8. Bibliografía

- Li, S.H., Huguet, J.G. 1989. Production, qualité des fruits et croissance de pêcheurs soumis á différents régimes d'alimentation hydrique. *Fruits*, 44: 225-232.
- Li, S.H., Huguet, J.G., Bussi, C. 1989a. Irrigation scheduling in a mature peach orchard using tensiometers and dendrometers. *Irrigation and Drainage Systems*, 3: 1-12.
- Li, S.H., Huguet, J.G., Sch ch, P.G., Orlando, P. 1989b. Response of peach tree growth and cropping to soil water deficit at various phenological stages of fruit development. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 64: 541-552.
- Libro Blanco Del Agua En España. 2000. Ministerio de Medio Ambiente. Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Centro de Publicaciones, Secretaría general Técnica, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 637 pp.
- Lieth, H. 1968. The determination of plant dry-matter production with special emphasis underground parts. En: Functioning of Terrestrial Ecosystems at the Primary Production Level. Proceeding of the Copenhagen Symposium. Eckardt, F.E. (ed.). Paris: UNESCO, 179-186.
- Link, S.O., Thiede, M.E., van Bavel, M.G. 1998. An improved strain-gauge device for continuous field measurement of stem and fruit diameter. *Journal of Experimental Botany* 49:1583-1587.
- Logsdon, S.L., Allmaras, R.R. 1991. Maize and soybean clustering as indicated by root mapping. *Plant and Soil*, 131: 169-176
- Loveys, B.R., Grant, W.J.R., Dry, P.R. and McCarthy, M.G. 1997. Progress in the development of partial root-zone drying. *The Australian Grapegrower and Winemaker* 403: 18-20.
- Loveys, B.R., Stoll, M., Dry, P.R. and McCarthy, M.G. 1998. Partial root-zone drying stimulates stress responses in grapevine to improve water use efficiency while maintaining crop yield and quality. *The Australian Grapegrower and Winemaker* 414a: 108-113.
- Lyford, W., Wilson, B.F. 1966. Controlled growth of forest tree roots: Technique and application. Harvard For. Pad. no. 16. Harvard University, Petersham, MA.
- Maertens, C. 1987. Ways of using endoscopy to determine growth and quality of root systems. En: Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics. (Taylor, H. M., Ed.). *American Society of Agronomy*, Special Publication Number 50, Madison, Wisconsin, 31-38.
- Maertens, C., Clauzel, Y. 1982. First observations on the use of endoscopy *in situ* root studies of cultivated plants (*Sorghum vulgare* and *Lolium multiflorum*). *Agronomie*, 2: 677-680.

- Majdy, H., Smucker, A.J.M., Persson, H. 1992. A comparison between minirhizotron and nolorith sampling methods for measuring root growth of maize (*Zea mays* L.). *Plant and Soil*, 147: 127-134.
- Manderscheid, B., Matzner, E. 1996. Effects of different fine root distribution and fine root biomass on drought stress and needle loss in spruce stands. Results from simulation calculations on water utilization. *Forstwissenschaftlicher Centralblatt*, 115: 350-362.
- Maraux, F., Lafolie, F. 1998. Modeling soil water balance of a maize-sorghum sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 62 (1), 75-82.
- MARM, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2009. www.marm.es.
- Marsal, J., Mata, M., Del Campo, J., Arbonés A., Vallverdú, X., Girona, J., Olivo, N., 2008. Evaluation of partial root-zone drying for potential field use as a deficit irrigation technique in commercial vineyards according to two different pipeline layouts. *Irrig. Sci.*, 26: 347–356.
- Marshall, D.C. 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology* 33: 385-396.
- Martín de Santa Olalla, F., De Juan, J.A. 1993. *Agronomía del Riego*. Mundi-Prensa ED. 732 pp.
- McCutchan, H., Shackel, K.A. 1992. Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *Journal of American Society for Horticultural Science*, 117: 607-611.
- McGowan, M., Williams, J.B. 1980. The water balance of an agricultural catchment. I. Estimation of evaporation from soil water records. *J. Soil Sci.* 31, 217-230.
- Mckell, C.M. 1962. Root studies. En: Pasture and Range Research Techniques. Prepared by a Joint Committee. Ithaca, New York: Comstock Publishing Associates (Cornell University Press), 173-179.
- McMichael, B.L., Taylor, H.M. 1987. Applications and limitations of rhizotrons and minirhizotrons. En: Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics (Taylor, H.M., Ed.). *American Society of Agronomy*, Special Publication Number 50, Madison, Wisconsin, 1-13.
- Merrill, S.D., Doering, E.J., Reichman, G.A. 1987. Application fo a minirhizotron with flexible, pressurized walls to a study of con root growth. En: Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics (Taylor, H.M., Ed.). *American Society of Agronomy*, Special Publication Number 50, Madison, Wisconsin, 131-143.
- Metochis, C. 1989. Water requirement, yield and fruit quality of grapefruit irrigated with high-sulphate water. *J.Hort.Sci.* 64, 733-737.

8. Bibliografía

- Meyer, W.S., Barrs, H.D. 1985. Non-destructive measurement of wheat roots in large undisturbed and repacked clay soil cores. *Plant and Soil*, 85: 237-247.
- Meyer, W.S., Barrs, H.D. 1991. Roots in irrigated clay soils: Measurement techniques and responses to rootzone conditions. *Irrigation Science*, 12: 125-134.
- Michelakis, N., Vougioucalou, E. 1988. Water used, root and top growth of olive trees for different methods of irrigation and levels of soil water potential. *Olea*, 19: 17-31.
- Mitchell, P.K., Chalmers, D.J. 1982. The effects of reduced water supply on peach tree growth and yields. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 107: 853-856.
- Miyamoto, S. 1983. Consumptive water use of irrigated pecans. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 108:676-681.
- Moore, T.J. 1981. Rooting behaviour and soil water extraction of several grain sorghum genotypes. MS Thesis. Texas Tech Univ., Plant and Soil Science Department, Lubdock, TX.
- Moreno, F., Cayuelas, J.A., Fernández, J.E., Boy, E., Murillo, J.M., Cabrera, F. 1996. Water balance and nitrate leaching in an irrigated maize crop in SW Spain. *Agricultural Water Management*, 32. 71-83.
- Moreno, F., Vachaud, G., Matín-Aranda, J., Vauclin, M., Fernández, J.E. 1988. Balance hídrico en un olivar con riego gota a gota. Resultados de cuatro años de experiencias. *Agronomie*, 8. 521-537.
- Morgan, K.T. 1992. Determination of evapotranspiration rates in citrus groves with electronic soil moisture probes. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 105, 63-66.
- Mounzer, O., Mendoza, R.H., Abrisqueta, J.M., Ruiz-Sánchez, M.C., Vera, J. 2006. Radio de influencia, calibración y aplicación de los sensores FDR de medida de la humedad. *Revista Internacional de Agua y Riego*, 26(2): 40-43.
- Mounzer, O., Nicolás, E., Conejero, W., García-Orellana, Y., Vera, J., Abrisqueta, J.M., Ruiz-Sánchez, M.C. 2008. Growth pattern and phenological stages of early-maturing peach trees under a mediterranean climate. *HortScience*. 43(6): 1813-1818
- Mounzer, O., Ruiz-Sánchez, M.C., Abrisqueta, I., Tapia, L.M., Vera, J., Abrisqueta, J.M. 2007. Comparación de las medidas de humedad del suelo con diferentes sensores con fines de programación del riego localizado en frutales. VIII Jornadas de Investigación en la Zona no Saturada del Suelo. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VIII. J.V. Giráldez Cervera y F.J. Jiménez Hornero (Eds.). Córdoba (España).
- Muñoz-Carpena, R. 2004. Field Devices for Monitoring Soil Water Content. University of Florida, Bull. N° 343. www.edis.ifas.ufl.edu.

- Nadler, A., Raveh, E., Yermiyahu, U., Green, S. 2006. Stress induced water content variations in mango stem by time domain reflectometry. *Soil Science Society American Journal* 70: 510-520.
- Nagy, J. 1996. Interaction between irrigation and soil cultivation in maize production. *Noveny termes, 45*, 389-398.
- Newbould, P.J. 1968. Methods of estimating root production. En: Functioning of Terrestrial Ecosystems at the Primary Production level. Proceedings of the Copenhagen Symposium. Eckardt, F.E. (ed.). Paris: UNESCO, 187-190.
- Newman, E.I. 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *Journal of Applied Ecology*, 3: 139-145.
- Nutman, F.J. 1934. The root-system of *Coffea arabica*. III. The spatial distribution of the absorbing area of the root. *Emp. Journal Experimental Agriculture*, 2: 293-302.
- Okano, K., Omae, H. 1996. Quantitative estimation of physiological functions of various roots with different diameters in the root system of the tea tree. *Japanese Journal of Crop Science*, 65 (4): 605-611.
- Or, D., Coelho, F.E. 1996. Soil water dynamics under drip irrigation: Transient flow uptake models. *Transactions of the ASAE*, 39, 2017-2025.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Torrecillas, A. 2006. 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
- Oskamps, J., Batjer, L.P. 1932. Soils in relation to fruit growing in New York. Part. II. Size production and rooting habit of apple trees on different soil types in de Hilton and Morton Areas, Monroe Gunty, Cornell. Univ. Agric. Exp. Stn. Ithaca, New York, Bull, 550: 45.
- Oster, J.D., Schroer, F.W. 1979. Infiltration as influenced by irrigation water quality. *Soil Science Society of American Journal*. 43: 444-447.
- Paço, T.A.; Ferreira, M.I., Conceição, N. 2006. Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: comparison between eddy covariance measurements and estimates by the FAO-56 approach. *Agric. Water Manag.* 85: 305-313.
- Paltineanu, I.C. Starr, J.L. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 61: 1576-1585.
- Pavlychenko, T.K. 1937. The soil-block washing method in quantitative root study. *Canadian Journal Research Sect. C.*, 15: 34-57.
- Paw, U.K.T., Brunet, Y., Collineau, S., Shaw, R.H., Maitni, T., Qiu, J., Hipps, L. 1992. On coherent structures in turbulence above and within agricultural plant canopies. *Agric. For. Meteorol.* 61: 55-68.

- Pearcy, R.W., Shulze, E.D., Zimmermann, R. 1991. Measurement of transpiration and leaf conductance. *Plant Physiological Ecology*. (R.W. Pearcy, J.R. Ehleringer, H.A. Mooney, P.W. Rundel, Eds.) Chapman and Hall, London, 137-160.
- Pearson, R.W., Lund, Z.F. 1968. Direct observation of cotton root growth under field conditions. *Agronomy Journal*, 60: 442-443.
- Peñuelas, J., Fillela, I., Biel, C., Serrano, L., Savé, R. 1993. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing* 14: 1887-1905.
- Pereira, J.S., Tenhunen, J.D., Lange, O.L., Beyschlag, W., Meyer, A., David, M.M. 1986. Seasonal and diurnal patterns in leaf gas exchange of *Eucalyptus globulus* trees growing in Portugal. *Canadian Journal of Forest Research*, 16: 177-184.
- Pérez-Pastor A., Ruiz-Sánchez M.C., Martínez J.A., Nortes P.A., Artés F., Domingo R., 2007. Effect of deficit irrigation on apricot fruit quality at harvest and during storage. *J. Sci. Food Agric.*, 87: 2409-2415.
- Pérez-Pastor, A., Domingo, R., Torrecillas, A., Ruiz-Sánchez, M.C. 2009. Response of apricot trees to deficit irrigation strategies. *Irrigation Science*, 27: 231-242.
- Phene, C.J. Howell, T.A. 1984. Soil sensor control of high frequency irrigation. *Transactions ASAE* 27(2):392-396.
- Phene, C.J., Reginato, R.J., Itier, B., Tanner, B.R. 1990. Sensing irrigation needs. Pp 207-261. In: G.J. Hoffman, T.A. Howell, and K.H. Solomon (eds). *Management of Farm Irrigation Systems*, Am. Soc. Agri. Eng. St. Joseph, MI.
- Phene, C.P., Allee, C.J., Pierro, J. 1989. Measurement of soil matric potential and real time irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*, 15:181-191.
- Pietola, L., Smucker, A.J.M. 1998. Fibrous carrot root responses to irrigation and compaction of sandy and organic soils. *Plant and Soil*, 200: 95-105.
- Ramos, C., Castel, J.R., Gómez, D. 1987. Efectos fisiológicos de los riegos localizados. En: *Fisiología Vegetal*. Universidad Politécnica de Valencia, 207-227.
- Rasiah, V., Carlson, G.C., Kohl, R.A. 1992. Assessment of functions and parameters estimation methods in root water uptake simulation. *Soil Science Society of American Journal*, 56: 1267-1271.
- Remorini, D., Massai, R. 2003. Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrig. Sci.* 22: 39-46.
- Rhoades, J.D. 1977. Potential for using saline agricultural drainage waters for irrigation. *Proceeding Water Management for Irrigation and Drainage*. ASCE, Reno, NV, 20-22 July 1977, 85-116.

- Richards, L. A. 1965. Physical conditions of water in soil. En: *Methods of Soil Analysis* Black, C. A. (ed). Agronomy n°9, American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp: 128-152.
- Richardson, E.A., S.D. Seeley and R.D. Walker. 1974. A model for estimating the completion of rest for Red Haven and Elberta peach. *HortScience*, 9: 331-332.
- Richardson, E.A., S.D. Seeley, R.D. Walker, J. Anderson and G. Aschcroft. 1975. Pheno-climatography of spring peach bud development. *HortScience*, 10: 236-237.
- Roberts, J. 1976. A study of root distribution and growth of *Pinus sylvestris* L. (Scotch pine) plantation in East Anglia. *Plant and Soil*, 44: 607-621.
- Rogers, W.S. 1969. The East Malling root-observation laboratories. En: *Root Growth*. Whittington, W.J. (ed.). London: Butterworth, 361-376.
- Rogers, W.S., Vyvyan, M.C. 1928. The root system of some ten year old apple trees on two different root stocks, and their relation to tree performance. *Report East Malling Research Station*, 27, II Suppl., 31-43.
- Rogers, W.S., Vyvyan, M.C. 1934. Root studies, V. Root stock and soil effect on apple root system. *Journal Pomology Horticultural Science*, 12: 110-150.
- Rohades, J.D. 1977 Potential for using saline agricultural drainage waters for irrigation. *Proceeding Water Management for Irrigation and Drainage*. ASCE, Reno, NV, 20-22 July 1977, 85-116.
- Ross, N.W., Catlin, P.B. 1978. Rootstocks and root physiology. En: *Almond Orchard Management* (Micke, W. and Kester, D., Eds.). Division of Agricultural Sciences. University of California, 25-29.
- Rotmistrov, V.G. 1909. Root-system of cultivated plants of one year's growth. Odessa: South Russian Printing Co.
- Rufat, J., Domingo, X., Pascual, M., Villar, J.M. 2009. Water productivity of peach for processing in a soil with low available water holding capacity. *VI International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops*. Viña del Mar, Chile, 63
- Ruggiero, C. 1986. Relazione tra sviluppo radicale e assorbimento idrico nell'albicocco. *Rivista della Ortoflorofrutticoltura Italiana*, 70: 253-261.
- Ruggiero, C., Andiloro, F. 1984. Distribuzione e sviluppo dell'apparato radicale dell'arancio irrigato a goccia e non irrigato. *Rivista della Ortoflorofrutticoltura Italiana*, 68: 193-200.
- Ruiz-Sánchez, M. C., Girona, J. 1995. Investigaciones sobre Riego Deficitario Controlado en Melocotonero. En: *Riego Deficitario Controlado. Fundamentos y Aplicaciones*. Colección Cuadernos VALUE 1. Mundi Prensa/Unión Europea, 67-90.

- Ruiz-Sánchez, M.C., Domingo, R., Savé, R., Biel, C., Torrecillas, A. 1997. Effects of water stress and rewatering on leaf water relations of lemon plants. *Biologia Plantarum* 39: 923-931.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Domingo, R., Torrecillas, A., Pérez-Pastor, A. 2000. Water stress preconditioning to improve drought resistance in young apricot plants. *Plant Sci.* 156: 245-251.
- Sachs, J. 1873. Über das Wachstum der Haupt und Neben wurzeln. *Arb. Bot. Inst. Würzburg*, 3, 394-477, 584-634.
- Salvucci, G.D. 1997. Soil and moisture independent estimation of stage-two evaporation from potential evaporation and albedo or surface temperature. *Water Resources Research*, 33, 111-122.
- Sánchez-Blanco, M.J. 1983. Aportación al diagnóstico del estrés hídrico en cítricos y frutales. *Tesis de Licenciatura*. Univ. Murcia, 80 pp.
- Sánchez-Blanco, M.J., Torrecillas, A. 1995. Aspectos relacionados con la utilización de estrategias de riego deficitario controlado en cultivos leñosos. En: Riego Deficitario Controlado. Fundamentos y Aplicaciones. Colección Cuadernos VALUE 1. Mundi Prensa/Unión Europea, 43-62.
- Sánchez-Cohen, I., Lopes, V.L., Slack, D.C., Fogel, M.M. 1997. Water balance model for small scale water harvesting systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132 (2), 123-128.
- Sánchez-Toribio, M.I. 1992. Climatología e hidrología agraria en la Región de Murcia en 1992. CEBAS-CSIC. 232 pp.
- Sanders, J.L., Brown, D.A. 1978. A new fiber optic technique for measuring root growth of soybeans under field conditions. *Agronomy Journal*, 70: 1073-1076.
- Schiller, G., Cohen, Y. Water balance of *Pinus halepensis* Mill. Afforestation in an arid region. *Forest Ecology and Management*, 105 (1-3), 121-128.
- Schoch, P.G., L'Hôtel, Brunel, B. 1990. Croissance du diamètre de la tige de tomate: Effets du rayonnement et de la température nocturne. *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 50, Issue 3, 229-238
- Schoch, P.G., L'Hôtel, J.C., Dauplé, P., Conos, G., Fabre, M.J. 1989. Micro variations de diamètre de tige pour le pilotage de l'irrigation. *Agronomie* 9: 137-142.
- Scholander, P.F., Hammel, H.T., Bradstreet, E.D., Hemmingsen, E.A. 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148: 339-346.
- Schuurman, J.J., Goedewaagen, M.A.J. 1971. Methods for the Examination of Root Systems and Roots (2nd ed). PUDOC, Wageningen, pp. 86.
- Sepaskhah, A.R., Kashefipour, S.M. 1995. Evapotranspiration and crop coefficient of sweet lime under drip irrigation. *Agricultural Water Management* 27, 331-340.

- Shackel, K., Lampinen, B., Sibbett, S., Olson, W. 2000. The relation of midday stem water potential to the growth and physiology of fruit trees under water limited conditions. *Acta Horticulturae*, 537: 425-430.
- Shackel, K.A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D., Gurusingham, 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 needs in deciduous fruit trees. *HortTechnology*, 7: 23-29.
- Shalyt, M.S. 1960. Methods of studying the morphology and ecology of the subterranean part of individual plant and of entire plant communities. En: *Polevaya Geotanika*. Bavenko, E.M., Korchagin, A.A. (eds.). Moscow-Leningr: Academy of Sciences of the URSS Press, 2: 369-447.
- Sharples, R.A., Rolston, D.E., Biggar, J.W., Nightingale, H.I., 1985. Evapotranspiration and soil water balances of young trickle-irrigated almond trees. Proceedings of the Third International Drip/Trickle Irrigation Congress. Fresno, California (Vol. II). ASAE Publication, 10/85, 792-797.
- Sherman, W.B., Lyrene, P.M., Crocker, T.E. 1988. Flordastar, a peach for central Florida. Circular, Agricultural Experiment Station. University of Florida S-346.
- Singleton, P.L., Maudsley, D. 1996. Pattern of water budget of crown flood irrigated citrus. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 95, 11-14.
- Smajstrla, A.G., Harrison, D.S., Tai, C., Clapp, D. 1982. Water budget of crown flood irrigated citrus. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 95, 11-14.
- Smucker, A.J.M., Aiken, R.M. 1992. Dynamic root responses to water deficits. *Soil Science*, 154: 281-289.
- Smucker, A.J.M., Ferguson, J.C., Debruyn, W.P., Belford, R.L., Richie, J.T. 1987. Image analysis of video recorded plant root systems. En: *Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics* (Taylor, H.M., Ed.). American Society of Agronomy Special Publication Number 50, Madison, Wisconsin, 67-80.
- Soil Survey Staff. 1998. Keys to Soil Taxonomy. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C.
- Soileau, J.M., Mays, D.A., Khasawneh, F.E., Kilmer, V.J. 1974. The rhizotron-lysimeter research facility at TVA, Muscle Shoals, Alabama. *Agron. J.* 66, 828-832.
- Spomer, L.A. 1985. Techniques for measuring plant water. *HortScience* 20: 1021-1028.

- Starr J.L., Paltineanu I.C. 2002. Capacitance devices. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 4. SSSA Book Ser. 5.* SSSA, Madison, WI, USA, pp. 463–474.
- Starr, J.L., Paltineanu, I.C. 1998a. Soil water dynamics using multisensor capacitance probes in nontraffic interrows of corn. *Soil Science Society of America Journal*, 62: 114-122.
- Starr, J.L., Paltineanu, I.C. 1998b. Real-time soil water dynamics over large areas using multisensor capacitance probes and monitoring system. *Soil Tillage Research*, 47: 43-49.
- Steudle, E. 1990. Methods for studying water relations of plant cells and tissues. En: *Measurements Techniques in Plant Science*. (Hashimoto, Y., Kramer, P.J., Nonami, H., Strain, B.R., Eds), Academic Press, San Diego, p. 113-150
- Tardieu, F. 1988a. Analysis of the spatial variability of maize root density. I Effect of wheel compaction on the spatial arrangement of roots. *Plant and Soil*, 107: 259-266.
- Tardieu, F. 1988a. Analysis of the spatial variability of maize root density. I Effect of wheel compaction on the spatial arrangement of roots. *Plant and Soil*, 107: 259-266.
- Tardieu, F. 1988b. Analysis of the spatial variability of maize root density. II Distances between roots. *Plant and Soil*, 107: 267-272.
- Tardieu, F., Katerji, N. 1991. Plant responses to the soil water reserve: Consequences of the root system environment. *Irrigation Science*, 12: 145-152.
- Taylor, H.M. 1969. The rhizotron at Auburn, Alabama: A plant root observation laboratory. Auburn University Agric. Exp. Stn. Circ. n.9, 171.
- Taylor, H.M., Böhm, W. 1976. Use of acrylic plastic as rhizotron windows. *Agronomy Journal*, 68: 693-694.
- Taylor, H.M., Hugh, M.G., Klepper, B. 1971. Root development in relation to soil physical condition. En: *Optimizing the soil physical environment*. (Hillel, D.I. Ed.). Academic Press. Inc. New York, 71-91.
- Taylor, H.M., Hugh, M.G., Klepper, B., Lund, Z.F. 1970. Measurement of soil-grown roots in a rhizotron. *Agronomy Journal*, 62: 807-809.
- Taylor, H.M., Upchurch, D.R., McMichael, B.L. 1990. Applications and limitations of rhizotrons and minirhizotrons for root studies. *Plant and Soil*, 129: 29-35.
- Taylor, L.R. 1961. Aggregation, variance and the mean. *Nature* (London), 189:732-735.
- Testi, L., Villalobos, F.J., Orgaz, F., Fereres, E. 2006. Water requirements of olive orchards: I. Simulation of daily evapotranspiration for scenario analysis. *Irrigation Science*, 24: 69-76.
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Agüera, T., Valdez, L.C., Fernández, M.D. 2006. Evaluation of the Watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. *Irrigation Science*, 24: 185-202.

- Thompson, R.B., Gallardo, M., Valdez, L.C. and Fernández, M.D. 2007. Determination of lower limits for irrigation management using in situ assessments of apparent crop water uptake made with volumetric soil water content sensors. *Agricultural Water Management*, 92: 13-28.
- Thompson, S.J., Armstrong, C.F. 1987. Calibration of the Watermark model 200 soil moisture sensor. *Appl. Eng. Agric.* 3(2):186-189.
- Topp, G.C., Davis, J.L. 1985. Time-domain reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling. pp. 107-127. En: D. Hillel (ed.) *Advances in Irrigation*, Vol. 3, Academic Press, Inc., New York, NY.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Anan, A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in co-axial transmission lines. *Water Resources Research*, 16: 574-582.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Anan, A.P. 1982a. Electromagnetic determination of soil water content: I. Application to wetting fronts and steep gradients. *Soil Science Society of America Journal*, 46: 672-678.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Anan, A.P. 1982b. Electromagnetic determination of soil water content: II. Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines. *Soil Science Society of America Journal*, 46: 672-678.
- Torrecillas, A., Domingo, R., Galego, R., Ruiz-Sánchez, M.C. 2000. Apricot tree response to irrigation withholding at different phenological periods. *Scientia Horticulturae*, 85: 201-215
- Torrecillas, A., Ruiz-Sánchez, M.C., Del Amor, F., León, A. 1988. Seasonal variations on water relation of *Amygdalus communis* L. under drip irrigated and non-irrigated conditions. *Plant and Soil*, 106: 215-220.
- Troughton, A. 1957. The Underground Organs of Herbage Grasses. Bull. 44 Commonw. Bur. Past. Fld Crops. 1, pp. 163
- Turner, N.C. 1986. Crops water deficits: a decade of progress. *Advances in Agronomy*, 39: 1-51.
- Turner, N.C. 1988. Measurement of plant water status by the pressure chamber technique. *Irrigation Science*, 9: 289-308.
- Turner, N.C., Schulze, E.D., Gollan, T. 1985. The responses of stomatal and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. II. In the mesophytic herbaceous species *Helianthus annuus*. *Oecologia*, 65: 348-355.
- Tyree, M.T., Dixon, M.A. 1983. Cavitation events in *Thuja occidentalis* L. *Plant Physiology*, 72: 1094-1099.
- Upchurch, D.R. 1985. Relationship between observation in minirhizotrons and true root length density. Tesis Doctoral. Texas Tech University, Lubbock (Diss. Abstr. 85-28594).
- Upchurch, D.R. 1987. Conversion of minirhizotron-root intersections to root length density. In *Minirhizotron Observation Tubes: Methods*

- and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics. (Taylor, H.M., Ed.). American Society of Agronomy. Special Publication Number 50, Madison, Wisconsin, 51-66.
- Upchurch, D.R., Ritchie, J.T. 1983. Root observations using a video recording system in minirhizotrons. *Agronomy Journal*, 75: 1009-1015.
- Upchurch, D.R., Ritchie, J.T. 1984. Battery-operated color video camera for root observations in minirhizotrons. *Agronomy Journal*, 76: 1015-1017.
- Urbano Terrón, P. 1999. Labores y Operaciones de Cultivo En: Tratado de Fitotecnia General. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. 717-736
- Uriu, K. 1965. Soil management and irrigation of peach orchards. Atti del Congresso del Pesco. C. Delaini, R. Gozzi, A. Benedetti y C. la Rosa (eds) Camara di Commercio, Industria e Agricoltura di Verona – Italy, 383-397.
- Vachaud, G., Vauclin, M., Riou, C., Chaabouni, Z. 1985. Evapotranspiration en zone semi-aride de deux couverts végétaux (gazon, blé) obtenue par plusieurs méthodes II. Méthodes neutroniques et tensiométriques. *Agronomie*, 5, 267-274.
- Valancogne, C., Nasr, Z. 1989. Measuring sap flow in small trees by heat balance method. *HortScience*, 24: 383-385.
- Van den Honert, T.H. 1948. Water transport in plant as a catenary process. *Discussions of the Faraday Society*, 3: 146-153.
- Van Noordwijk, M., Floris, J., Dejager, A. 1985. Sampling schemes for estimating root density distribution in cropped fields. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 33: 241-262.
- Van Zyl, J.L. 1988. Response of grapevine roots to soil water regimes and irrigation systems. Technical Communication n° 215. Department of Agriculture and Water Supply, Viticultural and Enological Research Institute, Stellenboxh, South Africa, 30-43.
- Vera, J., Mounzer, O., Ruiz-Sánchez, M.C., Abrisqueta, I., Tapia, L.M., Abrisqueta, J.M. 2009. Soil water balance trial involving capacitance and neutron probe measurements. *Agricultural Water Management*, 96: 905-911
- Vermeiren, L., Jobling, G.A. 1980. Riego Localizado. *Estudios FAO. Riego y Drenaje* n° 36. FAO. Roma 203 pp.
- Villalobos, F.J., Mateos, L., Orgaz, F., Fereres, E. 2002. Fitotecnia. Bases y Tecnologías de la Producción Agrícola. Ed. Mundi Prensa, 496 pp.
- Villalobos, F.J., Orgaz, F., Testi, L., Fereres, E. 2000. Measurement and modeling of evapotranspiration of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *European Journal of Agronomy*, 13: 155-163.
- Villeneuve, F., Bousquet, C. 1987. Pommier: Etude de quelques systèmes racinaires. Infos-Ctifl n° 37, CTIFL/CEHM, Marsillargues, 7-14.

- Voorhees, W.B. 1976. Root elongation along a soil-plastic container interface. *Agronomy Journal*, 68: 143.
- Vos, J., Groenwold, J. 1983. Estimation of root densities by observation tubes and endoscope. *Plant and Soil*, 74: 295-300.
- Waddington, J. 1971. Observation of plant roots *in situ*. *Canadian Journal of Botany*, 49: 1850-1852.
- Walter, H. 1970. Vegetationszonen und Klima. Ulmer, Stuttgart.
- Weaver, J.E. 1929. Root Development of Field Crops. McCraw-Hill Book Co., 261 pp.
- Wiegand, C.L., Swanson, W.A. 1982. Citrus response to irrigation: I. Irrigation requirements; daily, monthly and annual evapotranspiration amounts; and water management recommendations. *Journal of Rio Grande Valley Horticultural Society*, 35: 73-85.
- Wiersum, L.K. 1980. The effect of soil physical conditions on roots and uptake. Mineral Nutrition on Fruit Trees. Butterworths, London, 11-121.
- Wiersum, L.K. 1987. Activity of root systems of six plant species at different stages of development. *Plant and Soil*, 100: 361-370.
- Wild, A. 1992. Condiciones del Suelo y Desarrollo de las Plantas según Rusell. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. 1045 pp.
- Winkel, T., Rambal, S. 1993. Influence of water stress on grapevine growing in the field: from leaf to whole plant response. *Australian Journal of Plant Physiology*, 20: 143-157.
- Yang, X., Short, T.H., Fox, R.D., Bauerle, W.L. 1990. Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of a greenhouse cucumber crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51: 197-209.
- Yorke, J.S. 1968. A review of techniques for studying root systems. For. Res. Lab. St. John's, New Foundland, Canada. INF. Rep. N-X-20: 29.
- Zhang, J., Davies, W.J. 1991. Antitranspirant activity in the xylem sap of maize plants. *Journal of Experimental Botany*, 42, pp. 317-321
- Zhang, M., Alva, A.K., Li, Y.C., Calvert, D.V. 1996. Root distribution of grapefruit trees under dry granular broadcast vs. fertigation method. *Plant and Soil*, 183: 79-84.

Capítulo 9
Índice de tablas, figuras y fotografías

Índice de tablas

Tabla 3. 1. Producción de melocotón (miles de t) a nivel mundial, europeo y nacional	33
Tabla 3. 2. Resumen de las características de los principales indicadores del estado hídrico de la planta	44
Tabla 4. 1. Análisis textural del suelo (0-100 cm) de la parcela experimental.....	65
Tabla 4. 2. Análisis físico-químico del suelo de la parcela experimental de melocotonero. Datos medios del perfil 0-100 cm.	66
Tabla 4. 3. Análisis del agua de riego.....	66
Tabla 4. 4. Valores absolutos y medios de temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa media (HR), lluvia, velocidad media del viento (a 2 m), radiación global media (Rg) y evapotranspiración de referencia media mensual (ETo) en la finca experimental del CEBAS durante el periodo experimental.....	68
Tabla 4. 5. Parámetros para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ETc).	73
Tabla 4. 6. Programa de fertilización anual, Kg totales (Kg) y gramos por árbol (g/a), aplicado a árboles adultos de melocotoneros Flordastar.....	73
Tabla 5. 1. Valores medios de contenido de agua en el suelo (mm) en el perfil 0-1.2 m durante el periodo experimental en todos los tubos de acceso de sonda de neutrones situados en las posiciones 1-5 de los lisímetros.....	86
Tabla 5. 2. Valores anuales de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) y la evapotranspiración del cultivo de melocotonero Flordastar (ETc) durante el periodo experimental.....	97
Tabla 5. 3. Parámetros de la regresión lineal entre el coeficiente de cultivo (Kc) y el día del año (DA) para los principales periodos fenológicos del melocotonero Flordastar ($Kc = a + b \cdot DA$).....	99
Tabla 6. 1. Relación entre la posición relativa de cada sección del minirrizotróf, profundidad media y distancia horizontal al gotero	110
Tabla 6. 2. Fechas de las principales labores culturales en la parcela de melocotonero Flordastar durante el periodo experimental.....	118
Tabla 6. 3. Calibre de melocotones según las normas de comercialización del Diario Oficial de las Comunidades Europeas.....	119
Tabla 6. 4. Riego aplicado en los distintos tratamientos de riego, lluvia, ETo y ETc (mm) en cada periodo fenológico del melocotonero Flordastar en los ciclos de cultivo 2006/07, 2007/08 y 2008/09.....	122

9. Índice de tablas, figuras y fotografías

Tabla 6. 5. Densidad de longitud de raíces (DLR, cm cm^{-3}) de diámetro ≤ 0.5 mm en el perfil 0-90 cm, a 0, 30, 60, 100, 160 y 250 cm del emisor en los tratamientos T1, T2 y Ta.....	156
Tabla 6. 6. Densidad de longitud de raíces (DLR, cm cm^{-3}) de diámetro $0.5 < d \leq 2$ mm en el perfil 0-90 cm, a 0, 30, 60, 100, 160 y 250 cm del emisor en los tratamientos T1, T2 y Ta.	157
Tabla 6. 7. Crecimiento relativo (cm) del diámetro del tronco y porcentaje respecto del total anual en los tratamientos de riego durante 2008.....	160
Tabla 6. 8. Volumen de copa (m^3) y superficie sombreada (m^2) de melocotonero Flordastar durante el periodo experimental.	161
Tabla 6. 9. Floración y fructificación en los distintos tratamientos de riego en melocotonero Flordastar. 2009.	165
Tabla 6. 10. Características físico-químicas de los frutos de melocotonero Flordastar evaluadas en la cosecha de 2007, 2008 y 2009 (primer y segundo corte).	175
Tabla 6. 11. Eficiencia del uso del agua (kg m^{-3}) y eficiencia productiva (kg cm^{-2}) de melocotonero Flordastar durante el periodo experimental.	176

Índice de figuras

Figura 3. 1. Destino de la cosecha de melocotón en España.....	33
Figura 3. 2. Producción de melocotón en España (t año^{-1}). 2007.....	34
Figura 3. 3. Mapa de localización del cultivo de melocotonero en la Región de Murcia.....	34
Figura 3. 4. Evolución de la participación de las diferentes variedades de melocotón en la producción de la Región de Murcia. (*) Datos provisionales, (e) Datos estimados. (CARM, 2009).....	35
Figura 3. 5. Esquema general descriptivo de los componentes que intervienen en el balance de agua en el suelo.....	38
Figura 3. 6. Crecimiento del melocotón en peso fresco e identificación de las 3 fases de desarrollo del fruto	48
Figura 4. 1. Plano de situación y fotografías aéreas de la finca experimental del CEBAS-CSIC en Santomera (Murcia) y de la parcela experimental.	63
Figura 4. 2. Triángulo de texturas y valores medios del suelo de la parcela (-●-).	64
Figura 4. 3. Diagrama ombrotérmico: la temperatura media (línea roja) y precipitaciones mensuales (barras verticales) en la finca experimental del CEBAS, Murcia. Datos medios 2007-2009.	67

Figura 4. 4. Datos diarios de ETo (FAO, Penman-Monteith) y lluvia durante el periodo experimental en la finca experimental del CEBAS.....	69
Figura 4. 5. Diagrama de los periodos fenológicos del melocotonero Flordastar durante el periodo experimental.....	71
Figura 4. 6. Esquema del tratamiento deficitario RPR (T3).....	74
Figura 4. 7. Porcentaje de la ETc aplicado en cada tratamiento de riego y periodo fenológico del cultivo	76
Figura 4. 8. Distribución de los tratamientos de riego en la parcela de melocotoneros Flordastar.....	76
Figura 5. 1. Esquema de funcionamiento de la sonda de neutrones. ..	82
Figura 5. 2. Esquema de la posición de los tubos de acceso de sonda de neutrones (#) respecto al tronco del árbol (#□) y los goteros (■). Las letras indican las distintas zonas de influencia del riego.....	86
Figura 5. 3. Evolución del contenido de agua en el suelo (mm 1.2 m-1) en las posiciones 1 (●) y 5 (●) durante el periodo experimental. Las barras en los puntos son ± EEM. Las barras verticales corresponden a la lluvia (eje superior) y riego (eje inferior).	90
Figura 5. 4. Perfiles de humedad volumétrica en las posiciones 1 (●) y 5 (●) durante marzo (superior) y verano (inferior) del periodo experimental. Las barras en los puntos son ± EEM.	92
Figura 5. 5. Evolución de la variación del contenido ponderado de agua en el suelo (ΔS^*) a 1.2 m (●), lluvia (barras verticales azul claro), riego ponderado (barras verticales azul oscuro) y drenaje (barras grises) durante el periodo experimental. Las barras en los puntos son ± EEM. Las bandas coloreadas verticales son los periodos de reposo sin riego.....	94
Figura 5. 6. Evolución de la evapotranspiración del cultivo (ETc) de melocotonero Flordastar durante 2007 (●), 2008 (●) y 2009 (●). Las barras en los puntos son ± EEM. Las bandas coloreadas verticales son los periodos de reposo sin riego.....	95
Figura 5. 7. Evolución anual de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo, línea continua) y la evapotranspiración del cultivo de melocotonero Flordastar (ETc, ●). Los valores corresponden a la media de 3 años. Las barras en los puntos son ± EEM. Las bandas horizontales representan la máxima floración (—), aclareo (—) y cosecha (—). Las líneas punteadas verticales indican los valores máximos de ETo y ETc. Las bandas coloreadas verticales son los periodos de reposo sin riego.	96
Figura 5. 8. Valores de coeficiente de cultivo (Kc) para melocotonero Flordastar obtenidos mediante balance hídrico (●) y los que proporciona FAO-56 (—). Los	

9. Índice de tablas, figuras y fotografías

	puntos corresponden a la media de 3 años. Las barras en los puntos son \pm EEM. Las bandas horizontales representan la máxima floración (—), aclareo (—) y cosecha (—). Las bandas coloreadas verticales son los periodos de reposo sin riego.	98
Figura 5.	9. Evolución anual de la evapotranspiración del cultivo (ET_C) de melocotonero Flordastar calculada por balance hídrico (\bullet , $ET_{C(BH)}$) y la obtenida mediante el método FAO-56 (\bullet , $ET_{C(FAO-56)}$). Los valores corresponden a la media de 3 años.....	100
Figura 6.	1. Detalle de los componentes de una sonda capacitiva tipo FDR.....	106
Figura 6.	2. Esquema de la disposición del minirrizotrón respecto al tronco del árbol y a la superficie del suelo (\bullet y \blacksquare : goteros).....	109
Figura 6.	3. Malla de muestreo para el estudio de la distribución de raíces. Las intersecciones de las líneas rojas representan los puntos de muestreo en el perfil 0-0.9 m.....	113
Figura 6.	4. Riego acumulado en los tratamientos T1 (\bullet), T2 (\bullet), T3 (\bullet), T4 (\bullet) y Ta (\bullet) y evapotranspiración del cultivo (ET_C) acumulada (—) durante los ciclos de cultivo 2006/2007, 2007/2008 y 2008/2009 en melocotonero Flordastar. Las bandas azules corresponden al período de riego al 100% en el tratamiento T4. Las bandas grises corresponden al periodo de reposo sin riego.....	121
Figura 6.	5. Contenido ponderado de agua en el suelo ($mm\ 0.5\ m^{-1}$) en los tratamientos T1 (\bullet), T2 (\bullet) y T4 (\bullet) durante 2006/07 (A), 2007/08 (B) y 2008/09 (C). Las líneas horizontales indican saturación (—), capacidad de campo (—) y punto de marchitez permanente (—). Las bandas coloreadas verticales son los periodos sin riego. Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM.....	124
Figura 6.	6. Perfiles de humedad volumétrica (θ_v) en los tratamientos de riego T1 (\bullet), T2 (\bullet) y T4 (\bullet) en fechas representativas del ciclo de cultivo: postcosecha (A y B), fase I y II (C) y fase III (D) de 2006/07 (arriba), 2007/08 (centro) y 2008/09 (abajo). Las líneas verticales indican saturación (—), capacidad de campo (—) y punto de marchitez permanente (—). Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM.	125
Figura 6.	7. Potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) en los tratamientos T1 (\bullet), T2 (\bullet), T3 (\bullet), T4 (\bullet) y Ta (\bullet) durante 2006/07 (A), 2007/08 (B) y 2008/09 (C). Las barras verticales azules corresponden a la lluvia. Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son	

- ± EEM. Los asteriscos indican la existencia de diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). ... 126
- Figura 6. 8. Contenido ponderado de agua en el suelo ($\text{mm } 0.5 \text{ m}^{-1}$) en el tratamiento T3 izquierda (○), y T3 derecha (●) durante 2006/07 (A), 2007/08 (B) y 2008/09 (C). Las líneas horizontales indican saturación (—), capacidad de campo (—) y punto de marchitez permanente (—). Las líneas verticales punteadas indican cambio de lado del riego. Las bandas coloreadas verticales son los periodos sin riego. Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son ± EEM. 129
- Figura 6. 9. Perfiles de humedad volumétrica (θ_v) en el tratamiento de riego T3 izquierda (○) y T3 derecha (●) en fechas representativas del período de riego en la derecha (A) e izquierda (B) y en los periodos de no riego de 2006/07 (C) y 2008/09 (D). Las líneas verticales indican saturación (—), capacidad de campo (—) y punto de marchitez permanente (—). Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son ± EEM 130
- Figura 6. 10. Contenido de agua en el suelo en el perfil 0-0.5 m en el tratamiento de riego automático (Ta), riego diario (barras grises) y lluvia diaria (barras azules) durante el período experimental. La línea horizontal indica la capacidad de campo. Los datos son promedio diario de los originales (15 minutos)..... 132
- Figura 6. 11. Registro continuo del contenido volumétrico de agua en el suelo a 0.1 (—), 0.2 (—), 0.3 (—), 0.5 (—) y 0.8 m (—) de profundidad y eventos de riego (barras azules) en el tratamiento Ta, durante la primera semana de julio de 2007, 2008 y 2009..... 133
- Figura 6. 12. Fotosíntesis neta (A) y conductancia foliar (B) en los tratamientos T1 (■), T2 (■), T3 (■), T4 (■), y Ta (■) en la fase III de crecimiento del fruto y la postcosecha de melocotonero Flosdastar. Los valores son la media de 3 años. Las barras son ± EEM. 135
- Figura 6. 13. Índices derivados de la disminución del contenido de agua en el suelo (CAS): DD, DN y DTD durante 3 días en el tratamiento de estrés rápido..... 137
- Figura 6. 14. Contenido de agua en el suelo (CAS, $\text{mm } 0.8 \text{ m}^{-1}$) durante el periodo de estrés hídrico en los tratamientos: control (—), estrés progresivo (—) y estrés rápido (—). Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras verticales azules son la lluvia diaria. La barra superior coloreada corresponde al porcentaje de la ET_C en el estrés progresivo. 138
- Figura 6. 15. Contenido de agua en el suelo (CAS, $\text{mm } 0.8 \text{ m}^{-1}$) en los tratamientos de estrés progresivo (—) y estrés rápido (—). Las flechas indican los *puntos de inflexión*. (—). Los valores son la media de 4 repeticiones. La

9. Índice de tablas, figuras y fotografías

	barra superior coloreada corresponde al porcentaje de la ET_C en el estrés progresivo.	139
Figura 6. 16.	Perfiles de humedad en el suelo (θ_v) en los tratamientos control (●), estrés progresivo (●) y estrés rápido (●) durante el periodo de estrés. Las líneas horizontales indican saturación (—), capacidad de campo (—) y punto de marchitez permanente (—). Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM.	140
Figura 6. 17.	Potencial hídrico de hoja (Ψ_{hoja} , símbolos abiertos) y tallo (Ψ_{tallo} , símbolos cerrados) en los tratamientos control (●), estrés progresivo (●) y estrés rápido (●). La barra superior coloreada corresponde al porcentaje de la ET_C en el estrés progresivo. Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM. Letras distintas indican la existencia de diferencias significativas entre tratamientos, para cada fecha y tipo de potencial, según el test de la $MDS_{0.05}$	141
Figura 6. 18.	Disminución nocturna del contenido de agua en el suelo (DN) en el tratamiento de estrés rápido (●). Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM.	143
Figura 6. 19.	Disminución diurna del contenido de agua en el suelo (DD) en el tratamiento de estrés rápido (●) y ET_0 diaria (Δ). Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM. Las flechas muestran la <i>indicación</i> (discontinua) y <i>confirmación</i> (continua) de la situación de estrés hídrico.	143
Figura 6. 20.	Disminución máxima diaria del contenido de agua en el suelo (DMD) en el tratamiento control (●) y de estrés progresivo (●) y déficit de presión de vapor (DPV) máximo diario (). Los valores son la media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM.	144
Figura 6. 21.	Distribución de las frecuencias relativas de los coeficientes de variación (CV) de DLR durante el periodo experimental.	146
Figura 6. 22.	Regresión entre los métodos de cálculo de DLR: número de puntas (DLR_P) y longitud (DLR_L) en el tratamiento control. 2007. La línea discontinua es la relación 1:1.	147
Figura 6. 23.	Regresión entre los procedimientos de evaluación de la longitud radical: total de raíces y raíces nuevas. Los datos corresponden al tratamiento control. 2007.	148
Figura 6. 24.	Evolución de la DLR (●) y de la velocidad de crecimiento de la DLR (○) en el tratamiento de riego parcial de raíces: lado izquierdo (arriba) y lado derecho (abajo) durante el 2007. Las bandas verticales azules indican riego y las blancas no riego. Los valores son media de 3 repeticiones. Las bandas verticales grises	

	son los periodos sin riego. Las barras en los puntos son \pm EEM.....	149
Figura 6. 25.	Evolución de la densidad de longitud de raíces (DLR) (A) y tasa de crecimiento diario de la DLR (B) en los tratamientos de riego T1 (●), T2 (●) y T3 (▲) durante el 2007. Los valores son media de 3 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM. Las bandas verticales grises son los periodos sin riego.	150
Figura 6. 26.	Crecimiento en longitud de raíces (●) y en peso seco del fruto (○) (A) y tasa de crecimiento de la longitud de raíces (●) y del peso seco (○) (B) en el tratamiento control durante 2007. Los valores son media 3 (en raíces) y 4 (en frutos) repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM.	152
Figura 6. 27.	Mapa de isolíneas de humedad volumétrica ($m^3 m^{-3}$) (trazo discontinuo negro) e isorrizas de DLR ($cm cm^{-3}$) (gradiente de grises) en los tratamientos T1 (A), T2 (B) y Ta (C). Las líneas continuas rojas son el punto de marchitez permanente. Las líneas continuas azules son la capacidad de campo. 2007. Los valores son media de 2 repeticiones.	153
Figura 6. 28.	Crecimiento en longitud de ramos (A) y velocidad de crecimiento diaria (B) de melocotonero Flordastar en los tratamientos T1 (●), T2 (●), T3 (●), T4 (●) y Ta (●). Los valores son media de 16 ramos. Las barras en los puntos son \pm EEM. El asterisco indica la existencia de diferencias significativas ($P<0.05$).....	158
Figura 6. 29.	Evolución anual del diámetro del tronco de los árboles en los tratamientos T1 (●), T2 (●), T3 (●), T4 (●) y Ta (●). Los valores son la media de 20 árboles. Las letras distintas indican diferencias significativas según el test de la $MDS_{0.05}$, para cada año.....	159
Figura 6. 30.	Peso seco de madera de poda ($kg \text{ árbol}^{-1}$) retirada en los tratamientos T1 (■), T2 (■), T3 (■), T4 (■) y Ta (■) durante los años 2006, 2007, 2008 y 2009 en melocotonero Flordastar. Los valores son media de 4 repeticiones. Las barras son \pm EEM. Letras distintas indican diferencias significativas según el test de la $MDS_{0.05}$	162
Figura 6. 31.	Relación entre el peso de la poda y el agua de riego aplicada en melocotonero Flordastar para los cinco tratamientos de riego: T1 (●), T2 (●), T3 (●), T4 (●) y Ta (●) durante el periodo experimental. Cada punto corresponde a la media de cuatro repeticiones.....	163
Figura 6. 32.	Acumulación de grados de crecimiento hora (GDH) desde la ruptura de la dormancia hasta la recolección del melocotonero Flordastar (●). Cada punto es la media de 7 valores (2003 a 2009). Las barras son \pm EEM. Simulación de la acumulación de GDH durante 2010 (▲).....	164

9. Índice de tablas, figuras y fotografías

- Figura 6. 33. Diámetro ecuatorial (Izda.) y peso seco del fruto (Dcha.) en 2007 (arriba), 2008 (centro) y 2009 (abajo) del melocotonero Flordastar en los tratamientos T1 (●), T2 (●), T3 (●), T4 (●) y Ta (●). Las líneas punteadas son los cambios de fase de crecimiento del fruto. Las flechas hacia abajo indican el inicio del riego al 100% de la ET_C en el T4. Los valores son media de 4 repeticiones. Las barras en los puntos son \pm EEM. 166
- Figura 6. 34. Producción total (kg árbol⁻¹) (A) y número de frutos por árbol (B) en melocotonero Flordastar en los tratamientos T1 (■), T2 (■), T3 (■), T4 (■) y Ta (■) durante los años 2007, 2008 y 2009. Los valores son media de 4 repeticiones. Las barras son \pm EEM. Letras distintas indican diferencias significativas según el test de la $MDS_{0.05}$ 168
- Figura 6. 35. Producción total (A), número de frutos por árbol (B) y peso medio del fruto (C) de melocotonero Flordastar en los dos cortes de 2009, en los tratamientos T1 (■), T2 (■), T3 (■), T4 (■) y Ta (■). Los valores son media de 4 repeticiones. Las barras son \pm EEM. Letras distintas indican diferencias significativas según el test de la $MDS_{0.05}$. ns: no significativo. 171
- Figura 6. 36. Distribución de calibres (%) de los frutos de la cosecha de 2007 (A), 2008 (B) y 2009 (C) de melocotonero Flordastar en los tratamientos T1 (■), T2 (■), T3 (■), T4 (■) y Ta (■). Los valores son media de 4 repeticiones. Las barras son \pm EEM. Letras distintas indican diferencias significativas según el test de la $MDS_{0.05}$. ns: no significativo. (Datos previamente transformados arcsen) 172
- Figura 6. 37. Distribución de calibres (%) de los frutos de la cosecha de 2009 en el primer (A) y segundo corte (B) de melocotonero Flordastar en los tratamientos T1 (■), T2 (■), T3 (■), T4 (■) y Ta (■). Los valores son media de 4 repeticiones. Las barras son \pm EEM. Letras distintas indican diferencias significativas según el test de la $MDS_{0.05}$. ns: no significativo. (Datos previamente transformados arcsen) 174

Índice de fotografías

- Fotografía 3. 1. Detalle de las yemas de madera y de flor de melocotonero. 26
- Fotografía 3. 2. Detalle de las hojas de melocotonero. 26
- Fotografía 3. 3. Detalle de una flor de melocotonero. 27
- Fotografía 3. 4. Fruto de melocotonero en cosecha 28

Fotografía 3. 5. Poda de formación en vaso.	29
Fotografía 3. 6. Minirrizotrón y escáner para la adquisición de imágenes. Fuente: CID, Inc. (www.cid-inc.com).....	56
Fotografía 4. 1. Vista general de la parcela de melocotoneros Flordastar (mayo, 2008).	70
Fotografía 5. 1. Vista general de los lisímetros (Izda.) y sistema de drenaje (Dcha.).....	81
Fotografía 5. 2. Sonda de neutrones utilizada para la medida de la humedad del suelo.	82
Fotografía 5. 3. Equipo TDR (Izda.) y detalle de las pinzas de cocodrilo (Dcha.).	84
Fotografía 5. 4. Disposición de los tubos de acceso de sonda de neutrones en el lisímetro.	85
Fotografía 5. 5. Estación meteorológica automática, situada en la finca experimental del CEBAS-CSIC (Izda.) y detalle del software que muestra los datos (Dcha.).	87
Fotografía 5. 6. Contadores volumétricos de pulsos.	88
Fotografía 5. 7. Tuberías de salida del agua de drenaje de los lisímetros (Izda.) y detalle del goteo de agua sobre el caudalímetro (Dcha.).....	88
Fotografía 6. 1. Disposición del tubo de acceso de sonda de neutrones, sondas Watermark® (tubos finos azules), sondas capacitivas Cprobe™ (tubos blancos de PVC) y caudalímetro.....	105
Fotografía 6. 2. Cámara de presión (Izda.) y detalle de una hoja tapada en el árbol (Dcha.).....	107
Fotografía 6. 3. Equipo de medida de intercambio gaseoso LICOR LI 6400 (Izda.) y medida sobre hoja (Dcha.).	108
Fotografía 6. 4. Equipo perforador para la instalación de minirrizotrones (Izda.) y disposición de los minirrizotrones en el tratamiento RPR (Dcha.).....	110
Fotografía 6. 5. Detalle del escáner circular y minirrizotrón (Dcha.) y equipo compleTO para la medida de dinámica de raíces en campo (Izda.).....	111
Fotografía 6. 6. Medida del diámetro (Dcha.) y crecimiento de ramos (Izda.).	114
Fotografía 6. 7. Medida del diámetro del tronco.....	115
Fotografía 6. 8. Medida de la superficie sombreada.	116
Fotografía 6. 9. Medida del diámetro del fruto.	118
Fotografía 6. 10. Vista general de la parcela durante la recolección (Izda.) y calibrador para la distribución de calibres (Dcha.).	120
Fotografía 6. 11. Evaluación del peso fresco del fruto (Izda.) y refractómetro para la medida de los sólidos solubles (Dcha.).	120
Fotografía 6. 12. Análisis de la imagen con el software WinRHIZO-Tron®, evaluando el total de raíces (Izda.) y sólo las raíces de nuevo crecimiento (Dcha.).....	148

Capítulo 10
Abreviaturas y símbolos

Alfabetizables

A	Área de la pared exterior del minirrizotrón
ABA	Ácido abcísico
AF	Ácido fosfórico
AH	Ácido húmico
ANOVA	Análisis de la varianza
Ca^{+2}	Ión calcio
CAPA	Consellería de Agricultura, Pesca y Alimentación
CARM	Comunidad Autónoma de la Región de Murcia
CC	Capacidad de campo
CCC	Capacidad de cambio catiónico
CE	Conductividad eléctrica
CE 1:5	Conductividad eléctrica del extracto 1:5
Cl^-	Ión cloruro
cm	Centímetro
CM	Cuadrado Medio (análisis de la varianza)
CO_3H^-	Ión bicarbonato
CO_3Ca	Carbonato cálcico
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
CV	Coefficiente de variación
cv	Cultivar
d	Días
D	Diámetro exterior del minirrizotrón
da	Densidad aparente
DLR	Densidad de longitud radical
DPR	Desecación parcial de raíces
dS	Decisiemen
ETo	Evapotranspiración del cultivo de referencia (gramíneas)
ETc	Evapotranspiración del cultivo

10. Abreviaturas y símbolos

F	F de Fisher-Snédecor (análisis de la varianza)
FAO	Food and agriculture organization
gdl	Grados de libertad (análisis de la varianza)
GSM	Global system mobile
h	Hora
ha	Hectárea
HR	Humedad relativa
K ⁺	Ión potasio
kg	Kilogramo
K ₂ O	Óxido de potasio
kl	Factor de corrección
kPa	Kilopascal
l	Litro
LSI	Índice de saturación de Langelier
m	Metro
MAPYA	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
mg	Miligramo
Mg ⁺²	Ión magnesio
MLG	Modelo lineal general
mmol	Milimol
N	Nitrógeno / número de raíces observadas en cada sección del tubo
N32	Solución nitrogenada
NA	Nitrato amónico
Na ⁺	Ión sodio
NMg	Nitrato de magnesio
NP	Nitrato potásico

P	Probabilidad estadística / Significación
P ₂ O ₅	Óxido de fósforo
QFe	Quelato de hierro
r	Coefficiente de correlación
RAS	Relación de adsorción de sodio
RAS adj	Relación de adsorción de sodio ajustada
RDC	Riego deficitario controlado
Rg	Radiación global
s	Segundo
SC	Suma de cuadrados (análisis de la varianza)
t	Tonelada
T1	Tratamiento de riego 1
T2	Tratamiento de riego 2
T3	Tratamiento de riego 3
UF	Unidades fertilizantes

No alfabetizables

°C	Grados centígrados
DLR _i	DLR en el tiempo actual (i)
DLR _{i+1}	DLR en tiempo inmediatamente posterior al i
T _i	Efecto del tratamiento de riego
t _i	Tiempo actual (i)
t _{i+1}	Tiempo inmediatamente posterior al i
t _k	Efecto del tiempo
TP _{ij}	Efecto de la interacción entre el tratamiento de riego y la profundidad

10. Abreviaturas y símbolos

TPt_{ijk}	Efecto de la interacción del tratamiento de riego, la profundidad y el tiempo
Tt_{ik}	Efecto de la interacción entre el tratamiento de riego y el tiempo
Pt_{jk}	Efecto de la interacción entre la profundidad y el tiempo
P_j	Efecto de la profundidad
Y_{ijkl}	Valor observado de la DLR
$\varepsilon_{l(ijk)}$	Efecto de la unidad experimental o repetición (error experimental)
μ	Efecto común debido a la media propia de la variable en la población
θ_{CC}	Contenido volumétrico de agua a capacidad de campo
θ_{PM}	Contenido volumétrico de agua en el punto de marchitez permanente